บทที่ 3

ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดและความรู้พื้นฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ ตามวิธีของ DOE 2.1E [39] และ Douglas [40]

วิธีการคำนวณค่า Solar-air temperature ตามวิธีของ ASHRAE [1]

วิธีการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น (cooling load) ตามวิธีของ Mitalas [10]

วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Cooling Load Temperature Difference

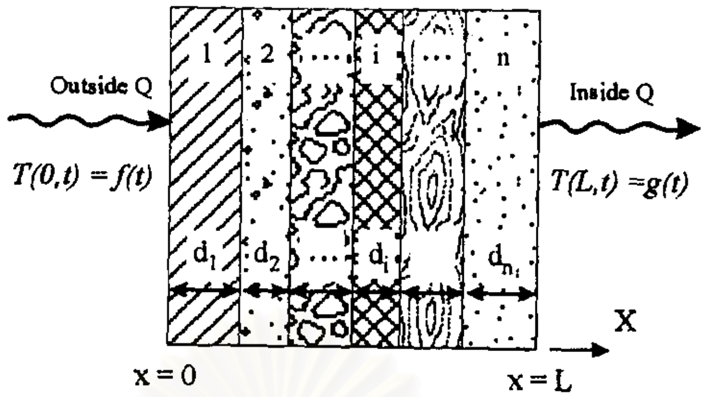
3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านจากผนังด้านนอกเข้าสู่ผนังด้านในของอาคาร สามารถทำได้โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ตามที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 3.1

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.1}$$

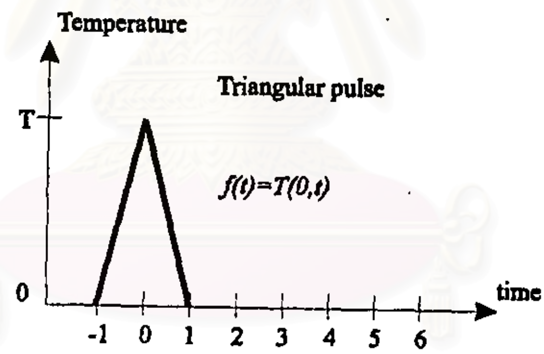
เมื่อ
T = อุณหภูมิ, $°F$
x = ระยะทางตามแนวแกน x, ft
t = เวลา, hr
α = diffusivity = $k/_{\rho Cp}$, ft^2/hr
k = ค่าการนำความร้อน, $Btu/hr\text{-}ft\text{-}°F$
Cp = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $Btu/lb\text{-}°F$
ρ = ค่าความหนาแน่น, lb/ft^3.

โดยมีค่าอุณหภูมิที่ผิวผนังชั้นนอกสุดและชั้นในสุดเป็นเงื่อนไขขอบเขต โดยสมการดังกล่าวสามารถปรับใช้กับผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายๆชั้นดังรูปที่ 3.1 ได้

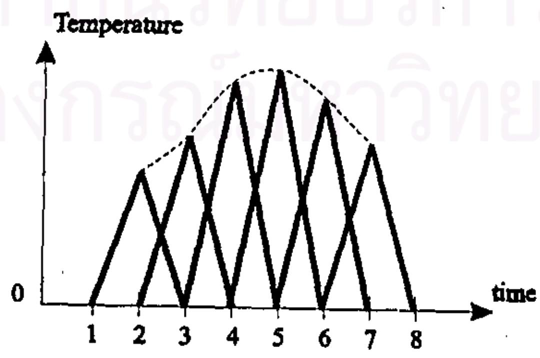


รูปที่ 3.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด

โดยที่กำหนดให้ $T(o,t)$ และ $T(L,t)$ เป็นค่าของอุณหภูมิในแต่ละชั่วโมงที่ตรวจวัดได้ที่ผิวของวัสดุชั้นนอกสุดและในสุดตามลำดับ (อาจเป็นอุณหภูมิที่ผิววัสดุหรืออาจเป็นอุณหภูมิอากาศก็ได้ในกรณีที่วัสดุริมสุดเป็นฟิล์มอากาศ) โดยที่ค่าอุณหภูมิในแต่ละชั่วโมงจะถูกเขียนเป็น pulse รูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 3.2 (ก) ซึ่งเมื่อนำ pulse สามเหลี่ยมเหล่านี้มาเขียนต่อกันในแต่ละช่วงเวลาก็จะได้กราฟของอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุที่แปรตามเวลาดังรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.2 (ก) Pulse รูปสามเหลี่ยมของอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ



รูปที่ 3.2 (ข) Pulse รูปสามเหลี่ยมเมื่อนำมาซ้อนต่อกัน

การหาผลเฉลยของสมการที่ 3.1 โดยตรง สำหรับผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดซ้อนกันนั้นอาจทำได้ลำบากเนื่องจากเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ผิวด้านนอกทั้งสองด้านแปรเปลี่ยนตามเวลาทำให้อุณหภูมิของผิววัสดุของชั้นแต่ละชั้นที่ซ้อนกันแปรตามเวลาไปด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาจึงนิยมเริ่มจากผนังชั้นเดียวก่อนแล้วจึงใช้วิธี superposition เพื่อให้ได้ผลเฉลยของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ซับซ้อนมากขึ้น

ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบนั้น ขั้นตอนแรก ได้แก่ การหาผลเฉลยของสมการที่ 3.1 ด้วยการใช้ Laplace transform เข้ากับสมการที่ 3.1 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต คือ อุณหภูมิผิวที่ระยะ $x = 0$ มีค่าเท่ากับ 0 และ อุณหภูมิผิวที่ระยะ $x = d_1$ มีค่าเท่ากับ $g(t)$ ซึ่งสมการที่ 3.1 จะแปลงเป็น

$$sT(x,s) = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2} \tag{3.2}$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตเมื่อแปลงโดย Laplace transform จากโดเมนเวลาจะเป็นดังนี้

$$\mathcal{L}\left[T(0,t) = 0\right] \quad \Rightarrow \quad T(0,s) = f(s) = 0$$

$$\mathcal{L}\left[T(d_1,t) = g(t)\right] \quad \Rightarrow \quad T(d_1,s) = g(s)$$

ผลเฉลยของสมการที่ 3.2 หลังจากพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต แล้วจะได้

$$T(x,s) = g(s) \cdot \frac{\sinh\left(\sqrt{\dfrac{s}{\alpha_1}} \cdot x\right)}{\sinh\left(\sqrt{\dfrac{s}{\alpha_1}} \cdot d_1\right)} \tag{3.3}$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูป $T(x,s) = \phi_{T1}(x,s) \cdot g(x,s)$ โดยที่

$$\phi_{T1}(x,s) = \frac{\sinh\left(\sqrt{\dfrac{s}{\alpha_1}} \cdot x\right)}{\sinh\left(\sqrt{\dfrac{s}{\alpha_1}} \cdot d_1\right)}$$

ϕ_{T1} คือ Transfer function ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pulse ของอุณหภูมิผิว $g(s)$ ซึ่งเป็น input กับ temperature response, $T(x,s)$, ใน s space

จากกฎของฟูเรียร์ ค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของ conduction จะเขียนได้ตามสมการ

$$q(x,t) = -k \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

ซึ่งเมื่อแปลงโดย Laplace transform จะได้เป็น

$$q(x,s) = -k \cdot \frac{\partial T(x,s)}{\partial x}$$

แทนด้วยค่า *T(x,s)* จากสมการที่ 3.3 แล้วจะได้

$$q(x,s) = -k \cdot \frac{\partial \phi_{T1}(x,s)}{\partial x} \cdot g(s)$$

$$= \phi_{q1}(x,s) \cdot g(s) \qquad (3.4)$$

เมื่อ $$\phi_{q1}(x,s) = -k_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot x\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot d_1\right)}$$

ϕ_{q1} ที่เป็น transfer function ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง input ซึ่งเป็น pulse ของอุณหภูมิผิว *g(s)* กับ heat flux response ของการนำความร้อนผ่านผนังทึบ

ขั้นตอนที่สอง ได้แก่ การหาผลเฉลยของสมการที่ 3.1 ด้วยการใช้ Laplace transform ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต คือ อุณหภูมิผิวที่ระยะ $x = 0$ มีค่าเท่ากับ *f(t)* และ อุณหภูมิผิวที่ระยะ $x = d_1$ มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเมื่อแปลงเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้ด้วย Laplace transform จะเป็นดังนี้

$$\mathcal{L}\left[T(0,t) = f(t)\right] \quad \Rightarrow \quad T(0,s) = f(s)$$

$$\mathcal{L}\left[T(d_1,t) = 0\right] \quad \Rightarrow \quad T(d_1,s) = g(s) = 0 \qquad (3.5)$$

