

### บทที่ 3

#### ทฤษฎี สมการ และการวิเคราะห์

ในกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติมกับระบบกระจกนั้น คุณสมบัติโดยรวมของระบบกระจกจะมีลักษณะที่ซับซ้อนขึ้นเพราะจะขึ้นกับค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจก ค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ และผลของการสะท้อนระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่ โดยในการประเมินสมรรถนะนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงผลต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อที่จะนำไปสู่การประเมินค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบโดยรวม เช่น ค่าการส่งผ่านของระบบ ค่าการสะท้อนของระบบ และค่าการดูดกลืนรังสีในแต่ละชั้นได้ นอกจากนี้แล้วการติดตั้งมู่ลี่ก็จะมีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient, U-value) โดยการติดตั้งมู่ลี่จะทำให้การพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในส่วนของแผงสีคลื่นยาวจากผิวกระจกด้านในมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าการถ่ายเทความร้อนในส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่า inward-flowing fractions อีกด้วย ดังนั้นในการศึกษา และวิเคราะห์สมรรถนะของกระจกติดมู่ลี่นั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทั้งหมด เพื่อที่จะนำไปสู่การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ได้อย่างเหมาะสม

สำหรับการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ในบริเวณกระจกนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมา [5,7-9] ได้แสดงให้เห็นว่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบกระจกนั้นประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนของการแผ่รังสีคลื่นสั้นอันเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกเข้ามาโดยตรง และส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาวอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิผิว (surface temperature) ของกระจก ดังนั้นเมื่อนำหลักการดังกล่าวมาใช้กับระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ความไม่สบายเชิงความร้อนก็สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนเช่นกันคือ ความไม่สบายเชิงความร้อนในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่มากระทบผู้อยู่อาศัย และความไม่สบายเชิงความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นยาวจากอุณหภูมิผิวของมู่ลี่มาสู่ผู้อยู่อาศัย

โดยในการประเมินถึงผลกระทบเนื่องจากรังสีคลื่นสั้นนั้นสามารถพิจารณาหาค่าได้จาก การส่งผ่านของความร้อนที่ได้จากวิธีการของ Klems [10-15] และในการประเมินถึงผลของการแผ่รังสีคลื่นยาวนั้นจำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการพัฒนาวิธีการหาค่าอุณหภูมิของมู่ลี่เลย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้พัฒนาวิธีการเพื่อใช้ในการประเมินค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะอยู่ในหัวข้อย่อยที่ 3.4 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิของมู่ลี่

เนื่องจากความรู้พื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษามีค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงได้แบ่งความรู้ทั้งหมดออกเป็นหัวข้อย่อยต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาดังนี้คือ

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจก

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิของมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน

### 3.1 วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

ความร้อนที่ส่งผ่านระบบกระจกเข้ามาในตัวอาคารนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ

#### 1. ส่วนของการนำ และพาความร้อน (thermal energy)

ในส่วนของการนำและพาความร้อนนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศภายนอก และอากาศภายใน

#### 2. ส่วนของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar energy)

ในส่วนนี้จะเกิดจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบทั้งกรณีของรังสีตรง และรังสีกระจาย โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารเนื่องจากระบบกระจกจะสามารถหาได้จาก

$$q = U \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) + (\text{SHGC}) \cdot I_{\text{total}} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$q$	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบกระจก, $\text{W}/\text{m}^2$
	$U$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
	$T_{\text{out}}$	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, $^\circ\text{C}$
	$T_{\text{in}}$	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, $^\circ\text{C}$
	SHGC	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient
	$I_{\text{total}}$	คือ ค่า total irradiation ที่ตกกระทบระบบกระจก, $\text{W}/\text{m}^2$

โดยในการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลกนั้น รังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะเกิดการชนกับอนุภาค และฝุ่นผงต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ และทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีส่วนนี้ในทุก ๆ ทิศทาง และจากนั้นจึงส่งผ่านมาสู่พื้นผิวของโลกในรูปของรังสีกระจาย ดังนั้นปริมาณรังสีทั้งหมด

ที่ผิวโลกนั้นจะประกอบไปรังสีสองส่วนนั่นคือ รังสีแสงอาทิตย์แบบตรง (direct radiation) และ รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse radiation) ดังสมการที่ 3.2

$$I_{\text{total}} = I_{\text{dir}} \cdot \cos \theta + I_{\text{diff}} \quad (3.2)$$

เมื่อ	$I_{\text{dir}}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง, $\text{W/m}^2$
	$I_{\text{diff}}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย, $\text{W/m}^2$
	$\theta$	คือ มุมตกกระทบของรังสี, degree

ดังนั้นสมการที่ 3.1 อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$q = U \cdot (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) + (\text{SHGC}_d) \cdot I_{\text{dir}} \cdot \cos \theta + (\text{SHGC}_D) \cdot I_{\text{diff}} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\text{SHGC}_d$	คือ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง
	$\text{SHGC}_D$	คือ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย

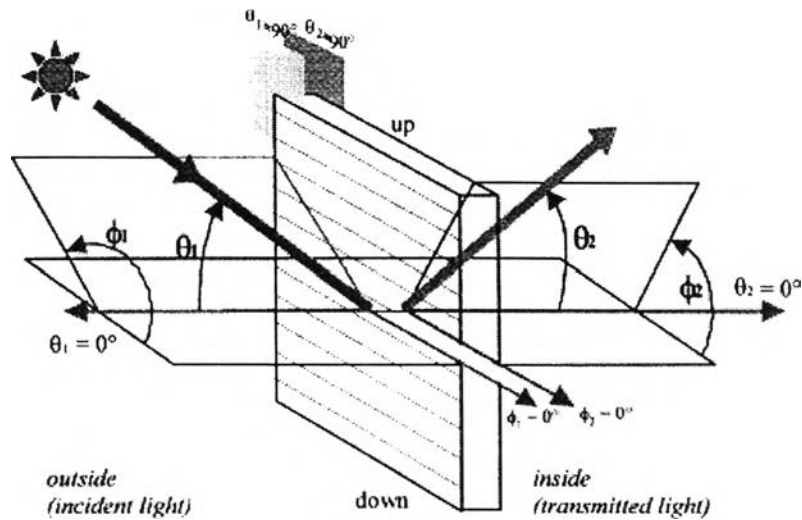
### 3.1.1 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของกระจกติดมู่ลี่

เมื่อมีรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ จะมีรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนที่ตกกระทบและส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างเข้ามาในโดยตรง และบางส่วนที่จะถูกดูดกลืนเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจก และที่ตัวมู่ลี่ และพลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้เนี่ยเองจะทำให้ตัวกระจก และมู่ลี่นั้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเมื่อตัวกระจก และมู่ลี่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศในห้อง และอุณหภูมิของอากาศภายนอกก็จะทำให้เกิดถ่ายเทความร้อนออกมาโดยการนำความร้อน พาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว เข้ามาทั้งในอาคาร และออกจากอาคาร โดยปริมาณความร้อนดังกล่าวจะเรียกว่า inward-flowing fraction และ outward-flowing fraction ตามลำดับ ดังนั้นค่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารจะต้องรวมรังสีที่ส่งผ่านโดยตรง และความร้อนที่ไหลเข้าสู่อาคาร ดังสมการที่ 3.4

$$\text{SHGC}_d(\theta, \phi) = T^{\text{H}}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_i^f(\theta, \phi) \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\text{SHGC}_d$	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกติดมู่ลี่
	$T^{\text{H}}$	คือ directional-hemispherical transmittance

- $A_i^f$  คือ directional front absorptance ของ layer  $i$   
 $N_i$  คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสี  
 $\phi$  คือ มุม azimuth  
 $M$  คือ จำนวนของชั้นของระบบกระจก



รูปที่ 3.1 แสดงนิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า SHGC นั้นจะประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ

1. ตัวแปรทาง optic

ซึ่งได้แก่ค่า  $T^H$  และ  $A_i^f$  และสามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix Layer Calculation ที่เสนอโดย Klems [10-13] โดยที่ค่าคุณสมบัติทาง optic นี้จะมีค่าคงที่ไม่แปรตามตัวแปรทางความร้อน เช่น อุณหภูมิของ layer

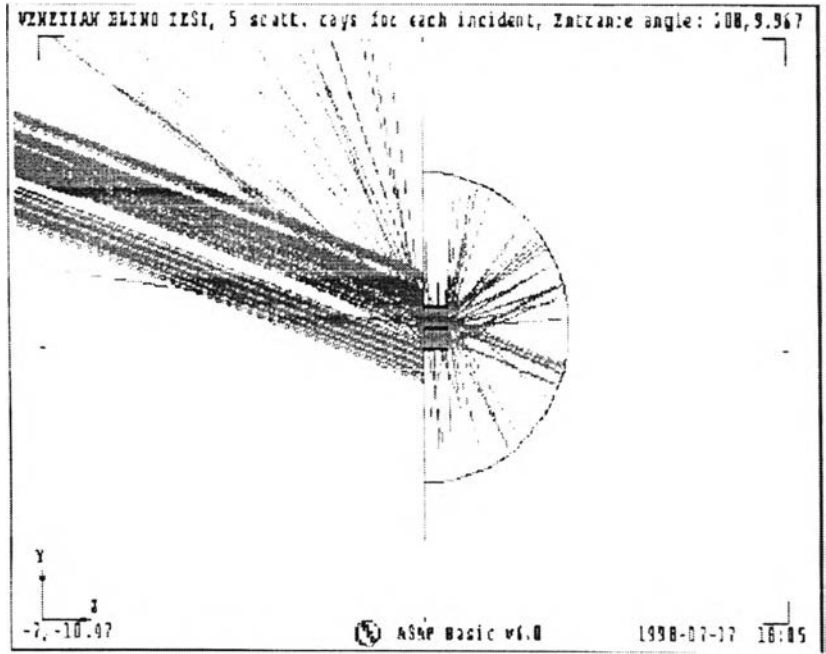
2. ตัวแปรทางความร้อน

ซึ่งได้แก่ค่า  $N_i$  ของ layer ต่าง ๆ นั้นเอง ค่าตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาพความร้อน (อุณหภูมิอากาศและความเร็วลม) และการแผ่รังสีคลื่นยาว (อุณหภูมิของชั้นกระจก และมู่ลี่)

### 3.1.1.1 การหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบกระจกติดมู่ลี่

ในกรณีที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนระบบกระจกติดมู่ลี่ที่มุมตกกระทบอันหนึ่งนั้น รังสีแสงอาทิตย์ที่เข้ามาในอาคารนั้นจะเข้ามาในทิศทางที่หลากหลาย อันเป็นผลมาจากการลักษณะของ

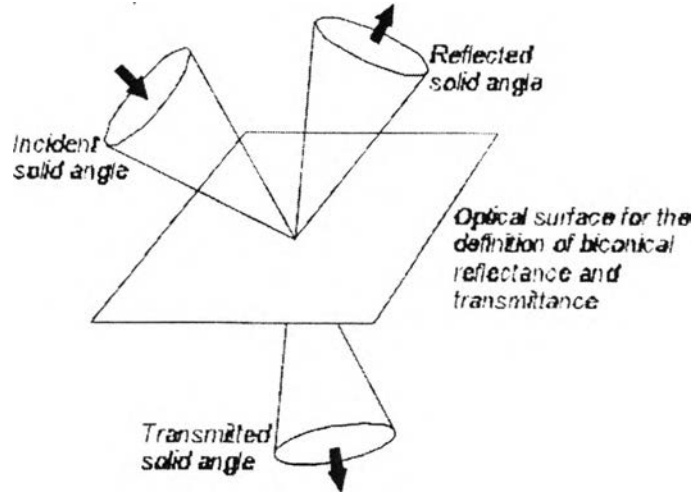
มู่ลี่เองที่มีลักษณะเป็นใบซ้อน ๆ กัน และการสะท้อนระหว่างใบมู่ลี่ก็ยังคงเป็นผลให้ทิศทางของรังสีที่ออกนั้นมีค่าที่เปลี่ยนไปอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.2



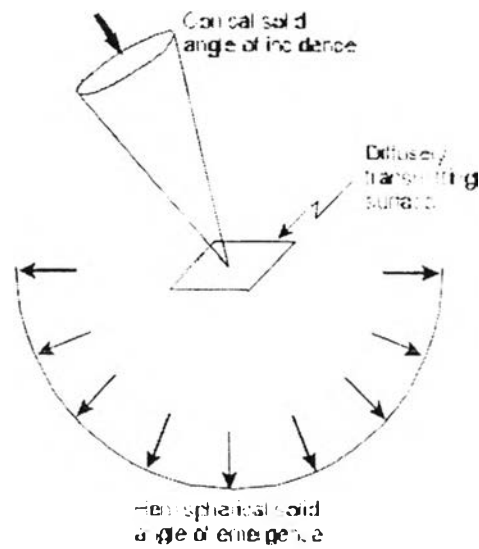
รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางของรังสีที่ส่งผ่านมู่ลี่ [31]

ซึ่งจากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการอธิบายค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่อย่างละเอียดนั้น จำเป็นที่จะต้องอธิบายโดยผ่านการระบุทิศทางเข้า และทิศทางออกของรังสีทั้งหมด และค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการอธิบายนี้จะถูกเรียกว่าเป็นฟังก์ชันการกระจายตัวแบบสองทิศทาง (Bidirectional distribution function)

แต่อย่างไรก็ตามในการประเมินค่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารนั้นอาจจะไม่จำเป็นที่จะต้องบอกลงไปโดยละเอียดว่ามีรังสีเข้ามาในอาคารที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นปริมาณเท่าใดบ้าง แต่อาจจะบอกเป็นค่าโดยรวมโดยเฉลี่ยก็เพียงพอ ดังนั้นจึงได้มีการนิยามค่าคุณสมบัติขึ้นมาอีกหนึ่งที่เรียกว่า directional-hemispherical properties ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่รวบรวมรังสีขาออกเข้าด้วยกัน และในการระบุทิศทางนั้นก็จะเป็นการระบุที่ทิศทางขาเข้าเท่านั้น รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงนิยามของ คุณสมบัติทั้งสองชนิด



รูปที่ 3.3 แสดงนิยามของค่าคุณสมบัติแบบ bi-directional properties [31]



รูปที่ 3.4 แสดงนิยามของค่าคุณสมบัติแบบ directional-hemispherical properties [31]

ในสมการที่ 3.4 นั้นค่าคุณสมบัติทาง optic ที่ใช้ในการคำนวณค่า SHGC นั้นเป็นค่าคุณสมบัติชนิด directional-hemispherical properties ที่ได้จากการอินทิเกรตรังสีที่เข้ามาในอาคารเรียบร้อยแล้ว และจะมีค่าที่แปรตามทิศทางตกกระทบของรังสีเท่านั้น และค่าคุณสมบัติ directional-hemispherical properties เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติแบบสองทิศทาง (bi-directional properties) ดังแสดงในสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$T^{IH} = u^T \cdot \Lambda \cdot T_{M\{i,M\}}^I \tag{3.5}$$

$$R^{FH} = u^T \cdot \Lambda \cdot R_{M,\{i,M\}}^f \quad (3.6)$$

โดยที่

$$u^T = \{1 \quad 1 \quad \dots \quad 1\} \quad (3.7)$$

และ

$$\Lambda_i = \begin{pmatrix} \Delta\Omega_i^1 \cos(\theta_i^1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta\Omega_i^2 \cos(\theta_i^2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Delta\Omega_i^N \cos(\theta_i^N) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

- เมื่อ  $T^{FH}$  คือ directional-hemispherical front transmittance  
 $R^{FH}$  คือ directional-hemispherical front reflectance  
 $T_{M,\{i,M\}}^f$  คือ bi-directional front transmittance  
 $R_{M,\{i,M\}}^f$  คือ bi-directional front reflectance  
 $u^T$  คือ auxiliary row vector  
 $\Lambda$  คือ propagation matrix  
 $\Delta\Omega$  คือ มุม solid angle

โดยที่ค่า  $T_{M,\{i,M\}}^f$  ซึ่งเป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของระบบจะสามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix layer Calculation ที่เสนอโดย Klems [10-12] ดังสมการที่ 3.9 ถึง 3.12

$$T_{M,\{i,M\}}^f = T_M^f \cdot \left( I - \Lambda \cdot R_{M-1,\{i,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{i,M-1\}}^f \quad (3.9)$$

$$R_{M,\{i,M\}}^f = R_{M-1,\{i,M-1\}}^f + \left[ \begin{array}{l} T_{M-1,\{i,M-1\}}^b \cdot \left( I - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{i,M-1\}}^b \right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{i,M-1\}}^f \end{array} \right] \quad (3.10)$$

$$T_{M,\{i,M\}}^b = T_{M-1,\{i,M-1\}}^b \cdot \left( I - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{i,M-1\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_M^b \quad (3.11)$$

$$R_{M,\{i,M\}}^b = R_M^b + \left[ \begin{array}{l} T_M^f \cdot \left( I - \Lambda \cdot R_{M-1,\{i,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f \right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{i,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_M^b \end{array} \right] \quad (3.12)$$

- เมื่อ  $T_{M,\{i,M\}}^f$  คือ bi-directional front transmittance matrix ของระบบ M ชั้น  
 $T_{M,\{i,M\}}^b$  คือ bi-directional back transmittance matrix ของระบบ M ชั้น  
 $R_{M,\{i,M\}}^f$  คือ bi-directional front reflectance matrix ของระบบ M ชั้น

- $R_{M,\{i,M\}}^b$  คือ bi-directional back reflectance matrix ของระบบ M ชั้น  
 $T_i^f$  คือ bi-directional front transmittance matrix ของ layer i  
 $T_i^b$  คือ bi-directional back transmittance matrix ของ layer i  
 $R_i^f$  คือ bi-directional front reflectance matrix ของ layer i  
 $R_i^b$  คือ bi-directional back reflectance matrix ของ layer i

และค่าคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่อยู่ในระบบกระจก M ชั้นได้จาก

$$A_{iM}^f = \left[ A_i^f \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{i,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{i,M\}}^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{i-1,\{i,i-1\}}^f \right] + \left[ A_i^b \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{i,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot T_{i,\{i,i\}}^f \right] \quad (3.13)$$

$$A_{iM}^b = \left[ A_i^b \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i-1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{i,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-i,\{i+1,M\}}^b \right] + \left[ A_i^f \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{i,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{i,M\}}^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot R_{i-1,\{i,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_{M-i+1,\{i,M\}}^b \right] \quad (3.14)$$

- เมื่อ  $A_{iM}^f$  คือ directional front absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น  
 $A_{iM}^b$  คือ directional back absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น  
 $A_i^f$  คือ directional front absorptance matrix ของ layer i  
 $A_i^b$  คือ directional back absorptance matrix ของ layer i

### 3.1.1.2 การหาค่า inward-flowing fraction ของระบบกระจกติดมู่ลี่

การหาค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่นั้น ถ้าพิจารณาให้มู่ลี่นั้น เป็นเสมือน effective layer อันหนึ่งที่มาประกอบเข้ากับระบบกระจก และพิจารณาลักษณะการพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวที่เหมาะสมจะทำให้ในการหาค่า inward-flowing fraction ของกระจกติดมู่ลี่นั้นสามารถที่จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับการหาในกรณีที่เป็นระบบกระจกล้วน ๆ ได้ และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

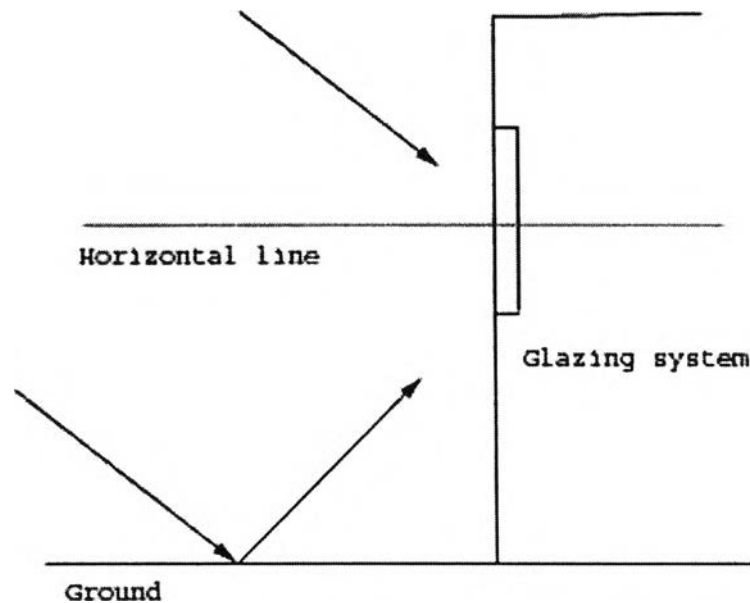
$$N_i = \frac{\sum_{k=1}^i R_k}{R_{tot}} \quad (3.15)$$

- เมื่อ  $R_k$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของแต่ละผิวกระจก,  $m^2/W$   
 $R_{tot}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมทั้งหมดของระบบกระจก,  $m^2/W$



### 3.1.2 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีกระจายแสงอาทิตย์ของกระจกติดมู่ลี่

เนื่องจากระบบกระจกที่มีการติดมู่ลี่นั้นมีลักษณะการส่งผ่านรังสีที่ไม่สมมาตรในช่วงมุม ตกกระทบเหนือแนวระดับ และในช่วงมุมตกกระทบต่ำกว่าแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงรังสีที่ตกกระทบในแต่ละมุมตกกระทบ

ดังนั้นในการหาค่า SHGC ของรังสีกระจายจึงจะต้องแบ่งการหาค่า diffuse SHGC ออกเป็น 2 ส่วน นั่นคือ ส่วนบนที่เป็นการกระเจิงของรังสีจากท้องฟ้า (หรือส่วนครึ่งบน, upper) และส่วนล่างที่เป็นการสะท้อนของรังสีจากพื้นดิน (หรือส่วนครึ่งล่าง, lower) จากนั้นจึงค่อยรวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน โดยการรวมค่า diffuse SHGC สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$SHGC_D = \frac{SHGC_{DS} + \xi \cdot SHGC_{DG}}{1 + \xi} \quad (3.16)$$