ผลเฉลยของสมการที่ 3.2 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ 3.5 คือ

$$T(x,s) = \phi_{T0}(x,s) \cdot f(s) \qquad (3.6)$$

โดยมี Transfer function, ϕ_{T1} เป็น

$$\phi_{T0}(x,s) = \frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot (d_1 - x)\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot d_1\right)}$$

และจากสมการที่ 3.6 จะสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน $q(x,s)$ และ ϕ_{q0} ซึ่งเป็น Transfer function ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pulse ของอุณหภูมิผิว $f(s)$ กับ heat flux response ของการนำความร้อนผ่านผนังทึบ ได้จากกฎของฟูเรียร์ ดังนี้

$$q(x,s) = \phi_{q0}(x,s) \cdot f(s)$$

เมื่อ
$$\phi_{q0}(x,s) = k_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot (d_1 - x)\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot d_1\right)} \tag{3.7}$$

เมื่อได้วิเคราะห์ปัญหาสำหรับผนังชั้นเดียวโดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกันทั้ง 2 เงื่อนไขแล้ว หลังจากนั้นใช้วิธี superposition เพื่อรวมผลเฉลยจากทั้งสองเงื่อนไขเข้าด้วยกัน ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านนอก (ที่ระยะ $x = 0$) เนื่องจากผลของ temperature pulse ที่ระยะ $x = 0$ และ d_1 จะเขียนได้ตามสมการที่ 3.8 และการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านใน (ที่ระยะ $x = d_1$) เนื่องจากผลของ temperature pulse ที่ระยะ $x = 0$ และ d_1 จะเขียนได้ตามสมการที่ 3.9

$$q(0,s) = \phi_{q0}(0,s) \cdot T(0,s) + \phi_{q1}(0,s) \cdot T(d_1,s) \tag{3.8}$$

$$q(d_1,s) = \phi_{q0}(d_1,s) \cdot T(0,s) + \phi_{q1}(d_1,s) \cdot T(d_1,s) \tag{3.9}$$

หรือเขียนเป็นเมตริกซ์ของการนำความร้อนสำหรับผนังชั้นเดียวได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} q(0,s) \\ q(d_1,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{q0}(0,s) & \phi_{q1}(0,s) \\ \phi_{q0}(d_1,s) & \phi_{q1}(d_1,s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(0,s) \\ T(d_1,s) \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

ในกรณีที่ผนังประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด จำเป็นต้องปรับสมการที่ 3.10 ด้วยการย้ายค่าการนำความร้อน และ temperature pulse ที่ระยะ $x = 0$ ให้มาอยู่ภายในเมตริกซ์ทางด้านซ้ายของสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} T(0,s) \\ q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(d_1,s) \\ q(d_1,s) \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

เมื่อ
$$A_1(s) = \cosh\left(d_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}\right)$$

$$B_1(s) = \sinh\left(d_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha 1}}\right) \Big/ k_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha 1}}$$

$$C_1(s) = k_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}} \cdot \sinh\left(d_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}\right)$$

$$D_1(s) = \cosh\left(d_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}\right)$$

ในกรณีต้องการพิจารณาฟิล์มอากาศเป็นส่วนหนึ่งของผนังโดยถือว่าเป็นวัสดุอีกชั้นหนึ่งนั้น จะหาค่า Transfer function matrix ได้โดยให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุชั้นที่เป็นอากาศมีเข้าสู่ศูนย์จะพบว่า Transfer function matrix ของสมการที่ 3.11 จะมีค่าตามสมการที่ 3.12 ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & R_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

การหา Transfer function matrix ของผนังที่ประกอบด้วยวัสดุจำนวน n ชั้นสามารถทำได้โดยนำ Transfer function matrix ของผนังชั้นเดียวจากสมการที่ 3.11 มาคูณต่อๆกันโดยเริ่มจากผนังชั้นนอกสุดมาหาผนังชั้นในสุด ซึ่งสามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนชุดใหม่สำหรับผนังหลายชั้น ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} T(0,s) \\ q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(d_n,s) \\ q(d_n,s) \end{bmatrix}$$

หรือเขียนในรูปแบบย่อได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} T(0,s) \\ q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(L,s) \\ q(L,s) \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

เมื่อ $L = \sum_{i=1}^{n} d_i$

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{n} \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix}$$

หลังจากได้ Transfer function matrix สำหรับผนังหลายชั้นตามสมการที่ 3.13 แล้วค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผนังชั้นนอกสุดและชั้นในสุดก็จะสามารถจัดรูปใหม่ ซึ่งเขียนได้ตามสมการ 3.14 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} q(0,s) \\ q(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{D(s)}{B(s)} & -\dfrac{1}{B(s)} \\ \dfrac{1}{B(s)} & -\dfrac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(0,s) \\ T(L,s) \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

โดยมีค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุชั้นนอกสุดและชั้นในสุดเป็น input ในขณะที่ matrix กลางจะเป็น Transfer function matrix ตัวใหม่

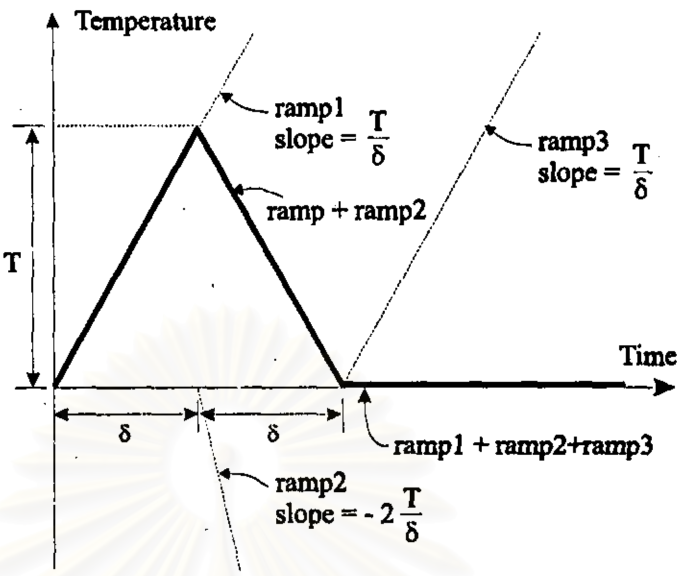
3.1.1 การคำนวณค่าอุณหภูมิผิวผนังในโดเมน S และ อนุกรมของ Response factor หรือสัมประสิทธิ์ Conduction transfer function

เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดและชั้นในสุดของแต่ละชั่วโมง ที่ถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $T(0,t)$ และ $T(L,t)$ ตามลำดับนั้น อยู่ในรูปของสมการแบบ triangular pulse ตามรูปที่ 3.3 จะเห็นว่า 1 triangular pulse นั้นเกิดจากผลรวมของ ramp จำนวน 3 ramp โดยที่ ramp ที่ 1 มีค่า slope เท่ากับ T/δ โดยตัดกับแกนเวลาที่ 0 และ ramp ที่ 2 มีค่า slope เท่ากับ $-2 \cdot T/\delta$ โดยตัดกับแกนเวลาที่ $t = \delta$ และ ramp ที่ 3 มีค่า slope เท่ากับ T/δ โดยตัดกับแกนเวลาที่ $t = 2\delta$ สมการรูป triangular pulse บนโดเมนของเวลาเมื่อเปลี่ยนไปอยู่ในโดเมน s โดยการใช้ Laplace transform จะสามารถเขียนได้เป็นสมการ $H(s)$ ดังนี้

$$H(s) = \frac{T}{\delta \cdot s^2} \quad ; \quad 0 \le t < \delta$$

$$H(s) = \frac{T \cdot \left(1 - 2 \cdot e^{-s \cdot \delta}\right)}{\delta \cdot s^2} \quad ; \quad \delta \le t < 2 \cdot \delta$$

$$H(s) = \frac{T \cdot \left(1 - 2 \cdot e^{-s \cdot \delta} + e^{-2 \cdot s \cdot \delta}\right)}{\delta \cdot s^2} \quad ; \quad t \ge 2 \cdot \delta$$