โดยที่

$$\xi = \frac{2 \cdot \rho \cdot I_{total}}{I_{diff}} \quad (3.17)$$

- เมื่อ
- $SHGC_D$  คือ diffuse SHGC
  - $SHGC_{DS}$  คือ sky-diffuse SHGC
  - $SHGC_{DG}$  คือ ground-diffuse SHGC

- $\xi$  คือ พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับสภาวะของท้องฟ้า และพื้นดิน
- $\rho$  คือ effective ground reflectance
- $I_{total}$  คือ total global solar intensity,  $W/m^2$
- $I_{diff}$  คือ diffuse solar radiation,  $W/m^2$

โดยที่ค่า  $SHGC_{DS}$  และ  $SHGC_{DG}$  นั้นสามารถหาค่าได้จากการอินทิเกรตค่า  $SHGC$  ที่ได้จากวิธี matrix layer calculation ในช่วง  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ,  $0^\circ < \phi < 180^\circ$  และในช่วง  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ,  $180^\circ < \phi < 360^\circ$  ตามลำดับ โดยการอินทิเกรตทำได้โดยใช้ค่า weighting function ดังสมการที่ 3.22 และ 3.23

$$SHGC_{DS} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 0^\circ < \phi < 180^\circ \quad (3.18)$$

$$SHGC_{DG} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 180^\circ < \phi < 360^\circ \quad (3.19)$$

- เมื่อ  $m$  คือ จำนวนมุมตกกระทบที่พิจารณาในช่วง  $0^\circ < \theta < 90^\circ$
- $n$  คือ จำนวนมุม azimuth ที่พิจารณา

โดยค่า weighting function มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดในการคำนวณหาค่า weighting function สามารถดูได้จากภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.1 ค่า angular weighting function

$\theta$	$\phi$	Angular weighting, $w(\theta_i, \phi_i)$
0	0,30,60,...,360	0.00028
15	0,30,60,...,360	0.02156
30	0,30,60,...,360	0.03736
45	0,30,60,...,360	0.04314
60	0,30,60,...,360	0.03736
75	0,30,60,...,360	0.02156
90	0,30,60,...,360	0.00028

สำหรับค่าการสะท้อนแสงอาทิตย์ของพื้นแต่ละชนิดก็จะมีค่าที่แตกต่างกันโดยสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า effective ground reflectance,  $\rho$  ของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ [4]

พื้นผิว	มุมตกกระทบ					
	20	30	40	50	60	70
คอนกรีตใหม่	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
คอนกรีตเก่า	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.25
หญ้า	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31
หิน	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ทางลูกรัง	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
ยางมะตอย	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12

### 3.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบกระจกติดมู่ลี่

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม,  $U$  จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แทนเฉพาะส่วนของความร้อนที่เข้าสู่อาคารเนื่องจากความแตกต่างของค่าอุณหภูมิภายนอก และภายใน โดยการกำหนดให้รังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบระบบกระจกนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนวิธีการคำนวณค่า  $U$  นั้นจะเป็นการคำนวณไปพร้อม ๆ กันกับการหาค่าอุณหภูมิของมู่ลี่ ที่พิจารณาการพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวในแต่ละส่วนของกระจก/มู่ลี่ ซึ่งการคำนวณดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบกระจกติดมู่ลี่ ( $R_{tot}$ ) และสามารถหาค่าการส่งผ่านความร้อนรวมของระบบกระจก/มู่ลี่ ได้จากความสัมพันธ์

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (3.20)$$

โดยรายละเอียดของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นจะแสดงในรายละเอียดในหัวข้อย่อย 3.4 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิของมู่ลี่

## 3.2 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก

### 3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)

สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบนั้น กระจกจะมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และจะมีค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจกที่ผิวด้านหน้า และผิวด้านหลังที่เท่ากัน โดยในการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะสามารถหาค่าได้จากขั้นตอนที่เสนอโดย Furler [28]

โดยทั่วไปทางผู้ผลิตมักจะให้ค่า transmittance และ ค่า reflectance ของกระจกที่มุมศูนย์ องศาที่ได้จากการทดลองของผู้ผลิต โดยจากค่า transmittance และ reflectance ที่มุมตกกระทบศูนย์ องศาเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของกระจกเช่น ค่าการหักเหของแสง, refraction coefficient, extinction coefficient และค่า absorption coefficient เป็นต้น และสามารถนำไปใช้ในการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ที่มุมตกกระทบอื่นได้

โดยที่ค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า reflectivity และค่า reflectivity ที่มุมตกกระทบศูนย์องศาจะมีความสัมพันธ์กับค่า transmittance และ reflectance ที่มุมศูนย์องศา ดังแสดงสมการที่ 3.21 และ 3.22 [28]

$$\rho_\lambda(0) = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_\lambda(0)) \cdot R_\lambda(0)}}{2(2 - R_\lambda(0))} \quad (3.21)$$

โดย

$$\beta = T_\lambda(0)^2 - R_\lambda(0)^2 + 2R_\lambda(0) + 1 \quad (3.22)$$

เมื่อ  $\rho_\lambda$  คือ ค่า reflectivity ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$

$T_\lambda(0)$  คือ ค่า transmittance ที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น  $\lambda$

$R_\lambda(0)$  คือ ค่า reflectance ที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น  $\lambda$

และจากค่า reflectivity ที่มุมตกกระทบศูนย์องศาจะช่วยให้สามารถหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ได้ ดังนี้

ค่า refractive index

$$n_\lambda = \frac{1 + \sqrt{\rho_\lambda(0)}}{1 - \sqrt{\rho_\lambda(0)}} \quad (3.23)$$

ค่า extinction coefficient

$$k_\lambda = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln\left(\frac{R_\lambda(0) - \rho_\lambda(0)}{\rho_\lambda(0)T_\lambda(0)}\right) \quad (3.24)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น, nm

$d$  คือ ความหนาของกระจก, mm

ค่า absorption coefficient

$$\alpha_\lambda = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} \quad (3.25)$$

ในการหาค่าคุณสมบัติที่มุมตกกระทบอื่นก็สามารถหาค่าได้จากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ โดยในกรณีที่มุมตกกระทบอื่นที่ไม่ใช่ศูนย์องศาจะเกิดการหักเหของแสงตาม Snell's law

$$\zeta = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{n_\lambda}\right) \quad (3.26)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือ มุมหักเหของแสง, degree  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบ, degree

และที่มุมตกกระทบนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนที่ผิว reflectivity ที่เปลี่ยนไปด้วย โดยสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{n_\lambda \cos \theta - \cos \zeta}{n_\lambda \cos \theta + \cos \zeta} \right)^2 + \left( \frac{n_\lambda \cos \zeta - \cos \theta}{n_\lambda \cos \zeta + \cos \theta} \right)^2 \right) \quad (3.27)$$

และจะสามารถหาค่า transmittivity ได้จาก

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (3.28)$$

จากนั้นจะทำให้สามารถหาค่าการส่งผ่าน (transmittance) และค่าการสะท้อน (reflectance) ที่มุมตกกระทบใด ๆ ที่รวมผลของการสะท้อนในเนื้อกระจกแล้วได้จากสมการที่ 3.29 และ 3.30

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 e^{(-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 e^{(-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}} \quad (3.29)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot \left( 1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ  $T_\lambda$  คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  และความยาวคลื่น  $\lambda$   
 $R_\lambda$  คือ ค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  และความยาวคลื่น  $\lambda$   
 $\tau_\lambda$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmissivity) มุมตกกระทบ  $\theta$   
 $\rho_\lambda$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflectivity) มุมตกกระทบ  $\theta$

### 3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)

สำหรับกระจกชนิดเคลือบค่าคุณสมบัติทาง optic เหล่านี้จะมีค่าที่ซับซ้อนมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการสะท้อนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ และในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะพิจารณาตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ที่ได้เสนอโดย Finlayson และคณะ [1] โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ

1. กรณีที่ค่า transmittance มีค่ามากกว่า 0.645,  $T(0) > 0.645$  จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{clr}(\theta) \quad (3.31)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{clr}(\theta)) + \bar{\rho}_{clr}(\theta) \quad (3.32)$$

2. กรณีที่ค่า transmittance มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645,  $T(0) \leq 0.645$  จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{bnz}(\theta) \quad (3.33)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{bnz}(\theta)) + \bar{\rho}_{bnz}(\theta) \quad (3.34)$$

เมื่อ

$$\bar{\tau}_x(\theta) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cos(\theta) + \bar{\tau}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\tau}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\tau}_4 \cos^4(\theta) \quad (3.35)$$

$$\bar{\rho}_x(\theta) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cos(\theta) + \bar{\rho}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\rho}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\rho}_4 \cos^4(\theta) - \bar{\tau}(\theta) \quad (3.36)$$

และ  $x$  เป็นตัวห้อยที่เป็น clr หรือ bnz

โดยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ นั้นจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของกระจกชนิดเคลือบ [1]

	0	1	2	3	4
$\bar{\tau}_{clr}$	-0.0015	3.355	-3.840	1.460	0.0288
$\bar{\rho}_{clr}$	0.999	-0.563	2.043	-2.532	1.054
$\bar{\tau}_{bnz}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599
$\bar{\rho}_{bnz}$	0.997	-1.868	6.513	-7.862	3.225

### 3.3 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

#### 3.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่

ในปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าคุณสมบัติในส่วนนี้ของมู่ลี่นั้นได้มีการนำเสนอในหลาย ๆ รูปแบบจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [3,25] โดยแต่ละแบบจำลองนั้นก็มีการหลักการการวิเคราะห์ที่เหมือน ๆ กันคือ พิจารณาจากลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่เป็นหลัก และค่าคุณสมบัติที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่(ความกว้างของใบ ระยะเวลาห่างระหว่างใบ) และค่าการสะท้อนรังสีที่ผิวมู่ลี่ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบโดย Chantrasrisalai และคณะ [26] ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองต่าง ๆ เหล่านี้สามารถทำนายค่าคุณสมบัติได้ทั้งสอดคล้องกันในส่วนของการแผ่รังสีโดยตรงที่ผ่านระหว่างช่องห่างของมู่ลี่ (direct-direct transmittance) และจะทำนายค่าคุณสมบัติทาง optic ได้แตกต่างกันในกรณีของการส่งผ่านที่ผ่านการสะท้อนจากใบมู่ลี่มาแล้ว (diffuse-direct transmittance) นอกจากนี้เมื่อตัวแปรบางส่วนเปลี่ยนค่าไป เช่น ความหนาของใบมู่ลี่ ค่าการสะท้อนของมู่ลี่ เป็นต้น ความแตกต่างของแต่ละแบบจำลองก็จะมีผลมากขึ้นด้วย และยังไม่มีการยอมรับในปัจจุบันว่าแบบจำลองไหนเหมาะสมที่จะใช้เพื่อทำนายค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อใช้ในการประเมินความร้อน และทำนายการใช้พลังงานของอาคาร