รูปที่ 3.3 รูปของ 1 triangular pulse ที่เกิดจากผลของ ramp 3 ramp

ถ้ากำหนดให้ค่า *P(s)* เป็นค่า temperature pulse ในโดเมน *s* ต่อหน่วยอุณหภูมิ ค่าอุณหภูมิผิวบนโดเมน *s* ก็จะเขียนได้เป็นผลคูณของอุณหภูมิ *T* กับค่า *P(s)* ที่ชั่วโมงใดๆ ซึ่งก็จะเป็น input temperature matrix ของสมการที่ 3.14 นั่นเอง ส่วนการคำนวณหาอนุกรมของค่า Response factor ของผนังที่ประกอบด้วยวัสดุจำนวน *n* ชั้น ทำได้โดยการคูณ pulse หนึ่งหน่วย, *P(s)*, กับ Transfer function matrix ชุดใหม่ในสมการที่ 3.14 แล้วทำการ inverse laplace transform (ILT) เพื่อแปลงผลเฉลยบน โดเมน *s* ให้เป็นผลเฉลยบนโดเมน *t* โดยสมมติให้ผลเฉลยบนโดเมน *t* อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} q(0,t) \\ q(L,t) \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} X_m & -Y_m \\ Y_m & Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{0,t-m\delta+1} \\ T_{L,t-m\delta+1} \end{bmatrix} \right\} \qquad (3.15)$$

เมื่อ
$$X_m = \mathcal{L}^{-1}\left[P(s) \cdot \frac{D(s)}{B(s)} \right]_{t=m\cdot\delta,\, m=1,2,3,\dots}$$

$$Y_m = \mathcal{L}^{-1}\left[P(s) \cdot \frac{1}{B(s)} \right]_{t=m\cdot\delta,\, m=1,2,3,\dots}$$

$$Z_m = \mathcal{L}^{-1}\left[P(s) \cdot \frac{A(s)}{B(s)} \right]_{t=m\cdot\delta,\, m=1,2,3,\dots}$$

การใช้ ILT กับ Transfer function matrix ในสมการที่ 3.15 เพื่อหาผลเฉลยของ X_m, Y_m และ Z_m ในโดเมนเวลา (t space) สำหรับผนังที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดสามารถกระทำได้โดยใช้สมการทั่วไปสำหรับ ILT ตามสมการที่ 3.16

$$q(0,t) = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot j}\cdot\int_{a-j\infty}^{a+j\infty} q(0,s)\cdot e^{s\cdot t}\cdot ds \tag{3.16}$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$

a เป็นจำนวนจริงที่มีค่ามาก

การหาคำตอบจากสมการที่ 3.16 สามารถทำได้โดยใช้ทฤษฎีของจำนวนเชิงซ้อนที่ว่าค่าอินทิเกรตของสมการที่ 3.16 จะมีค่าเท่ากับผลรวมของเศษหลงเหลือ (sum of residues) รอบ pole ของ $V(0,s)\cdot e^{s\cdot t}$ เมื่อ pole คือ จุด s ใดๆ ที่เมื่อแทนค่าแล้วทำให้ $V(0,s)\cdot e^{s\cdot t}$ หาค่าไม่ได้ เมื่อพิจารณาชุดอนุกรม Response factor จากสมการที่ 3.15 พบว่า $B(s)$ เป็นตัวหารของอนุกรม Response factor ทุกชุด ดังนั้นการหาค่ารากของ $B(s)$ ก็คือการหา poles ของ $B(0,s)\cdot e^{s\cdot t}$ นั่นเอง แต่การหาค่า pole ของผนังที่มีจำนวนวัสดุมากกว่าหนึ่งชั้นขึ้นไปจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) ประกอบด้วย เนื่องจากสมการของ $B(s)$ จะยิ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นถ้าจำนวนชั้นของวัสดุเพิ่มขึ้น แม้แต่ผนังที่ประกอบด้วยวัสดุเพียงสองชั้นก็ตาม เห็นได้จากสมการที่ 3.17

$$\begin{aligned} B(s) = {} & \frac{1}{k_2}\cdot\sqrt{\frac{\alpha_2}{s}}\cdot\cosh\left(d_1\cdot\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}\right)\cdot\sinh\left(d_2\cdot\sqrt{\frac{s}{\alpha_2}}\right) \\ & + \frac{1}{k_1}\cdot\sqrt{\frac{\alpha_1}{s}}\cdot\sinh\left(d_1\cdot\sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}\right)\cdot\cosh\left(d_2\cdot\sqrt{\frac{s}{\alpha_2}}\right) \end{aligned} \tag{3.17}$$

เมื่อสมมติให้ค่า $-\beta_n$ คือ รากที่ n ของ $B(s)$ และ δ คือ ช่วงเวลา (time step) ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ชั่วโมง ดังนั้น

การคำนวณค่าของอนุกรม X Response factor จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_1 = \frac{1}{\delta}\cdot\left[\delta\cdot\frac{D(s)}{B(s)} + \frac{D'(s)}{B(s)} - \frac{D(s)\cdot B'(s)}{(B(s))^2}\right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{s\cdot\delta}\cdot D(s)}{\delta\cdot s^2\cdot B'(s)}\Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$X_2 = -\frac{1}{\delta}\cdot\left[\frac{D'(s)}{B(s)} - \frac{D(s)\cdot B'(s)}{(B(s))^2}\right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{D(s)}{\delta\cdot s^2\cdot B'(s)}\cdot\left(e^{2\cdot\delta\cdot s} - 2\cdot e^{\delta\cdot s}\right)\Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$X_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D(s)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \cdot \left(e^{m \cdot \delta \cdot s} - 2 \cdot e^{(m-1) \cdot \delta \cdot s} + e^{(m-2) \cdot \delta \cdot s} \right) \Bigg|_{s=-\beta_n} \tag{3.18}$$

อนุกรม Y Response factor สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Y_1 = \frac{1}{\delta} \cdot \left[\frac{\delta}{B(s)} - \frac{B'(s)}{(B(s))^2} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{s \cdot \delta}}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$Y_2 = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{B'(s)}{(B(s))^2} \Bigg|_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(e^{2 \cdot \delta \cdot s} - 2 \cdot e^{\delta \cdot s} \right)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$Y_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(e^{m \cdot \delta \cdot s} - 2 \cdot e^{(m-1) \cdot \delta \cdot s} + e^{(m-2) \cdot \delta \cdot s} \right)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_n} \tag{3.19}$$

และอนุกรม Z Response factor สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Z_1 = \frac{1}{\delta} \cdot \left[\delta \cdot \frac{A(s)}{B(s)} + \frac{A'(s)}{B(s)} - \frac{A(s) \cdot B'(s)}{(B(s))^2} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{s \cdot \delta} \cdot A(s)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$Z_2 = -\frac{1}{\delta} \cdot \left[\frac{A'(s)}{B(s)} - \frac{A(s) \cdot B'(s)}{(B(s))^2} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A(s)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \cdot \left(e^{2 \cdot \delta \cdot s} - 2 \cdot e^{\delta \cdot s} \right) \Bigg|_{s=-\beta_n}$$

$$Z_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A(s)}{\delta \cdot s^2 \cdot B'(s)} \cdot \left(e^{m \cdot \delta \cdot s} - 2 \cdot e^{(m-1) \cdot \delta \cdot s} + e^{(m-2) \cdot \delta \cdot s} \right) \Bigg|_{s=-\beta_n} \tag{3.20}$$

เมื่อค่าอนุพันธ์ของ *A(s)*, *B(s)*, *C(s)* และ *D(s)* สามารถคำนวณได้โดยใช้ chain's rule ซึ่งจะได้เมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} A'(s) & B'(s) \\ C'(s) & D'(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1' & B_1' \\ C_1' & D_1' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2' & B_2' \\ C_2' & D_2' \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A'_n & B'_n \\ C'_n & D'_n \end{bmatrix} \qquad (3.21)$$

หลังจากคำนวณค่าอนุกรม X, Y และ Z Response factor จากชุดสมการที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 แล้วจึงจะคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ผ่านผิวด้านนอกสุดและด้านในสุดของผนังได้จากสมการที่ 3.22 และ 3.23 ตามลำดับ

$$q(0,t) = \sum_{m=1}^{\infty} X_m \cdot T_{0,t-m\cdot\delta+1} - \sum_{m=1}^{\infty} Y_m \cdot T_{L,t-m\cdot\delta+1} \qquad (3.22)$$

$$q(L,t) = \sum_{m=1}^{\infty} Y_m \cdot T_{0,t-m\cdot\delta+1} - \sum_{m=1}^{\infty} Z_m \cdot T_{L,t-m\cdot\delta+1} \qquad (3.23)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของอนุกรม Response factor หรือสัมประสิทธิ์ Conduction transfer function จากสมการที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 สามารถทำได้โดยใช้คุณสมบัติของ Response factor จำนวน 2 ข้อ ดังนี้ คุณสมบัติข้อแรก คือ ผลรวมของทุกพจน์ในอนุกรม X, Y และ Z จะมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม (U value) ของผนังตามสมการดังต่อไปนี้

$$\sum_{m=1}^{\infty} X_m = \sum_{m=1}^{\infty} Y_m = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m = U \qquad (3.24)$$