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดย Klems [24] เป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับข้อมูลการทดลองของ Klems โดยจะแยกพิจารณาทีละตัวแปร กล่าวคือ จะทำการแปรค่ามุมตกกระทบ โดยคงค่าที่มุม azimuth ต่าง ๆ กัน เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่แปรตามมุมตกกระทบ จากนั้นจึงแปรค่ามุม azimuth โดยคงค่า มุมตกกระทบ เพื่อให้ได้การเปลี่ยนแปลงรวมทั้งหมด โดยจากการพล็อตค่าคุณสมบัติทาง optic ต่าง ๆ เหล่านี้เทียบกับมุมตกกระทบ และมุม azimuth ของรังสี (รายละเอียดจะแสดงในภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่ที่แปรตามมุมตกกระทบ สามารถแทนได้ด้วยสมการแบบสมการพหุนามอันดับที่ 4 และค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่ที่แปรตามมุม azimuth สามารถแทนได้ด้วยสมการแบบสมการพหุนามอันดับที่ 2 นั่นคือ

$$T^{Hh} = f_1(\theta) \cdot f_2(\phi) \quad (3.37)$$

$$T^{Hh} = (c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 + c_4\theta^4) \cdot (d_0 + d_1\phi + d_2\phi^2) \quad (3.38)$$

และเมื่อคูณกระจายเทอมในสมการที่ 3.38 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

## ค่าการส่งผ่านรังสี

$$T^H = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + a_3\theta + a_4\theta\phi + a_5\theta\phi^2 + a_6\theta^2 + a_7\theta^2\phi + a_8\theta^2\phi^2 + a_9\theta^3 + a_{10}\theta^3\phi + a_{11}\theta^3\phi^2 + a_{12}\theta^4 + a_{13}\theta^4\phi + a_{14}\theta^4\phi^2 \quad (3.39)$$

และในทำนองเดียวกันจะได้ค่าการสะท้อนรังสี คือ

$$R^H = b_0 + b_1\phi + b_2\phi^2 + b_3\theta + b_4\theta\phi + b_5\theta\phi^2 + b_6\theta^2 + b_7\theta^2\phi + b_8\theta^2\phi^2 + b_9\theta^3 + b_{10}\theta^3\phi + b_{11}\theta^3\phi^2 + b_{12}\theta^4 + b_{13}\theta^4\phi + b_{14}\theta^4\phi^2 \quad (3.40)$$

เมื่อ  $a_i, b_i$  คือค่าคงที่ซึ่งได้จากการคูณกันในเทอมต่าง ๆ

## ค่าการดูดกลืนรังสี

$$A^H = 1 - T^H - R^H \quad (3.41)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ นั้นจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมูลี่

สัมประสิทธิ์	$0^\circ < \phi < 180^\circ$		$180^\circ < \phi < 360^\circ$	
	$a_n$	$b_n$	$a_n$	$b_n$
0	0.4269	0.3378	0.5018	0.3204
1	$0.4985 \times 10^{-3}$	$-0.5813 \times 10^{-3}$	$-0.2708 \times 10^{-3}$	$+0.4653 \times 10^{-4}$
2	$-0.6354 \times 10^{-5}$	$+0.4785 \times 10^{-5}$	-	-
3	$-0.3448 \times 10^{-2}$	$-0.2355 \times 10^{-1}$	$-0.8508 \times 10^{-1}$	$-0.2046 \times 10^{-1}$
4	$-0.5145 \times 10^{-3}$	$+0.3656 \times 10^{-3}$	$+0.3379 \times 10^{-3}$	$+0.2266 \times 10^{-4}$
5	$+0.3998 \times 10^{-5}$	$-0.1594 \times 10^{-5}$	-	-
6	$+0.4439 \times 10^{-3}$	$+0.1583 \times 10^{-2}$	$+0.2358 \times 10^{-2}$	$+0.1379 \times 10^{-2}$
7	$+0.1243 \times 10^{-5}$	$-0.2113 \times 10^{-4}$	$-0.3848 \times 10^{-5}$	$-0.5151 \times 10^{-6}$
8	$-0.2436 \times 10^{-7}$	$+0.9037 \times 10^{-7}$	-	-
9	$-0.1005 \times 10^{-4}$	$-0.3421 \times 10^{-4}$	$-0.1546 \times 10^{-4}$	$-0.3060 \times 10^{-4}$
10	$+0.1179 \times 10^{-6}$	$+0.4942 \times 10^{-6}$	$-0.7402 \times 10^{-7}$	$+0.2974 \times 10^{-8}$
11	$-0.4911 \times 10^{-9}$	$-0.2404 \times 10^{-8}$	-	-
12	$+0.5484 \times 10^{-7}$	$+0.2268 \times 10^{-6}$	$-0.1185 \times 10^{-7}$	$+0.2078 \times 10^{-6}$
13	$-0.7500 \times 10^{-9}$	$-0.3376 \times 10^{-8}$	$+0.8473 \times 10^{-9}$	$+0.6115 \times 10^{-11}$
14	$+0.2925 \times 10^{-11}$	$+0.1772 \times 10^{-10}$	-	-



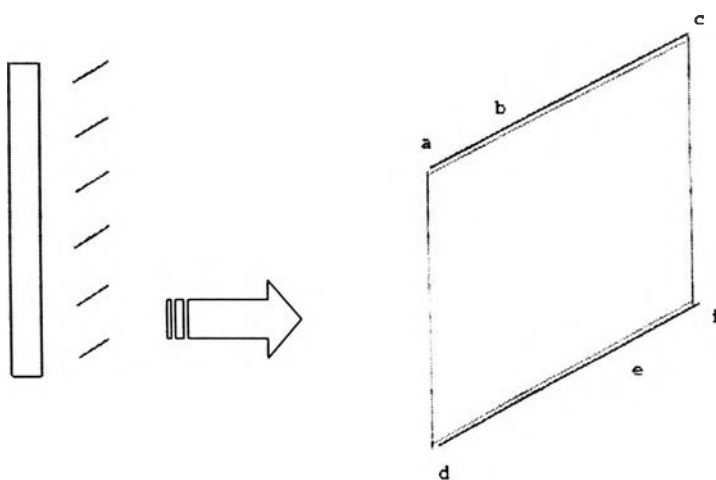
### 3.3.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นยาวของมู่ลี่

เนื่องจากมู่ลี่นั้นมีลักษณะเป็นใบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ และการแผ่รังสีคลื่นยาวถึงแม้ว่าจะมีความถี่ต่ำก็สามารถส่งผ่านได้โดยผ่านช่องระหว่างใบเหล่านี้ ซึ่งแตกต่างกับกรณีของกระจกที่เป็นเนื้อกระจก และการแผ่รังสีคลื่นยาวไม่สามารถที่จะส่งผ่านได้ นอกจากนั้นค่าคุณสมบัติคลื่นยาวของมู่ลี่ยังคงแปรตามค่าการสะท้อนที่ผิวมู่ลี่ และมุมเอียงของมู่ลี่อีกด้วย

ดังนั้นเพื่อเป็นการคำนวณหาคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อให้เป็นระนาบเสมือนประกอบเข้าไปกับระบบกระจก จึงได้ทำการจำลองให้มู่ลี่นั้นประกอบไปด้วยพื้นผิวปิดหลาย ๆ ผิว ที่วางซ้อน ๆ กันอยู่ โดยแต่ละพื้นผิวปิดจะประกอบไปด้วยมู่ลี่สองใบ และพื้นผิวที่แทนอากาศด้านหน้า และด้านหลัง โดยจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ

- ทุก ๆ พื้นผิวปิดนั้น มีลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมือนกัน ดังนั้น การพิจารณาพื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยสามารถใช้เป็นตัวแทนของมู่ลี่ทั้งหมดได้
- ในแต่ละพื้นผิวปิดนั้น พื้นผิวต่าง ๆ นั้นที่ประกอบกันเป็นพื้นผิวปิด มีค่าคุณสมบัติการสะท้อน การเปล่งรังสีคลื่นยาว และค่าอุณหภูมิที่คงที่ตลอดพื้นผิว
- มู่ลี่มีความยาวมากกว่าความกว้างมู่ลี่มาก และเกิดการแลกเปลี่ยนรังสีในแบบ 2 มิติ
- แต่ละพื้นผิวในพื้นผิวปิดมีลักษณะเป็นแบบ flat plate

จากสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และทำวิเคราะห์แบบผิวปิดโดยให้พื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว [27] ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการจำลองพื้นผิวปิด 1 หน่วย เป็นตัวแทนของมู่ลี่ทั้งหมด โดยแต่ละพื้นผิวปิดประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว

โดยมีพื้นที่ผิวต่าง ๆ ดังนี้ คือ

พื้นผิวที่ 1 คือ พื้นที่ ab

พื้นผิวที่ 2 คือ พื้นที่ bc

พื้นผิวที่ 3 คือ พื้นที่ de

พื้นผิวที่ 4 คือ พื้นที่ ef

พื้นผิวที่ 5 คือ พื้นที่ ad

พื้นผิวที่ 6 คือ พื้นที่ cf

ในการวิเคราะห์นั้นพลังงานความร้อนที่พื้นผิวใด ๆ นั้นจะมีค่าเท่ากับการแลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นผิวอื่น ๆ ภายในพื้นผิวปิดดังกล่าว

$$G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j \quad (3.42)$$

โดยที่  $G_i$  คือ ค่ารังสีที่ตกกระทบพื้นผิว  $i$ ,  $W/m^2$

$J_i$  คือ radiosity ที่พื้นผิว  $i$ ,  $W/m^2$

$F_{ij}$  คือ view factor

ค่า radiosity (หรือรังสีรวมที่ออกจากพื้นผิว) ของไข่มุกี่จะมีค่าเท่ากับ

$$J_i = \epsilon_i \sigma \theta_i^4 + (1 - \epsilon_i) G_i \quad (3.43)$$

ส่วนค่า view factors นั้นสามารถหาค่าได้โดยวิธี Hottel's crossed string method

$$F_{ij} = \frac{\sum XS_{ij} - \sum US_{ij}}{2L_i} \quad (3.44)$$

เมื่อ  $\sum XS_{ij}$  คือ ผลรวมของ crossed string ระหว่างผิว  $i$  และ  $j$

$\sum US_{ij}$  คือ ผลรวมของ uncrossed string ระหว่างผิว  $i$  และ  $j$

$L_i$  คือ ความยาวของพื้นผิว  $i$

โดยที่จากแบบจำลองผิวปิดนี้จะแสดงถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถ่ายเทกันในพื้นที่ผิวปิดนั่นเอง โดยที่พื้นผิว ad และ cf นั้นจะแทนบริเวณช่องเปิดด้านหน้า และด้านหลังมุกี่ที่รังสีสามารถส่งผ่านได้ และสำหรับค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวสามารถพิจารณาได้จากการสมมติให้มีรังสีมาตกกระทบที่พื้นผิวปิดนั่นเอง และระยะต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาค่า view factor นั้นแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความยาวต่าง ๆ ในพื้นผิวปิด