คุณสมบัติข้อที่สอง คือ เมื่อค่า m มีค่ามากขึ้นและที่ pole ที่มีค่าเป็นลบมาก ทำให้พจน์ท้ายๆ ของ X_m, Y_m และ Z_m จะยิ่งมีความสำคัญน้อยลงเรื่อยๆ คุณสมบัติข้อนี้จะใช้ในการลดจำนวนพจน์ที่จะต้องใช้ในการคำนวณในหัวข้อต่อไป

3.1.2 การลดจำนวนพจน์ของ *X*, *Y* และ *Z* response factors

เมื่อสังเกตค่า m ในอนุกรมของ Response factor หรือสัมประสิทธิ์ Conduction transfer function ในสมการที่ 3.22 และ 3.23 จะพบว่าตัวสมการให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ X_m, Y_m และ Z_m ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน โดยที่ m มีค่าจาก 1 ถึง ∞ ซึ่งหมายความว่าการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโดยใช้ 2 สมการนี้ จำเป็นต้องใช้ค่าของอุณหภูมิในอดีต (temperature history) เป็นจำนวนมากถึงจะได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่แม่นยำ ดังนั้นการลดจำนวนพจน์ของ Response factor จึงมีความสำคัญ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มพจน์การถ่ายเทความร้อนในอดีต (heat flux history) ให้กับสมการที่ 3.22 และ 3.23 เพื่อชดเชยค่าพจน์ Response factor ที่ลดลงไป ซึ่งก็คือการนำเอาผลเฉลยของค่าการถ่ายเทความร้อนในชั่วโมงก่อนๆ จากสมการที่ 3.22 และ 3.23 มา

ประกอบเป็นข้อมูลขาเข้านั่นเอง ซึ่งการลดจำนวนพจน์นั้นจะใช้วิธีของ Douglas [40] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เริ่มจากพิจารณาปัญหาการนำความร้อนผ่านผิวด้านนอก หรือ ที่ระยะ $x = 0$ ที่ได้รับการกระตุ้นจาก temperature pulse ที่ผิวผนังด้านใน หรือ ที่ระยะ $x = d_t$ เพียงอย่างเดียว และกำหนดให้ temperature pulse ที่ผิวผนังด้านนอกมีค่าเท่ากับ 0 จะจัดรูปสมการที่ 3.22 ใหม่ได้ดังนี้

$$q(0,t) = -\sum_{m=1}^{\infty} Y_m \cdot T_{L,t-m\cdot\delta+1} \tag{3.25}$$

ถ้ากำหนดให้ m มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ m' ใดๆ ที่ทำให้สมการ $Y_m \cong g_1 \cdot \lambda_1{}^m$ เป็นจริง เมื่อ $\lambda_n = e^{-\delta\beta_n}$ และ $g_n = \left.\dfrac{\left(1-e^{\delta\cdot\beta_n}\right)^2}{\delta\cdot\beta_n{}^2\cdot B'(s)}\right|_{s=-\beta_n}$ ต่อมาจึงกระจายพจน์ผลรวมทางซ้ายมือของสมการที่ 3.25 แล้วแทนค่าตัวแปรเวลาด้วย t กับ $t-1$ ซึ่งก็คือเวลาที่ชั่วโมงปัจจุบันกับเวลาชั่วโมงก่อน ซึ่งจะได้สมการที่ 3.26 และ 3.27 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} q(0,t) = &-Y_1 \cdot T_{L,t} - Y_2 \cdot T_{L,t-1} - Y_3 \cdot T_{L,t-2} - \ldots \\ &- Y_{m'-1} \cdot T_{L,t-m'+2} - g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'} \cdot T_{L,t-m'+1} \\ &- g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+1} \cdot T_{L,t-m'} - g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+2} \cdot T_{L,t-m'-1} - \ldots \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned} q(0,t-1) = &-Y_1 \cdot T_{L,t-1} - Y_2 \cdot T_{L,t-2} - Y_3 \cdot T_{L,t-3} - \ldots \\ &- Y_{m'-2} \cdot T_{L,t-m'+2} - Y_{m'-1} \cdot T_{L,t-m'+1} \\ &- g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'} \cdot T_{L,t-m'} - g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+1} \cdot T_{L,t-m-1} - \ldots \end{aligned} \tag{3.27}$$

หลังจากนั้น คูณสมการที่ 3.27 ด้วย λ_1 ตลอดสมการ แล้วจึงลบด้วยสมการที่ 3.26 จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} q(0,t) - \lambda_1 \cdot q(0,t-1) = &-Y_1 \cdot T_{L,t} - \left(Y_2 - \lambda_1 \cdot Y_1\right) \cdot T_{L,t-1} \\ &- \left(Y_3 - \lambda_1 \cdot Y_2\right) \cdot T_{L,t-2} - \ldots - \left(Y_{m'-1} - \lambda_1 \cdot Y_{m'-2}\right) \cdot T_{L,t-m'+2} \\ &- \left(Y_{m'} - \lambda_1 \cdot Y_{m'-1}\right) \cdot T_{L,t-m'+1} \\ &- \left(g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+1} - g_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_1{}^{m'}\right) \cdot T_{L,t-m'} \\ &- \left(g_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+2} - g_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_1{}^{m'+1}\right) \cdot T_{L,t-m'-1} - \ldots \end{aligned} \tag{3.28}$$

จากสมการที่ 3.28 จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของอุณหภูมิที่อยู่ถัดจากพจน์ $T_{L,t-m'+1}$ เป็นต้นไปซึ่งได้แก่สัมประสิทธิ์ตัวคูณของพจน์ $T_{L,t-m'}$, $T_{L,t-m'-1}$, $T_{L,t-m'-2}$ และพจน์หลังจากนั้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ต่อมา จัดรูปของสมการที่ 3.28 โดยย้ายข้างพจน์ค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากชั่วโมงก่อน, $\lambda_1 \cdot q(0,t-1)$, มาทางซ้ายของสมการจะได้

$$q(0,t) = -\sum_{m=1}^{m'} Y_{1,m} \cdot T_{L,t-m+1} + \lambda_1 \cdot q(0,t-1) \tag{3.29}$$

เมื่อ $Y_{1,1} = Y_1$

$Y_{1,m} = Y_m - \lambda_1 \cdot Y_{m-1}$ สำหรับ $m \geq 2$

ค่าตัวห้อย 1 หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 1 (first-order conduction transfer coefficient) หลังจากนั้น ใช้วิธีการขั้นต้นกับชุดอนุกรม X_m และ Z_m ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 1 ดังต่อไปนี้

$X_{1,1} = X_1$

$X_{1,m} = X_m - \lambda_1 \cdot X_{m-1}$ สำหรับ $m \geq 2$

$Z_{1,1} = Z_1$

$Z_{1,m} = Z_m - \lambda_1 \cdot Z_{m-1}$ สำหรับ $m \geq 2$

ดังนั้น สมการการถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 1 คือ

$$q(0,t) = \sum_{m=1}^{m'} X_{1,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{m'} Y_{1,m} \cdot T_{L,t-m+1} + \lambda_1 \cdot q(0,t-1) \tag{3.30}$$

$$q(L,t) = \sum_{m=1}^{m'} Y_{1,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{m'} Z_{1,m} \cdot T_{L,t-m+1} + \lambda_1 \cdot q(L,t-1) \tag{3.31}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 2 (second-order conduction transfer coefficient) สามารถหาได้โดยใช้ขั้นตอนเดียวกันกับการค่าสัมประสิทธิ์อันดับที่ 1 คือ

$$\begin{aligned}\left(q(0,t) - \lambda_1 \cdot q(0,t-1)\right) - \lambda_2 \cdot \left(q(0,t-1) - \lambda_1 \cdot q(0,t-2)\right) \\ = -Y_{1,1} \cdot T_{L,t} - \left(Y_{1,2} - \lambda_2 \cdot Y_{1,1}\right) \cdot T_{L,t-1} - \left(Y_{1,3} - \lambda_2 \cdot Y_{1,2}\right) \cdot T_{L,t-2} - \ldots \\ - \left(Y_{1,m''} - \lambda_2 \cdot Y_{1,m''-1}\right) \cdot T_{L,t-m''+1}\end{aligned} \tag{3.32}$$

เมื่อ m'' คือ ค่า m ที่ทำให้สมการ $Y_{1,m} \cong g_2 \cdot \lambda_2^{m}$ เป็นจริง

ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 2 คือ

$$X_{2,1} = X_{1,1}$$

$$X_{2,m} = X_{1,m} - \lambda_2 \cdot X_{1,m-1} \quad \text{สำหรับ } m \geq 2$$

$$Y_{2,1} = Y_{1,1}$$

$$Y_{2,m} = Y_{1,m} - \lambda_2 \cdot Y_{1,m-1} \quad \text{สำหรับ } m \geq 2$$

$$Z_{2,1} = Z_{1,1}$$

$$Z_{2,m} = Z_{1,m} - \lambda_2 \cdot Z_{1,m-1} \quad \text{สำหรับ } m \geq 2$$

ดังนั้น สมการการถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ 2 คือ

$$q(0,t) = \sum_{m=1}^{m''} X_{2,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{m''} Y_{2,m} \cdot T_{L,t-m+1} + (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot q(0,t-1) - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot q(0,t-2) \tag{3.33}$$

$$q(L,t) = \sum_{m=1}^{m''} Y_{2,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{m''} Z_{2,m} \cdot T_{L,t-m+1} + (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot q(L,t-1) - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot q(L,t-2) \tag{3.34}$$

สำหรับ สมการการนำความร้อนเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันดับที่ k (kth-order conduction transfer function) จะเขียนได้ตามสมการดังนี้

$$q(0,t) = \sum_{m=1}^{M} X_{k,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{M} Y_{k,m} \cdot T_{L,t-m+1} + \sum_{m=1}^{k} F_m \cdot q(0,t-m) \tag{3.35}$$

$$q(L,t) = \sum_{m=1}^{M} Y_{k,m} \cdot T_{0,t-m+1} - \sum_{m=1}^{M} Z_{k,m} \cdot T_{L,t-m+1} + \sum_{m=1}^{k} F_m \cdot q(L,t-m) \tag{3.36}$$

เมื่อ F_m คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนในอดีต (heat flux history coefficient) โดยที่จำนวนพจน์ของ k ไม่ควรมีค่าเกิน 5 ตามข้อแนะนำของ Peavy [41] โดยที่ F_m จะคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$F_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$$

$$F_2 = -(\lambda_1 \cdot \lambda_2 + \lambda_1 \cdot \lambda_3 + \lambda_1 \cdot \lambda_4 + \lambda_2 \cdot \lambda_3 + \lambda_2 \cdot \lambda_4 + \lambda_3 \cdot \lambda_4)$$

$$F_3 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_4 + \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 + \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$$

$$F_4 = -\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$$

โดยที่การคำนวณหาค่าจำนวนพจน์ M และอันดับ k ซึ่งเป็นค่าที่ระบุจำนวนพจน์ของอุณหภูมิในอดีต และการถ่ายเทความร้อนในอดีต ที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ 3.35 และ 3.36 นั้นจะต้องเป็นค่าที่ทำให้เงื่อนไขตามสมการที่ 3.37 เป็นจริง ซึ่งจะคล้ายกับคุณสมบัติข้อแรกของ Response factors ในสมการที่ 3.24 นั่นคือ

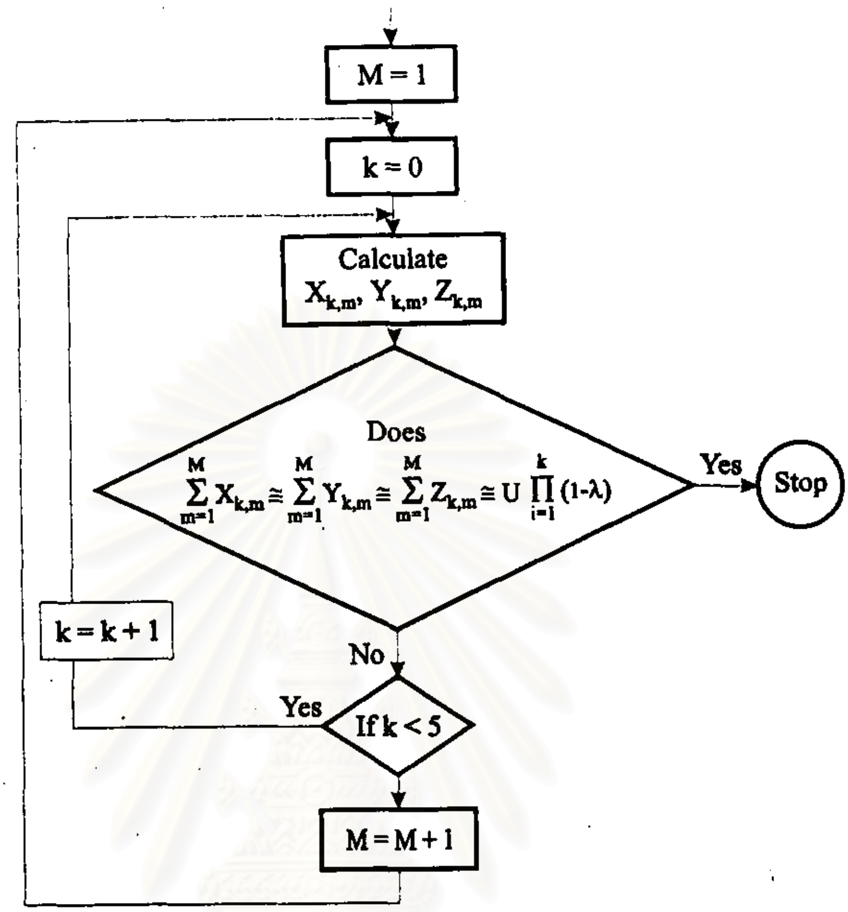
$$\sum_{m=1}^{M} X_{k,m} = \sum_{m=1}^{M} Y_{k,m} = \sum_{m=1}^{M} Z_{k,m} = U \cdot \prod_{i=1}^{k} (1-\lambda_i) \tag{3.37}$$

เมื่อ $\lambda_n = e^{-\delta\beta_n}$ โดยที่ δ คือ ช่วงเวลา (time step) β_n คือ รากที่ n ของ $B(s)$ และ U คือค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ซึ่งได้อธิบายไว้ในขั้นตอนการหาค่า X_m, Y_m และ Z_m ในหัวข้อก่อน ส่วนขั้นตอนการคำนวณหาจำนวนพจน์ M และอันดับ k ที่เหมาะสม จะดูได้จากรูปที่ 3.4

จากสมการที่ 3.35 และ 3.36 จะพบว่าค่าตัวแปรต้นของสมการทั้ง 2 คือ อนุกรมของค่าอุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดที่ระยะ $x = 0$ และอนุกรมของค่าอุณหภูมิผิวชั้นในสุดที่ระยะ $x = L$ ซึ่งค่าของตัวแปรต้นทั้ง 2 สามารถหาได้ดังนี้

1. การตรวจวัดอุณหภูมิผิวของวัสดุโดยตรง
2. การตรวจวัดหรือการสมมติค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้อง ในกรณีที่วัสดุชั้นในสุดเป็นฟิล์มอากาศ
3. การคำนวณค่า Solar-air temperature จากข้อมูลสภาพบรรยากาศ ในกรณีที่วัสดุชั้นนอกสุดเป็นฟิล์มอากาศ

การกำหนดให้ค่าอุณหภูมิผิวจากวิธีที่ 2 และ 3 เป็นค่าตัวแปรต้นหรือเป็นค่าเงื่อนไขขอบเขต จะเป็นวิธีที่โปรแกรมประมาณค่าพลังงานของอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นค่าที่ได้มาโดยง่าย และให้ผลเฉลยที่มีความน่าเชื่อถือ

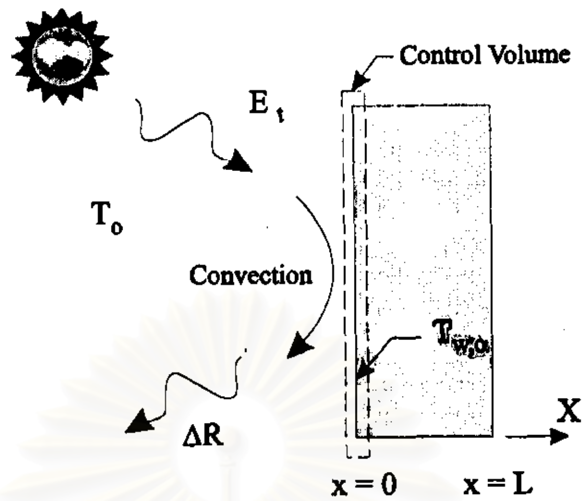


รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าจำนวนพจน์ M และค่าอันดับ k ที่เหมาะสม