ส่วนของความยาว	ความสัมพันธ์
ab	$w - ps$
ac	$w$
ad	$ps$
ae	$\sqrt{ps^2 + (de)^2 - 2 \cdot ps \cdot (de) \cdot \sin(\phi)}$
af	$\sqrt{ps^2 + w^2 - 2 \cdot ps \cdot w \cdot \sin(\phi)}$
bc	$ps$
bd	$\sqrt{ps^2 + (ab)^2 + 2 \cdot ps \cdot (ab) \cdot \sin(\phi)}$
be	$\sqrt{ps^2 + (2ps - w)^2 - 2 \cdot ps \cdot (2ps - w) \cdot \sin(\phi)}$
bf	$\sqrt{ps^2 + (bc)^2 - 2 \cdot ps \cdot (bc) \cdot \sin(\phi)}$
cd	$\sqrt{ps^2 + w^2 + 2 \cdot ps \cdot w \cdot \sin(\phi)}$
ce	$\sqrt{ps^2 + (ef)^2 + 2 \cdot ps \cdot (ef) \cdot \sin(\phi)}$
cf	$ps$
de	$ps$
df	$w$
ef	$w - ps$

### 3.3.2.1 การคำนวณหาค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวด้านหน้า และด้านหลัง

สามารถหาค่าได้จากนิยามว่าเป็นปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิวปิดต่อการเปล่งรังสีของตัว  
ไบมูตี ดังนั้นจะได้ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวด้านหน้า

$$\epsilon_f = \frac{G_5}{\sigma T^4} \quad (3.45)$$

และค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$\epsilon_b = \frac{G_6}{\sigma T^4} \quad (3.46)$$

3.3.2.2 การคำนวณหาค่าการส่งผ่านรังสี สะท้อนรังสี และการดูดกลืนรังสีคลื่นยาว  
ด้านหน้า

สามารถพิจารณาได้จากการสมมุติให้มีรังสีเข้าที่ด้านหน้าของพื้นผิวปิด จากนั้นสามารถหาค่าการส่งผ่านได้จาก อัตราส่วนของรังสีที่ส่งผ่านต่อรังสีที่ใส่ให้กับพื้นผิวปิด นั่นคือ

$$T^f = \frac{G_6}{G_{\text{front}}} \quad (3.47)$$

และค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวได้จาก อัตราส่วนของรังสีที่สะท้อนออกต่อรังสีที่ป้อนให้กับพื้นผิวนั่นคือ

$$R^f = \frac{G_5}{G_{\text{front}}} \quad (3.48)$$

ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวด้านหน้าสามารถหาค่าได้จากค่าการดูดกลืนรังสีของพื้นผิวที่ 1, 2, 3 และ 4 ต่อรังสีที่เข้ามาในพื้นผิวปิด ดังสมการ

$$A^f = \frac{\varepsilon_{\text{top}} (A_1 G_1 + A_2 G_2) + \varepsilon_{\text{bottom}} (A_3 G_3 + A_4 G_4)}{A_{\text{front}} G_{\text{front}}} \quad (3.49)$$

หรือถ้ากล่าวอีกนัยหนึ่ง การดูดกลืนรังสีก็จะเท่ากับรังสีที่เข้ามาตกกระทบพื้นผิวปิดลบด้วยรังสีที่ออกที่ผิว 5 และ 6 นั่นคือ

$$A^f A_{\text{front}} G_{\text{front}} = A_{\text{front}} G_{\text{front}} - A_5 G_5 - A_6 G_6 \quad (3.50)$$

หรือ

$$A^f = 1 - \frac{(G_5 + G_6)}{G_{\text{front}}} \quad (3.51)$$

### 3.3.2.3 การคำนวณหาค่าการส่งผ่านรังสี สะท้อนรังสี และดูดกลืนรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

สามารถหาค่าได้ในทำนองเดียวกัน ดังนั้นค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวด้านหลังจะหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$T^b = \frac{G_5}{G_{\text{back}}} \quad (3.52)$$

ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$R^b = \frac{G_6}{G_{\text{back}}} \quad (3.53)$$

ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวด้านหลังสามารถหาค่าได้ในทำนองเดียวกันกับค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้า โดยจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.54 และ 3.55

$$A^b = \frac{\epsilon_{\text{top}} (A_1 G_1 + A_2 G_2) + \epsilon_{\text{bottom}} (A_3 G_3 + A_4 G_4)}{A_6 G_{\text{back}}} \quad (3.54)$$

$$A^b = 1 - \frac{(G_5 + G_6)}{G_{\text{back}}} \quad (3.55)$$

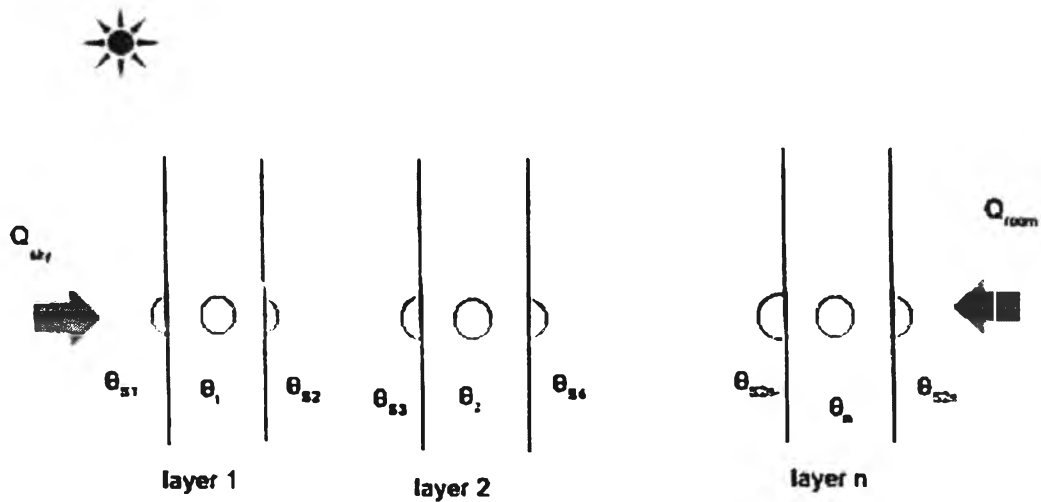
โดยค่าคุณสมบัติที่ได้จากสมการที่ 3.54 และ 3.55 จะต้องมีค่าที่เท่ากันเสมอ และผลรวมของค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นยาวนี้ต้องมีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ เงื่อนไขที่ค่าคุณสมบัติที่จะต้องเท่ากัน และผลรวมของค่าคุณสมบัติจะต้องเท่ากับหนึ่งนี้ สามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย

### 3.4 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิของมู่ลี่

การคำนวณหาค่าอุณหภูมิของมู่ลี่จะสามารถวิเคราะห์ได้โดยหลักของการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 มิติตามวิธีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Finlayson [1] แต่อย่างไรก็ตามวิธีของ Finlayson นั้นสามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับกระจกหลายชั้นเท่านั้น แต่สำหรับระบบกระจกติดมู่ลี่ วิธีการนี้จะไม่สามารถที่จะทำนายได้โดยตรง แต่จะต้องทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในหลาย ๆ ส่วน เพื่อให้ครอบคลุมถึงกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน

ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จึงจะทำการประยุกต์ใช้ในหลักการเดียวกัน แต่จะทำการปรับปรุงให้สามารถทำนายในกรณีของกระจกติดมู่ลี่ได้ด้วย โดยจะพิจารณาเหมือนกับว่ามู่ลี่เป็นเสมือน effective layer อันหนึ่ง ที่ประกอบเข้าไปกับระบบกระจกอยู่ภายในอาคาร จากนั้นจึงพิจารณาการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ระหว่างกระจกชั้นในกับมู่ลี่ การพาความร้อนโดยธรรมชาติจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ส่งผ่านระหว่างกระจกและมู่ลี่ จากนั้นจึงพิจารณาสมดุลพลังงานของระบบกระจกโดยรวม เพื่อที่จะนำไปสู่การประเมินค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละผิวกระจก ค่าอุณหภูมิของมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกที่มีการติดมู่ลี่ไว้เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน

โดยในการหาค่าอุณหภูมิ และค่าการกระจายตัวของของอุณหภูมิของแต่ละชั้นนั้น จะเริ่มจากการแบ่งให้ในแต่ละชั้นของกระจกและมู่ลี่นั้นประกอบไปด้วยจุดต่อ 3 จุด นั่นคือที่จุดกึ่งกลางกระจก และที่ผิวแต่ละด้านของกระจกดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

และจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ

1. สภาพอากาศมีค่าคงที่ (constant environmental conditions)
2. การถ่ายเทพลังงานนั้นอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state)

จากภายใต้สภาวะคงตัวนี้ จะทำให้ได้สมดุลความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจก และมู่ลี่นั้น จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$Q_i = \frac{(\theta_i - \theta_{i-1})}{R_i} + \frac{(\theta_i - \theta_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} = 0 \quad (3.56)$$

เมื่อ  $Q_i$  คือ net heat flux,  $W/m^2$   
 $\theta_i$  คือ อุณหภูมิของกลางชั้นกระจกที่ชั้นที่  $i$ ,  
 $R_i$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่ผิวกระจก,  $m^2 \cdot K/W$   
 $Q_{abs,i}$  คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้นกระจก,  $W/m^2$

โดยที่ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้นสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$Q_{abs,i} = A_i^{RH} \cdot I_{dir} \quad (3.57)$$

เมื่อ  $A_i^{RH}$  คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่มุมตกกระทบ 45 และมุม azimuth 90 องศา  
 $I_{dir}$  คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบระบบกระจกในแนวตั้งฉาก,  $W/m^2$

ค่าการดูดกลืนรังสีในแต่ละชั้นนั้นสามารถหาค่าได้จากค่าคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีจากวิธี Matrix layer calculation

จากนั้นถ้าพิจารณาในส่วนของการสมดุลของการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในระบบกระจกแต่ละชั้น จะได้ว่ารังสีที่ออกมาจากผิวกระจกแต่ละด้านนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ ส่วนที่แผ่รังสีออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของตัวกระจกเอง ส่วนของการสะท้อนของรังสีที่ด้านหน้า และ ส่วนจากการส่งผ่านเนื้อกระจกจากรังสีที่มาจากกระทบบทางด้านหลัง โดยสามารถหาได้ในแต่ละกรณีคือ กรณีของกระจกด้านหน้าชั้นนอกจะสามารถหาได้จาก

$$Q_{s1}^r = \sigma \epsilon_{s1} \theta_{s1}^4 + R_{1,1}^f Q_{sky}^r + T_{1,1} Q_{s3}^r \quad (3.58)$$

เมื่อ	$Q_{s1}^r$	คือ ค่ารังสีรวมที่ผิว, $W/m^2$
	$\sigma$	คือ ค่า Stefan-Bolzman constant, $W/m^2$
	$\epsilon_{s1}$	คือ ค่าการเปล่งรังสีของกระจก
	$R_{s1}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาว
	$T_{s2}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาว
	$Q_{sky}^r$	คือ รังสีภายนอก, $W/m^2$
	$Q_{s3}^r$	คือ รังสีรวมของผิวที่ 3, $W/m^2$

แต่อย่างไรก็ตามในการแผ่รังสีของกระจกนั้นจะเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาวที่เกิดจากอุณหภูมิของกระจกเอง ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มาก โดยถ้าพิจารณาจาก Wein displacement law [32]

$$\lambda_{max} T = 2897.6 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3.59)$$

และจาก

$$\lambda f = c \quad (3.60)$$

หรือ

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3.61)$$

เมื่อ	T	คือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีของพื้นผิวใด ๆ, K
	$\lambda$	คือ ค่าความยาวคลื่น, $\mu\text{m}$
	f	คือ ค่าความถี่ของการแผ่รังสี, 1/s

c คือ ค่าความเร็วของแสง, m/s

จากสมการที่ 3.59 และ 3.61 จะเห็นได้ว่าการแผ่รังสีของพื้นผิวใด ๆ นั้น ยิ่งอุณหภูมิของพื้นผิวมีค่าสูง ค่าความยาวคลื่นก็จะมีค่าน้อย และจากค่าความยาวคลื่นที่น้อย ก็หมายถึงการแผ่รังสีนั้นมีความถี่ที่สูง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของดวงอาทิตย์ที่มีการแผ่รังสีที่อุณหภูมิสูงมาก รังสีที่ออกมาจึงมีความยาวคลื่นที่สั้น และมีความถี่สูง (มีความสามารถในการส่งผ่านสูง และมักเรียกว่าเป็นการแผ่รังสีคลื่นสั้น) นั่นเอง ในทางกลับกัน ในกรณีของกระจกที่มีการดูดกลืนรังสีไว้ แล้วแผ่รังสีออกมาที่อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 300 กว่า K) รังสีที่ออกมาจึงมีความยาวคลื่นที่มาก และมีความถี่ต่ำ (มักเรียกว่าเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาว)

เนื่องจากเหตุผลนี้เองจึงเป็นผลให้การแผ่รังสีออกจากกระจกนั้นเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาว และมีความสามารถในการส่งผ่านต่ำด้วย จึงไม่สามารถส่งผ่านกระจกอีกบานที่ประกอประกอเป็นระบบกระจกได้ นั่นคือ กระจกในช่วงความยาวคลื่นสูง ๆ (infrared) จะประพฤติตัวเป็นเหมือนวัตถุทึบ (opaque) และจะเป็นผลให้ค่าการส่งผ่านในสมการที่ 3.58 นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับกระจก

อย่างไรก็ตามการแผ่รังสีคลื่นยาวนี้สามารถส่งผ่านมู่ลี่ได้ เนื่องจากมู่ลี่นั้นมีลักษณะที่เป็นใบซ้อน ๆ กัน รังสีคลื่นยาวจึงสามารถที่จะส่งผ่านได้โดยส่งผ่านระหว่างช่องของใบมู่ลี่นั่นเอง ดังนั้นที่ผิวมู่ลี่ความร้อนที่ออกมานั้นจะมีครบทั้งสามส่วน

และสำหรับกรณีระบบกระจกทั้งหมด  $n$  ชั้น และมู่ลี่ติดตั้งภายในจะได้รังสีที่ผิวตามสมการ 3.62 และ 3.63

$$Q_{s2n-1}^r = \epsilon_{s2n-1} \sigma \theta_{s2n-1}^4 + R_{s2n-1}^f Q_{s2n-2}^r + T_{s2n}^b Q_{room}^r \quad (3.62)$$

และ

$$Q_{s2n}^r = \epsilon_{s2n} \sigma \theta_{s2n}^4 + R_{s2n}^b Q_{room}^r + T_{s2n-1}^f Q_{s2n-2}^r \quad (3.63)$$

โดยกระจกที่อยู่ระหว่างชั้น และเป็นผิวด้านหน้าสามารถหาค่าได้จาก

$$Q_{s2i-1}^r = \epsilon_{s2i-1} \sigma \theta_{s2i-1}^4 + R_{si-1}^f Q_{si-1}^r \quad (3.64)$$

กระจกที่อยู่ระหว่างชั้น และเป็นผิวด้านหลัง

$$Q_{s2i}^r = \epsilon_{s2i} \sigma \theta_{s2i}^4 + R_{s2i}^f Q_{si+1}^r \quad (3.65)$$



และสำหรับกรณีกระจกติดมู่ลี่ n ชั้นใด ๆ จะสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ฟอร์ม (matrix form) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & T_{1,1} & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & -R_{s2}^b & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -R_{s3}^f & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -R_{s2n-2}^b & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{s2n-1}^f & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{s2n-1} & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 Q_{s1}^r \\
 Q_{s2}^r \\
 Q_{s3}^r \\
 \dots \\
 \dots \\
 Q_{s2n-2}^r \\
 Q_{s2n-1}^r \\
 Q_{s2n}^r
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \epsilon_{s1} \sigma \theta_{s1}^4 + R_{s1}^f Q_{sky}^r \\
 \epsilon_{s2} \sigma \theta_{s2}^4 \\
 \epsilon_{s3} \sigma \theta_{s3}^4 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \epsilon_{s2n-2} \sigma \theta_{s2n-2}^4 \\
 \epsilon_{s2n-1} \sigma \theta_{s2n-1}^4 + T_{s6} Q_{room}^r \\
 \epsilon_{s2n} \sigma \theta_{s2n}^4 + R_{s2n}^b Q_{room}^r
 \end{bmatrix}
 \tag{3.66}$$

หรือ

$$[M_{i,j}] \{Q_{si}^r\} = \{S_j\} \tag{3.67}$$

- เมื่อ  $M_{i,j}$  คือ infrared transfer matrix
- $Q_{si}^r$  คือ radiative flux
- $S_j$  คือ radiative source vector

โดยที่เมทริกซ์  $M_{i,j}$  จะเป็นส่วนที่รวมค่าคุณสมบัติทาง optic แบบคลื่นยาวไว้จึงมักเรียกกันว่าเป็นเมทริกซ์การส่งผ่านในช่วงคลื่นยาว (infrared transfer matrix) ในขณะที่เวกเตอร์  $S_j$  เป็นเสมือนแหล่งความร้อนของกระจกจึงเรียกว่า เวกเตอร์แหล่งความร้อน (radiative source vector)

ดังนั้นจะสามารถหาค่า radiative flux ได้จาก

$$\{Q_i^r\} = [M_{i,j}]^{-1} \{S_j\} \tag{3.68}$$

จากสมการ 3.66 จะเห็นว่าเราจำเป็นต้องทราบค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยโดยสามารถหาได้จากการสมมติว่าการกระจายตัวของอุณหภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรงนั่นคือจะได้ผลต่าง

$$\text{delta} = \frac{\theta_{out} - \theta_{in}}{n + 1} \tag{3.69}$$

- เมื่อ  $n$  คือ จำนวนชั้นของกระจก

ดังนั้นจะได้อุณหภูมิกลางกระงกของชั้นใด ๆ คือ

$$\theta_i = \theta_{out} - \delta_i \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.70)$$

แต่เนื่องจากในการหา source strength vector นั้นจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิผิวกระงก ดังนั้นจึงสมมติให้อุณหภูมิที่ผิวมีค่าเท่ากับได้อุณหภูมิกลางกระงก

$$\theta_{s2i-1} = \theta_i \quad (3.71)$$

$$\theta_{s2i} = \theta_i \quad (3.72)$$

และจากอุณหภูมิผิวกระงกที่ได้จากการสมมตินี้จะทำให้สามารถหาค่า source strength vector และค่า  $Q_{si}^r$  ได้จากสมการที่ 3.68

### 3.4.1 การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม

ภายใต้สภาวะสมดุลพลังงานที่ถูกดูดกลืนผิวกระงกใด ๆ จะต้องมีค่าเท่ากับการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (environment) โดยในการถ่ายเทความร้อนออกนี้จะประกอบไปด้วยการถ่ายเทความร้อนใน 3 โหมดหลัก คือ การแผ่รังสีคลื่นยาว การพาความร้อน และการนำความร้อน

#### 3.4.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนออกเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

การพาความร้อนในส่วนนี้สามารถพิจารณาได้จาก

$$Q_{net}^r = h_r (\theta_1 - \theta_0) \quad (3.73)$$

และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี คือ

$$h_r = \frac{Q_{net}^r}{(\theta_1 - \theta_0)} \quad (3.74)$$

เมื่อ  $Q_{net}^r$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิในรูปของการแผ่รังสี,  $W/m^2$

$h_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ดังนั้นถ้าพิจารณาที่ผิวกระงกชั้นนอกจะได้

$$h_{r,out} = \frac{Q_{sky}^r - Q_{s1}^r}{\theta_{sky} - \theta_{s1}} \quad (3.75)$$

ที่ผิวกระจกชั้นด้านในกับอากาศภายใน

$$h_{r,in} = \frac{Q_{2N}^r - Q_{room}^r}{\theta_{s2N} - \theta_{room}} \quad (3.76)$$

ที่ระหว่างชั้นกระจกใด ๆ

$$h_{r,gap,i} = \frac{Q_{2i}^r - Q_{2i+1}^r}{\theta_{s2i} - \theta_{2i+1}} \quad (3.77)$$

ระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

$$h_{r,exchange} = \frac{Q_{2n-2}^r - Q_{2n-1}^r}{\theta_{s2n-2} - \theta_{2n-1}} \quad (3.78)$$

### 3.4.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนจากระบบกระจกหลายชั้นจะสามารถพิจารณาแยกตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

1. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก
2. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่
4. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

#### 3.4.1.2.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตพบว่าการพาความร้อนออกที่ผิวด้านนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศภายนอก และทิศทางของอาคารเป็นหลัก โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Finlayson [1]

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม (windward side of the building)

$$h_0 = 8.07 \cdot V^{0.605} \quad \text{ถ้า } V > 2 \text{ m/s} \quad (3.79)$$

$$h_0 = 12.27 \quad \text{ถ้า } V < 2 \text{ m/s} \quad (3.80)$$

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ใต้ลม (leeward side of the building)

$$h_0 = 18.64(0.3 + 0.05V)^{0.605} \quad (3.81)$$

เมื่อ  $V$  คือค่าความเร็วลมภายนอก, m/s

### 3.4.1.2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก

สามารถที่จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง นั่นคือ

$$h_{c,\text{gap}} = \frac{k \cdot Nu}{\omega} \quad (3.82)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่า thermal conductivity ของก๊าซระหว่างชั้นกระจก, W/m·K

$\omega$  คือ ความกว้างของช่องกระจก, mm

$Nu$  คือ Nusselt number

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการ [1]

$$Nu = \left[ 1 + \left( 0.0303 Ra^{0.402} \right)^{1/4} \right]^{0.991} \quad (3.83)$$

โดยที่

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.84)$$

เมื่อ  $Ra$  คือ Rayleigh number

$Gr$  คือ Grashof number

$Pr$  คือ Prandtl number

และ

$$Gr = \frac{g \beta \rho^2 \omega^3 \Delta\theta}{\mu^2} \quad (3.85)$$

เมื่อ  $\Delta\theta$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิกระจก, K