3.2 วิธีการคำนวณค่า Solar-air temperature

ASHRAE ได้เผยแพร่วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบด้วย Transfer function method เป็นครั้งแรกโดยตีพิมพ์ใน 1972 ASHRAE Handbook of Fundamental โดยใช้ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้องและค่า Solar-air temperature เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขต

เมื่อ ค่า Solar-air temperature คือ ค่าของอุณหภูมิสมมติที่เป็นตัวแทนของสภาพบรรยากาศภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนัง สภาพบรรยากาศภายนอกดังกล่าว ได้แก่ ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนัง (E_t) อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายนอก (T_O) ความเร็วของลมที่ผิวของผนัง เป็นต้น



รูปที่ 3.5 แสดงสมดุลของพลังงานที่ผิวด้านนอกของผนังทึบ

วิธีการคำนวณค่า Solar-air temperature จะเริ่มจากการพิจารณาพลังงานความร้อนทุกประเภทที่มีอิทธิพลต่อปริมาตรควบคุม (control volume) ที่ผิวผนังด้านนอกสุด ซึ่งได้แก่ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนัง การพาความร้อนเนื่องจากการไหลเวียนของอากาศที่ผิวของผนัง การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวระหว่างผนังกับสิ่งแวดล้อม โดยสมมติให้มวลของผนังที่อยู่ในปริมาตรควบคุมมีปริมาณน้อยมากจนไม่มีการสะสมของพลังงานความร้อนในปริมาตรควบคุม ดังรูปที่ 3.5 แล้วจึงเขียนสมการสมดุลพลังงานที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุมตามสมการที่ 3.38 และสมการการพาความร้อนที่เทียบเท่ากับสมการที่ 3.38 ดังสมการที่ 3.39 ดังนี้

$$q_{outside} = \alpha \cdot E_t + h_o \cdot \left(T_o - T_{w,o}\right) - \varepsilon \cdot \Delta R \qquad (3.38)$$

และ

$$q_{outside} = h_o \cdot \left(T_e - T_{w,o}\right) \qquad (3.39)$$

เมื่อ $q_{outside}$ คือ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ตกกระทบผิวด้านนอกของกรอบอาคาร

T_e คือ ค่า Solar-air temperature , $°F$

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีของกรอบอาคาร

E_t คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกรอบอาคาร , $Btu/(hr\text{-}ft^2)$

h_o คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวและการพาความร้อนระหว่างกรอบอาคารกับอากาศภายนอก , $Btu/(hr\text{-}ft^2\text{-}°F)$

T_o คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายนอกกรอบอาคาร , $°F$

$T_{w,o}$ คือ อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกสุด, $°F$

ε คือ สัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีของกรอบอาคาร

ΔR คือ ผลต่างของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวระหว่างกรอบอาคารกับท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ , $Btu/(hr\text{-}ft^2)$

เนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบอาคารจะไม่สามารถระบุค่าอุณหภูมิผิวของผนังด้านนอกสุด ($T_{w,o}$) ได้ ดังนั้นเพื่อกำจัดพจน์ $T_{w,o}$ จึงนำเอาสมการที่ 3.38 มาลบด้วยสมการที่ 3.39 จัดรูปของสมการใหม่ก็จะได้ค่า Solar-air temperature ตามสมการที่ 3.40 ดังนี้

$$T_e = T_o + \frac{\alpha \cdot E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_o} \tag{3.40}$$

จากสมการที่ 3.40 พบว่า ค่าของอุณหภูมิอากาศภายนอกรายชั่วโมง (T_o) และค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายชั่วโมง (E_t) ที่ตกกระทบผิวนอกของกรอบอาคารเป็นข้อมูลที่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง หรืออาจใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจอากาศที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงเป็นตัวแทนได้ ส่วนค่าของสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสี (α) และค่าสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีของกรอบอาคาร (ε) ที่เป็นค่าคงที่อาจได้มาจากตารางคุณสมบัติการแผ่รังสีของวัสดุ แต่ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวและการพาความร้อน (h_o) และผลต่างของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาว (ΔR) ที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมงซึ่งมีอิทธิพลต่อการคำนวณค่า Solar - air temperature อย่างมาก และเป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้จากสถานีตรวจอากาศหรือการเปิดตาราง ดังนั้น ที่มาของค่าทั้ง 2 นี้อาจมาจาก การสมมติให้เป็นค่าคงที่ตามสมมติฐานของ ASHRAE หรือกำหนดให้เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมง ดังนี้

ASHRAE จึงได้สมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์ h_o เป็นค่าคงที่เท่ากับ 3.0 Btu/(hr-ft^2-°F) ซึ่งค่าดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการคำนวณค่าการนำความร้อนผ่านผนังทึบสำหรับการออกแบบ ส่วนค่า ΔR นั้น ASHRAE สมมติให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ 20 Btu/(hr-ft^2) สำหรับพื้นผิวในแนวระดับ หรือมีค่าเท่ากับ 0 Btu/(hr-ft^2) สำหรับผนังที่ตั้งฉากกับแนวระดับ ซึ่งใช้กับกรณีที่พื้นผิวหรือผนังมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศภายนอกมากเท่านั้น เป็นต้น

ส่วนการกำหนดให้เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงรายชั่วโมงนั้นมีขั้นตอนดังนี้ กำหนดให้ค่า h_o เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนตามค่าความเร็วลมและระดับความขรุขระของผิววัสดุ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามอันดับที่ 2 ของค่าความเร็วลม โดยค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามได้จากการผลการทดลองของ Rowley [42] ซึ่งทำการทดสอบวัสดุตัวอย่างที่มีขนาด 12 x 12 ตารางนิ้ว เมื่อกำหนดให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20 °F และค่าความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า 17.8 m/s ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$h_o = Coeff_1 + Coeff_2 \cdot U_o + Coeff_3 \cdot U_o^{\,2} \tag{3.41}$$

เมื่อ U_o คือ ค่าความเร็วลมบริเวณผิวของผนัง, *knots*

$Coeff_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนาม จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามจากสมการที่ 3.41

ISURRO	$Coeff_1$	$Coeff_2$	$Coeff_3$
1	2.04	0.535	0.0
2	2.20	0.369	0.001329
3	1.90	0.380	0.0
4	1.45	0.363	-0.002658
5	1.80	0.281	0.0
6	1.45	0.302	-0.001661

เมื่อ ค่า *ISURRO* คือ ระดับความขรุขระของผิววัสดุที่มีทั้งหมด 6 ระดับ โดยเรียงจากระดับความขรุขระมากไปหาน้อย ดังนี้

ระดับที่ 1. ปูนขาว (Stucco)

ระดับที่ 2. อิฐก่อ และปูนฉาบผนังแบบหยาบ (brick and rough plaster)

ระดับที่ 3. คอนกรีต (concrete)

ระดับที่ 4. ไม้สนขัดเรียบ (clear pine)

ระดับที่ 5. ปูนฉาบผนังแบบเรียบ (smooth plaster)

ระดับที่ 6. กระจก และไม้สนที่ทาสีขาว (glass and white paint on pine)

ส่วนค่าผลต่างของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวระหว่างผนังกับท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (ΔR) สำหรับกรณีที่ผลต่างของอุณหภูมิมีค่าต่ำการใช้สมมติฐานตาม ASHRAE อาจให้ค่า ΔR ที่ไม่แม่นยำ ดังนั้นจึงควรคำนวณค่า ΔR ของผนังชิ้นที่ j ด้วยสมการการแผ่รังสีความร้อนจากผนังชิ้นที่ i ที่ตกกระทบบนผนังชิ้นที่ j จากสมการดังนี้

$$\Delta R_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} q_{ij}}{A_j} \qquad \text{เมื่อ } i \neq j \tag{3.42}$$

โดยที่

$$q_{ij} = \alpha_j \cdot A_i \cdot F_{ij} \cdot \sigma \cdot \left(T_i^4 - T_j^4\right) \tag{3.43}$$

เมื่อ q_{ij} คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนจากผนังชิ้นที่ i ที่ตกกระทบบนผนังชิ้นที่ j, Btu/hr

α_j คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีของผนังชิ้นที่ j

A_i, A_j คือ พื้นที่ผิวของผนังชั้นที่ i และ j ตามลำดับ, ft^2

F_{ij} คือ ค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีความร้อนจากผนังชิ้นที่ i ที่ตกกระทบบนผนังชิ้นที่ j หรือเรียกย่อๆ ว่า ค่า view factor

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 0.1714×10^{-8} $Btu/(hr\text{-}ft^2\text{-}°R^4)$