$g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s<sup>2</sup>

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอากาศ, 1/K

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, kg/m·s

โดยที่คุณสมบัติของก๊าซสามารถที่จะหาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นกระจกทั้งสอง และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$P(\theta) = P_{273} + \frac{dP}{d\theta_{ave}} \times \theta_{ave} \quad (3.86)$$

โดยที่

$$\theta_{ave} = 0.5 \times (\theta_{left} + \theta_{right}) \quad (3.87)$$

เมื่อ  $P_{273}$  คือ ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อุณหภูมิ 273 K  
 $\frac{dP}{d\theta_{ave}}$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ

โดยที่ค่าคุณสมบัติของอากาศต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ [1]

ค่าคุณสมบัติของอากาศ	ค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิ 273 K	ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เทียบกับอุณหภูมิ
ค่าความหนาแน่น	1.290	-0.0044
ค่าความหนืด	1.73e-5	10.0e-8
ค่าการนำความร้อนของอากาศ	0.0241	7.6e-5
ค่า Prandtl number	0.720	0.00180

### 3.4.1.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

การพาความร้อนในส่วนนี้นั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ที่ทำให้มีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน และไม่สามารถที่จะหาค่าผลเฉลยแน่นอนตรงได้ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาได้พยายามศึกษาทั้งโดยจากการทดลอง [18,20,22] และจากกรรมวิธีเชิงตัวเลข [17,19,23] โดยจากการการศึกษาต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลัก ๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนในส่วนนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1. ระยะของการติดตั้ง
2. มุมเอียงของมู่ลี่
3. ระดับของความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ตัวมู่ลี่
4. ค่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน

5. ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของผิวกระจก
6. ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่

โดย Collins [21] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยหาค่าการแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนนี้กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญ และทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 q_{\text{conv}} = & -77.761 + 1.309 \cdot b + 2.178 \cdot T_g + 16.17 \cdot \varepsilon_b + 5.083 \cdot \varepsilon_g - 0.339 \cdot q_b \\
 & - 17.337 \cdot \cos \phi - 0.034 \cdot b^2 + 0.012 \cdot b \cdot T_g - 0.393 \cdot b \cdot \varepsilon_b + 0.009 \cdot b \cdot q_b \\
 & + 0.810 \cdot b \cdot \cos \phi + 0.014 \cdot T_g^2 - 0.182 \cdot T_g \cdot \varepsilon_b - 0.212 \cdot T_g \cdot \varepsilon_g + 0.002 \cdot T_g \cdot q_b \\
 & - 0.254 \cdot T_g \cos \phi + 0.056 \cdot \varepsilon_b \cdot q_b - 0.160 \cdot q_b \cos \phi
 \end{aligned} \tag{3.88}$$

$$\begin{aligned}
 q_{r,\text{transmit}} = & 29.822 - 0.434 \cdot b - 1.811 \cdot T_g - 15.422 \cdot \varepsilon_b - 96.784 \cdot \varepsilon_g - 0.032 \cdot q_b \\
 & - 13.485 \cdot \cos \phi + 0.012 \cdot b \cdot T_g + 0.228 \cdot b \cdot \varepsilon_g + 0.002 \cdot b \cdot q_b + 0.019 \cdot T_g^2 \\
 & + 0.563 \cdot T_g \cdot \varepsilon_b + 4.183 \cdot \varepsilon_g + 0.001 \cdot T_g \cdot q_b + 0.654 \cdot T_g \cdot \cos \phi + 8.689 \cdot b^2 \\
 & - 13.458 \cdot \varepsilon_b \cdot \varepsilon_g - 0.111 \cdot \varepsilon_b \cdot q_b - 0.221 \cdot \varepsilon_g \cdot q_b
 \end{aligned} \tag{3.89}$$

จากค่าการพาความร้อนโดยธรรมชาติเฉลี่ยจะทำให้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่ได้จากความสัมพันธ์

$$h_{c,\text{chan}} = \frac{q_{\text{conv}}}{\theta_s - \theta_a} \tag{3.90}$$

เมื่อ  $\theta_s$  คือ อุณหภูมิผิวด้านในกระจก, K  
 $\theta_a$  คือ อุณหภูมิอากาศภายใน, K

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ส่งผ่านจากระหว่างกระจกเข้ามาสู่อากาศภายในห้อง

$$h_{r,\text{transmit}} = \frac{q_{r,\text{transmit}}}{\theta_s - \theta_a} \tag{3.91}$$

#### 3.4.1.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

สามารถจำลองได้เป็นการไหลผ่านแผ่นเรียบ และสามารถหาค่าได้จากแบบจำลองของกระจกผิวในจากความสัมพันธ์ [1]

$$hc_{\text{room}} = 1.77 \left( |\theta_{s2n} - \theta_{\text{room}}| \right)^{0.25} \tag{3.92}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนออกของแต่ละส่วนจะทำให้สามารถที่จะหาค่าความต้านทานความร้อนรวมในแต่ละส่วนได้ โดยสำหรับพื้นผิวกระจกด้านนอก

$$R_i = \frac{l}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_i}{k_i} \quad (3.93)$$

สำหรับพื้นผิวมีที่

$$R_{N+1} = \frac{l}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_N}{k_N} \quad (3.94)$$

สำหรับระหว่างชั้นกระจก/มีที่

$$R_{i+1} = \frac{l}{h_{c,gap,i} + h_{r,gap,i}} + \left( \frac{0.5d_i}{k_i} + \frac{0.5d_{i+1}}{k_{i+1}} \right) \quad (3.95)$$

### 3.4.2 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิต่อแต่ละชั้นกระจก

จากค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากอุณหภูมิที่สมมติขึ้นจะทำให้สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิต่อแต่ละชั้นได้จาก

$$\Delta_i = \frac{(\theta_i - \theta_{i-1})}{R_i} + \frac{(\theta_i - \theta_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} \quad (3.96)$$

โดยค่า  $\Delta_i$  ที่ได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ และเราจะใช้ค่า  $\Delta_i$  ตัวนี้ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวใหม่

### 3.4.3 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ผิว

จากค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกจะทำให้เราสามารถที่จะหาค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกได้จากหลักของสมดุลพลังงาน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวกระจกด้านนอกจะได้ว่าที่สภาวะคงตัวการนำความร้อนผ่านเนื้อกระจกจะต้องมีค่าเท่ากับการพาความร้อนออกจากผิวกระจกนั่นคือ

$$\frac{\theta_l - \theta_{sl}}{R_{kl}} = \frac{\theta_{sl} - \theta_{amb}}{R_{hl}} \quad (3.97)$$

จัดรูปสมการเสียใหม่จะได้

$$R_{hl}\theta_l - R_{hl}\theta_{sl} = R_{kl}\theta_{sl} - R_{kl}\theta_{amb} \quad (3.98)$$

$$R_{kl}\theta_{sl} + R_{hl}\theta_{sl} = R_{hl}\theta_l + R_{kl}\theta_{amb} \quad (3.99)$$

หารตลอดด้วย  $R_{kl}R_{hl}$  จะได้

$$\frac{R_{k1}\theta_{s1} + R_{h1}\theta_{s1}}{R_{k1}R_{h1}} = \frac{R_{h1}\theta_1 + R_{k1}\theta_{amb}}{R_{k1}R_{h1}} \quad (3.100)$$

หรือ

$$\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}}\right)\theta_{s1} = \left(\frac{\theta_1}{R_{k1}} + \frac{\theta_{amb}}{R_{h1}}\right) \quad (3.101)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ผิวใหม่ได้เป็น

$$\theta_{s1} = \frac{\left(\frac{\theta_1}{R_{k1}} + \frac{\theta_{amb}}{R_{h1}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}}\right)} \quad (3.102)$$

และพิจารณาในทำนองเดียวกันกับกรณีผิววัสดุด้านในจะได้

$$\theta_{s2N} = \frac{\left(\frac{\theta_N}{R_{kN+1}} + \frac{\theta_{room}}{R_{hN+1}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{hN+1}} + \frac{1}{R_{kN+1}}\right)} \quad (3.103)$$

และอุณหภูมิผิวที่อยู่ระหว่างชั้นสามารถพิจารณาหาค่าได้จากสมดุลพลังงานเช่นเดียวกัน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวด้านในของกระจกชั้นนอกจะได้

$$\theta_{s2} = \frac{\left(\frac{\theta_1}{R_{k1}} + \frac{\theta_{s3}}{R_{h2}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k1}}\right)} \quad (3.104)$$

และที่ผิวกระจก

$$\theta_{s3} = \frac{\left(\frac{\theta_2}{R_{k2}} + \frac{\theta_{s2}}{R_{h2}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k2}}\right)} \quad (3.105)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ index notation ได้เป็น

$$\theta_{s2i} = \frac{\left(\frac{\theta_i}{R_{ki}} + \frac{\theta_{s2i+1}}{R_{hi+1}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki}}\right)} \quad (3.106)$$



และ

$$\theta_{s_{2i+1}} = \frac{\left( \frac{\theta_{i+1}}{R_{ki+1}} + \frac{\theta_{s_{2i-1}}}{R_{li+1}} \right)}{\left( \frac{1}{R_{li+1}} + \frac{1}{R_{ki+1}} \right)} \quad (3.107)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ 3.106 และ 3.107 นั้นจะมีลักษณะที่เกี่ยวพัน (couple) กันอยู่ และจำเป็นต้องหาค่าไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นในการคำนวณจึงจะเริ่มดำเนินการคำนวณจากการสมมติค่า  $\theta_{s_{2i}}$  และ  $\theta_{s_{2i+1}}$  ก่อน โดยจะสมมติให้มีค่าที่เท่ากับอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก นั่นคือ  $\theta_{s_{2i}} = \theta_i$  และ  $\theta_{s_{2i+1}} = \theta_{i+1}$  จากนั้นจึงค่อยคำนวณค่าอุณหภูมิทั้งสองใหม่จนมีค่าที่ลู่อเข้า โดยในการคำนวณนั้นจะถือว่าลู่อเข้าเมื่อผลต่างสูงสุดของอุณหภูมิทั้งสองนั้นมีค่าไม่เกิน 0.01

#### 3.4.4 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ

ค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกตัวใหม่สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$\theta_k = \theta_k^0 + \delta\theta_k \quad (3.108)$$

เมื่อ  $\theta_k$  คือ ค่าอุณหภูมิตัวใหม่ของชั้นกระจกที่  $k$   
 $\theta_k^0$  คือ ค่าอุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นกระจกที่  $k$   
 $\delta\theta_k$  คือ ค่าผลต่างอุณหภูมิรวม

และค่า  $\delta\theta_k$  จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงเหลือของความร้อน (heat flux residual,  $\Delta_j$ ) ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \delta\theta_1 &= \frac{\partial\theta_1}{\partial\Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial\theta_1}{\partial\Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial\theta_1}{\partial\Delta_N} \cdot \Delta_N \\ \delta\theta_2 &= \frac{\partial\theta_2}{\partial\Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial\theta_2}{\partial\Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial\theta_2}{\partial\Delta_N} \cdot \Delta_N \\ &\dots \\ &\dots \\ \delta\theta_N &= \frac{\partial\theta_N}{\partial\Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial\theta_N}{\partial\Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial\theta_N}{\partial\Delta_N} \cdot \Delta_N \end{aligned} \quad (3.109)$$