T_i, T_j คือ ค่าอุณหภูมิของผนังชิ้นที่ i และ j ตามลำดับ, $°R$

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคารตามวิธีการของ Stephenson และ Mitalas [10] & [11] ที่ ASHRAE ใช้เป็นมาตรฐานในปัจจุบันนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.44 ซึ่งมีลักษณะเดียวกับสมการที่ 3.36 แต่จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้องต้องมีค่าคงที่ค่าหนึ่งตลอด 24 ชั่วโมง และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของวัสดุทั้งภายนอกและภายในกรอบอาคารมีค่าคงที่ ส่วนโปรแกรมประมาณค่าพลังงานในอาคารที่ใช้สมการที่ 3.44 ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ ได้แก่ โปรแกรม BLAST [43] โปรแกรม TRACE 600 [44] และ โปรแกรม E20-II [45] เป็นต้น

$$q_{inside}(t) = A \cdot \left[\sum_{n=0} b_n \left(T_{e,t-n\delta}\right) - \sum_{n=1} d_n \left(\frac{q_{e,t-n\delta}}{A}\right) - T_{rc} \sum_{n=0} c_n\right] \tag{3.44}$$

เมื่อ $q_{inside}(t)$ คือ ค่าการนำความร้อนผ่านผนังทึบหรือหลังคาที่เวลา t , *Btu/hr*

t คือ เวลา , *hr*

δ คือ ช่วงเวลา (time step) , *hr*

n คือ Summation index

$T_{e,t-n\delta}$ คือ Solar-air temperature ที่เวลา $t-n\delta$, °F

T_{rc} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในห้อง , °F

b_n, c_n, d_n คือ สัมประสิทธิ์ Conduction transfer function ของกรอบอาคาร

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบของ Stephenson และ Mitalas จะมีส่วนคล้ายกับวิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบของโปรแกรม DOE-2 นั่นคือทั้งสองโปรแกรมต่างก็ใช้วิธี Transfer function และใช้ข้อมูลสภาพบรรยากาศเป็นข้อมูลขาเข้าเหมือนกัน แต่ทั้งสองโปรแกรมจะมีส่วนต่างตรงที่วิธีของ Stephenson และ Mitalas เสนอให้คำนวณค่า Solar - air temperature จากข้อมูลสภาพบรรยากาศ แต่โปรแกรม DOE-2 จะทำการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวนอกสุดจากข้อมูลสภาพบรรยากาศแทน

3.3 ค่าภาระการทำความเย็น (Cooling load)

ค่าภาระการทำความเย็น คือ ปริมาณของพลังงานความร้อนที่ต้องนำออกจากโซนต่อหนึ่งหน่วยเวลาเพื่อควบคุมให้ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศในโซนให้มีค่าคงที่ ซึ่งค่าภาระการทำความเย็นดังกล่าวจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ภาระการทำความเย็นแบบความร้อนสัมผัส (sensible heat gain) และ ภาระการทำความเย็นแบบความร้อนแฝง (latent heat gain)

ภาระการทำความเย็นแบบความร้อนสัมผัส หมายถึง ภาระการทำความเย็นที่เป็นความร้อนส่วนที่ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องเปลี่ยนแปลงอันได้แก่ ความร้อนที่แหล่งกำเนิดความร้อนที่อยู่ในบริเวณที่พิจารณาถ่ายเทให้กับอากาศด้วยการแผ่รังสีความร้อน แหล่งกำเนิดความร้อนเหล่านั้นได้แก่ กรอบของโซน หลอดไฟฟ้า ผู้อยู่อาศัย และ เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น การคำนวณค่าภาระการทำความเย็นขึ้นกับ ประเภทของแหล่งกำเนิดความร้อน มวลของกรอบโซน และความเร็วของอากาศภายในโซน โดยตั้งสมมติฐานว่าค่าภาระความร้อนจากแต่ละแหล่งกำเนิดเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นค่าภาระการทำความเย็นรวมของบริเวณที่พิจารณาที่เวลาใดๆ จะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าภาระการทำความเย็นของแต่ละแหล่งกำเนิด *ภาระการทำความเย็นแบบความร้อนแฝง* คือ ภาระการทำความเย็นในส่วนที่ทำให้ ความชื้นของอากาศในบริเวณที่พิจารณาเปลี่ยนแปลงไป

การคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของบริเวณที่พิจารณาสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่างเช่น วิธี Energy balance วิธี Transfer function วิธี CLTD/SCL/CLF และ วิธี TETD/TA เป็นต้น สองวิธีแรกเป็นวิธีการคำนวณที่เหมาะสมสำหรับใช้สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมาณค่าพลังงานอาคารเนื่องจากใช้ระบบสมการที่ซับซ้อนแต่ให้ผลเฉลยที่น่าเชื่อถือได้ ส่วนสองวิธีหลังเป็นวิธีที่สามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้เครื่องคำนวณเลขทั่วไป แต่ความน่าเชื่อถือของผลเฉลยจะขึ้นกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะวิธี Transfer function และวิธี CLTD/SCL/CLF เท่านั้น

การคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของโซนด้วยวิธี Transfer function สามารถทำได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function (RTF) ซึ่งขึ้นกับลักษณะของการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติการกักเก็บความร้อนของบริเวณที่พิจารณา เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์ RTF อาจมีที่มาได้ 2 แบบ คือ การประมาณค่าในช่วงหรือการประมาณค่านอกช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor ของ Stephenson และ Mitalas [10] & [11] หรืออาจมาจากการคำนวณโดยใช้ Custom weighting-factor method ของ Kerrisk [12] ตามที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ส่วนค่าภาระการทำความเย็นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q_t = \sum_{i=1}\left(v_0 \cdot q_t + v_1 \cdot q_{t-\delta} + v_2 \cdot q_{t-2\delta} + \ldots\right) - \left(w_1 \cdot Q_{t-\delta} + w_2 \cdot Q_{t-2\delta} + \ldots\right) \tag{3.45}$$

เมื่อ Q_t คือ ค่าภาระการทำความเย็นที่เวลา t ใดๆ

i คือ Summation index ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนของแหล่งกำเนิดความร้อนที่พิจารณา

δ คือ ช่วงเวลา (Time step), 1 hr

v_n , w_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function

สมการที่ 3.44 จะพิจารณาความหน่วง (time lag) ของการนำความร้อนผ่านผนังเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในผนัง ส่วนสมการที่ 3.45 จะพิจารณาความหน่วงของภาระการทำความเย็นเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในกรอบโซนและเครื่องตกแต่งห้อง

3.4 วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Cooling Load Temperature Difference

วิธี CLTD/SCL/CLF เป็นวิธีการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนแบบต่างๆ ในขั้นตอนเดียว โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จำนวน 3 แบบ ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนแต่ละแบบภายในบริเวณที่พิจารณาดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ใช้สำหรับคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของการนำความร้อนผ่านเพดาน ผนังทึบ และกระจก ค่าสัมประสิทธิ์ SCL ใช้สำหรับคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของการแผ่รังสีความร้อนผ่านกระจก และ ค่าสัมประสิทธิ์ CLF ใช้สำหรับคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนภายในของบริเวณที่พิจารณา แหล่งความร้อนภายในดังกล่าวได้แก่ หลอดไฟฟ้า ผู้อยู่อาศัย และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ที่อยู่ในขอบเขตงานวิจัยเท่านั้น

รูปแบบของสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของการนำความร้อนจะถูกเขียนในลักษณะของสมการการถ่ายเทความร้อนสภาวะคงตัวตามสมการที่ 3.46 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ CLTD หาได้จากตารางที่ 30 และ 32 บทที่ 26 ของ ASHRAE [1] หรือ คำนวณจากโปรแกรม CLTDTAB ของ McQuiston [34]

$$Q = U \cdot A \cdot CLTD \tag{3.46}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ CLTD สามารถกระทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่าพลังงานอาคารนำมาคำนวณค่าภาระการทำความเย็นรายชั่วโมง (Q) ก่อน แล้วนำค่าดังกล่าวมาหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม (U) และพื้นที่ผิวของผนัง (A) จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์ CLTD หรือ ค่าผลต่างอุณหภูมิที่เทียบเท่าค่าภาระการทำความเย็น โดยค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ที่คำนวณได้นี้จะอยู่ภายใต้สมมติฐานของข้อมูลขาเข้าของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประมาณค่าพลังงานอาคารที่ถูกนำมาใช้คำนวณค่าภาระการทำความเย็นรายชั่วโมง (Q) ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ที่ระบุในตารางที่ 30 และ 32 ที่ถูกพัฒนาโดย McQuiston [34] ที่ ASHRAE ใช้เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน จะมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ค่า Solar-air temperature ของข้อมูลขาเข้ามีค่าเป็นไปตามที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ค่า Solar-air temperature ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 โดยค่าดังกล่าวเป็นข้อมูลของวันที่ท้องฟ้าโปร่งที่ ละติจูด 24, 36 และ 48 °N วันที่ 21 กรกฎาคม
2. กำหนดให้ค่าของอุณหภูมิอากาศภายในห้องเป็นค่าคงที่เท่ากับ 78 °F

3. กำหนดให้ค่าของอุณหภูมิอากาศภายนอกห้องมีค่าสูงสุดเท่ากับ 95 °*F* มีค่าเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 85 °*F* และมีค่าความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดในหนึ่งวันเท่ากับ 21 °*F*
4. กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกเท่ากับ 3.0 $hr\text{-}ft^2\text{-}°F/Btu$ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศภายในเท่ากับ 1.43 $hr\text{-}ft^2\text{-}°F/Btu$
5. กำหนดให้เครื่องปรับอากาศถูกใช้งานตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน ติดต่อกัน 7 วันต่อสัปดาห์
6. ผนังมีสีดำหรือสีเข้ม
7. ไม่มี exterior shading ภายในบริเวณที่พิจารณา
8. Ground reflectance มีค่าเท่ากับ 0.20
9. ท้องฟ้าแบบ clear sky ที่มีค่า clearness number เท่ากับ 1.0
10. ฟิล์มอากาศภายในห้องสมมติให้เป็นอากาศที่อยู่นิ่ง (still air)

และหากต้องการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นที่มีเงื่อนไขแตกต่างจากข้อกำหนดขั้นต้น McQuiston [34] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าในช่วงหรือการประมาณค่านอกช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ที่อ่านได้จากตารางโดยใช้ตัวตรวจแก้ (correction factor) ที่แสดงไว้ท้ายตาราง ซึ่งสามารถปรับแก้ได้เพียงแค่ ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกห้อง เท่านั้น ในกรณีที่ต้องการค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ของเดือนอื่นและ/หรือที่ละติจูดอื่นนอกเหนือจากค่าที่กำหนด จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CLTDTAB ของ Falconer และ Sowell [38] เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ CLTD เหล่านี้ หรืออาจใช้วิธีการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD สำหรับเดือน ละติจูด และสีอื่นๆ นอกเหนือจากค่าที่กำหนด จากสมการตรวจแก้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ของ ASHRAE Handbook of fundamental ปี ค.ศ. 1981 [47] ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ Rudoy [26] ดังนี้

$$Corr.CLTD = (CLTD + LM) \cdot K_c + (78 - T_{rc}) + (T_m - 85) \tag{3.47}$$

เมื่อ *Corr.CLTD* คือ ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD ที่ปรับแก้แล้ว

CLTD คือ ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD จากตารางที่ 7 [47]

LM คือ ค่าตรวจแก้ของเดือนและละติจูด จากตารางที่ 9 [47]

K_C คือ ตัวตรวจแก้ของสี [47] ซึ่งมีค่าดังนี้

K_C = 1 สำหรับสีดำหรือสีขาวในเขตอุตสาหกรรม

K_C = 0.83 สำหรับสีเข้มปานกลาง (เขตชนบท)

K_C = 0.65 สำหรับสีอ่อน (เขตชนบท)

T_{rc} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง

T_m คือ ค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศภายนอกกรอบอาคาร – (ผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างวัน)/2

จากสมการที่ 3.46 และ 3.47 พบว่า วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถคำนวณค่าภาระการทำความเย็นได้ด้วยเครื่องคำนวณเลขทั่วไป ซึ่งทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน แต่วิธีนี้ยังมีข้อจุดบกพร่องตรงที่ขาดความยืดหยุ่นเมื่อนำไปใช้ในงานนอกขอบเขตที่ได้ระบุไว้ ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD จากตารางของ ASHRAE [1] หรือ McQuiston [34] จะจัดทำเฉพาะวัสดุใช้แพร่หลายในประเทศของผู้เสนอมาตรฐาน รวมทั้งวัสดุเหล่านั้นจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เจาะจง เช่น ค่า Solar-air temperature ของละติจูดที่ 40°N ซึ่งเป็นค่าตัวแทนของข้อมูลสภาพบรรยากาศ (ค่าอุณหภูมิของอากาศภายนอก ค่ารังสีรวมที่ตกกระทบผนัง ค่าความเร็วลม ค่าการดูดซับรังสีของผนัง และค่า view factor ของผนัง เป็นต้น) ต้องมีค่าตามตารางที่ 3.2 และ ผลเฉลยจะใช้งานได้ดีที่ละติจูดและลองจิจูดที่ระบุไว้เท่านั้น ถ้านำค่า CLTD ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับวัสดุชนิดอื่น หรือใช้กับประเทศที่ตั้งอยู่ในละติจูดและลองจิจูดที่อยู่นอกเหนือจากค่าที่สมมติไว้ก็อาจส่งผลให้การคำนวณเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถึงแม้ว่าจะมีการปรับแก้โดยตัวตรวจแก้ที่แนะนำโดย ASHRAE ก็ตาม

จากเหตุผลที่ได้กล่าวนำในขั้นต้นจะพบว่า การประมาณค่าภาระการทำความเย็นด้วยสัมประสิทธิ์ CLTD ตามตารางของ ASHRAE จะให้ผลเฉลยที่มีความน่าเชื่อถือก็ต่อเมื่อสภาวะแวดล้อมและคุณลักษณะของอาคารอยู่ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3.2 ค่า Solar air temperature ของวันที่ 21 กรกฎาคม สำหรับละติจูดที่ 40 องศาเหนือ

เวลา	To	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	HORIZON
1	76	76	76	76	76	76	76	76	76	69
2	76	76	76	76	76	76	76	76	76	69
3	75	75	75	75	75	75	75	75	75	68
4	74	74	74	74	74	74	74	74	74	67
5	74	74	74	74	74	74	74	74	74	67
6	74	80	93	95	84	76	76	76	76	72
7	75	80	99	106	94	78	78	78	78	81
8	77	81	99	109	101	82	81	81	81	92
9	80	85	96	109	106	88	85	85	85	102
10	83	88	91	105	107	95	88	88	88	111
11	87	93	93	99	106	102	93	93	93	118
12	90	96	96	96	102	106	102	96	96	122
13	93	99	99	99	99	108	112	105	99	124
14	94	99	99	99	99	106	118	116	102	122
15	95	100	100	100	100	103	121	124	111	117
16	94	98	98	98	98	99	118	126	116	109
17	93	98	96	96	96	96	112	124	117	99
18	91	97	93	93	93	93	101	112	110	89
19	87	87	87	87	87	87	87	87	87	80
20	85	85	85	85	85	85	85	85	85	78
21	83	83	83	83	83	83	83	83	83	76
22	81	81	81	81	81	81	81	81	81	74
23	79	79	79	79	79	79	79	79	79	72
24	77	77	77	77	77	77	77	77	77	70

(ก) สำหรับผนังผิวสีอ่อน $\alpha/h_o = 0.15$

เวลา	To	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	HORIZON
1	76	76	76	76	76	76	76	76	76	69
2	76	76	76	76	76	76	76	76	76	69
3	75	75	75	75	75	75	75	75	75	68
4	74	74	74	74	74	74	74	74	74	67
5	74	74	75	75	74	74	74	74	74	67
6	74	85	112	115	94	77	77	77	77	77
7	75	84	124	136	113	81	81	81	81	94
8	77	85	121	142	125	86	85	85	85	114
9	80	90	112	138	131	96	89	89	89	131
10	83	84	100	127	131	107	94	94	94	145
11	87	98	99	111	125	118	100	98	98	156
12	90	101	101	102	114	123	114	102	101	162
13	93	104	104	104	106	124	131	117	105	162
14	94	105	105	105	105	118	142	138	111	156
15	95	105	104	104	104	111	146	153	127	146
16	94	102	102	102	102	103	142	159	138	131
17	93	102	99	99	99	99	131	154	142	112
18	91	102	94	94	94	94	111	132	129	94
19	87	87	87	87	87	87	87	88	88	80
20	85	85	85	85	85	85	85	85	85	78
21	83	83	83	83	83	83	83	83	83	76
22	81	81	81	81	81	81	81	81	81	74
23	79	79	79	79	79	79	79	79	79	72
24	77	77	77	77	77	77	77	77	77	70

(ข) สำหรับผนังผิวสีเข้ม $\alpha/h_o = 0.30$