จะเห็นได้ว่าในการหาค่า  $\delta\theta_k$  นั้นจำเป็นต้องทราบค่า  $\Delta_j$  และค่าอนุพันธ์ ต่าง ๆ เสียก่อน โดยที่ค่า  $\Delta_j$  สามารถที่จะคำนวณได้โดยตรงจากสมการ 3.96 แต่สำหรับพจน์อนุพันธ์ ถ้าพิจารณาที่สมการเดียวกัน จะเห็นได้ว่าหาค่าได้ไม่ง่ายนัก เนื่องมาจากว่าในหนึ่งสมการมีค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกัน อยู่หลายตัวด้วยกัน

อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนคงเหลือแทนจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_1} \cdot \delta \theta_1 + \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_2} \cdot \delta \theta_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_N} \cdot \delta \theta_N \\ \Delta_2 &= \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_1} \cdot \delta \theta_1 + \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_2} \cdot \delta \theta_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_N} \cdot \delta \theta_N \\ &\dots \\ &\dots \\ \Delta_N &= \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_1} \cdot \delta \theta_1 + \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_2} \cdot \delta \theta_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_N} \cdot \delta \theta_N\end{aligned}\tag{3.110}$$

หรือสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \\ \delta \theta_3 \\ \dots \\ \delta \theta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{bmatrix}\tag{3.111}$$

ดังนั้นจะทำให้สามารถหาค่า  $\delta \theta_k$  ใดๆ ได้จาก

$$\begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \\ \delta \theta_3 \\ \dots \\ \delta \theta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial \theta_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial \theta_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{bmatrix}\tag{3.112}$$

หรือ

$$\delta \theta_k = [\partial \Delta_k / \partial \theta_j]^{-1} \times \Delta_j\tag{3.113}$$

ถ้าพิจารณาจากสมการ 3.96 จะเห็นได้ว่าจากค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้สมมติในตอนแรกนั้นจะให้ค่า  $\Delta_j$  มีค่าที่ติดลบเสมอ เนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สมมติในตอนแรกนั้นไม่ได้รวมถึงผลของการดูดกลืนรังสีที่มีอยู่ในแต่ละชั้นกระจก ดังนั้นค่าอุณหภูมิใหม่ที่คำนวณได้นั้นจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่า  $\Delta_j$  นั้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากว่าค่า  $\Delta_j$  ที่ได้จะเป็นลบ จึงเป็นผลให้ค่า  $\delta \theta_k$  มีค่าลบไปด้วย ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการเสียใหม่เพื่อให้ได้ค่า  $\delta \theta_k$  มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ

$$\delta \theta_k = -[\partial \Delta_k / \partial \theta_j]^{-1} \times \Delta_j\tag{3.114}$$

จากสมการ 3.110 ถึง สมการ 3.114 จะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ โดยพิจารณาจากค่าอนุพันธ์ของ  $\partial\Delta_i/\partial\theta_j$  แทน ซึ่งสามารถหาค่าได้ง่ายกว่า

โดยค่าอนุพันธ์  $\partial\Delta_i/\partial\theta_j$  สามารถหาค่าได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ 3.96 เทียบกับ อุณหภูมิที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นกระจก/มูลี่ โดยจะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

ในกรณีของกระจก 1 ชั้นจะมีค่าเพียง 1 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Delta_1}{\partial\theta_1} = & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(hr_1 + hc_1)^2} \left( \frac{\partial hc_1(\theta_1 - \theta_0)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial\theta_1} - h_1 \right) \\ & + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(\theta_1 - \theta_2)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_2^r}{\partial\theta_1} - h_2 \right) \end{aligned} \quad (3.115)$$

ในกรณีของกระจก 2 ชั้นจะมี 4 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Delta_1}{\partial\theta_1} = & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(hr_1 + hc_1)^2} \left( \frac{\partial hc_1(\theta_1 - \theta_0)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial\theta_1} - h_1 \right) \\ & + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(\theta_1 - \theta_2)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial\theta_1} - hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (3.116)$$

$$\frac{\partial\Delta_1}{\partial\theta_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(\theta_1 - \theta_2)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial\theta_1} + hr_{gap} \right) \quad (3.117)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Delta_2}{\partial\theta_1} = & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(\theta_2 - \theta_1)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial\theta_1} + hr_{gap} \right) \\ & + \frac{1}{R_3^2(hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3(\theta_2 - \theta_3)}{\partial\theta_1} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial\theta_1} - \frac{\partial Q_3^r}{\partial\theta_1} \right) \end{aligned} \quad (3.118)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Delta_2}{\partial\theta_2} = & -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(\theta_2 - \theta_1)}{\partial\theta_2} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial\theta_2} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial\theta_2} - hr_{gap} \right) \\ & + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3(\theta_2 - \theta_3)}{\partial\theta_2} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial\theta_2} - \frac{\partial Q_3^r}{\partial\theta_2} - hr_3 \right) \end{aligned} \quad (3.119)$$

ดังนั้นสำหรับกรณี n ชั้นจะมีค่าอนุพันธ์เหล่านี้ทั้งหมด n คูณ n ค่า และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ index notation ได้เป็น

$$\frac{\partial \Delta_i}{\partial \theta_j} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_i^2 (hr_i + hc_i)^2} \left( \frac{\partial hc_i (\theta_i - \theta_0)}{\partial \theta_j} + \frac{\partial Q_{si}^r}{\partial \theta_j} - \frac{\partial Q_o^r}{\partial \theta_j} - h_i \right) + \frac{1}{R_{i+1}} + \frac{1}{R_{i+1}^2 (hr_{i+1} + hc_{i+1})^2} \left( \frac{\partial hc_{i+1} (\theta_{i+1} - \theta_{i+1})}{\partial \theta_j} + \frac{\partial Q_{s2i}^r}{\partial \theta_j} - \frac{\partial Q_{s2i+1}^r}{\partial \theta_j} - hr_{gap,i} \right) \quad (3.120)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนในแต่ละโหมด การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ และการทำซ้ำจนค่าตอบลูเข้าจะทำให้ได้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในทุก ๆ พื้นผิวได้

### 3.5 การหาค่าความสบายเชิงความร้อน

การปรับสภาวะอากาศนั้นมีจุดประสงค์หลักก็คือ เพื่อที่จะสร้างสภาวะอากาศภายในที่เหมาะสมกับความต้องการ และการใช้งานในบริเวณนั้น ๆ โดยในการปรับอากาศในอาคารสำนักงานนั้นจะมีจุดประสงค์หลักก็เพื่อที่จะทำให้ผู้อยู่อาศัยในอาคารเกิดความสบายทั้งในแง่ของความสบายเชิงความร้อน (thermal comfort) และความสะอาดของอากาศ โดยสภาวะที่สบายนั้นมักจะพิจารณาว่าเป็นสภาวะความร้อนที่เกิดจากร่างกายมนุษย์นั้นถูกอากาศภายในห้องพาออกไปในปริมาณที่เท่ากัน (เกิดสมดุลทางความร้อน)

ถึงแม้ว่าภายใต้สภาวะอากาศทั่ว ๆ ไปนั้นร่างกายของมนุษย์จะสามารถที่จะปรับสภาวะให้เกิดสมดุลทางความร้อนได้ภายใต้สภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้กลไกที่ช่วยในการระบายความร้อนในหลาย ๆ รูปแบบด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะอากาศที่ร้อนจัด ร่างกายจะทำให้เกิดความสมดุลทางความร้อน โดยการเพิ่มอัตราการระบายความร้อนทางลมหายใจ หรือเหงื่อ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะสมดุลทางความร้อนนั้นร่างกายกลับรู้สึกไม่สบายอันเป็นผลมาจากความชื้นปริมาณมากเมื่อเหงื่อออก และทำให้เหนียวตัว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสภาวะที่เกิดสมดุลทางความร้อนเพียงอย่างเดียวจะบ่งบอกถึงความสบายของคนไม่ได้ หากต้องพิจารณาอีกด้วยว่าค่าอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นที่ผิวหนังควรมีค่าที่เหมาะสมอยู่ค่า ๆ หนึ่ง และอาจจะมีค่าที่แปรเปลี่ยนได้ในช่วงที่ไม่กว้างมากนัก [29] ดังนั้นเพื่อเป็นการสร้างสภาวะที่เหมาะสม และอยู่ในช่วงที่จะทำให้ผู้อยู่อาศัยเกิดความสบายเชิงความร้อน ระบบปรับอากาศจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการที่จะทำให้สภาวะอากาศนั้นมีค่าที่เหมาะสม

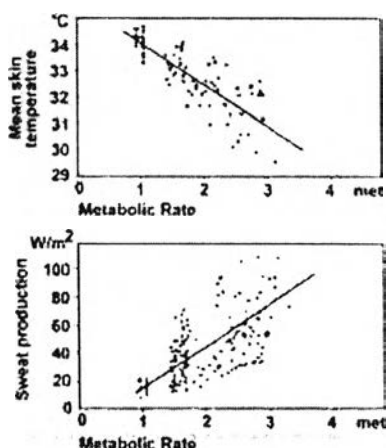
ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงสภาวะ และอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ Fanger [29] จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อที่จะหาสภาวะอากาศที่จะทำให้คนรู้สึกสบาย โดย Fanger ได้ตั้งสมมติฐานขึ้นมาก่อนว่าที่สภาวะสมดุลความร้อนผู้อยู่อาศัยจะมีความสบายเชิงความร้อน จากนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้หลักสมดุลพลังงานและ ค่าการพาความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองนำมาทำการสหสัมพันธ์ (correlation) กับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับร่างกายของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารที่มีการปรับสภาวะอากาศ โดยได้พิจารณาในกรณีที่ผู้อยู่อาศัยนั้นอยู่ภายในห้องภายใต้เวลา

ระยะหนึ่งแล้ว (ภายใต้สภาวะคงตัว) ดังนั้นจะเป็นผลให้ได้สมการสมดุลความร้อน (heat balance equation) ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 & M - 0.35 \cdot (1.92t_s - 25.3 - Pa) - E_{sw} - 0.0173 \cdot M \cdot (5.87 - Pa) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 &= \frac{t_s - t_{cl}}{0.155 \cdot I_{cl}} \quad (3.121) \\
 &= 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned}$$

เมื่อ	M	คือ อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม, met
	$P_a$	คือ partial pressure ของไอน้ำ, kPa
	$f_{cl}$	คือ อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด
	MRT	คือ ค่า Mean radiant temperature, °C
	$T_a$	คือ อุณหภูมิอากาศภายใน, °C
	$T_{cl}$	คือ อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่, °C
	$h_c$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศกับเสื้อผ้า, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
	$t_s$	คือ ค่าอุณหภูมิของผิวหนัง, °C
	$E_{sw}$	คือ ปริมาณความชื้นที่ผิวหนัง, $W/m^2$

เนื่องจากค่า  $t_s$  และ  $E_{sw}$  นี้มีค่าที่แตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล และแปรเปลี่ยนไปตามกิจกรรมของผู้อยู่อาศัย Fanger จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า  $t_s$  และ  $E_{sw}$  นี้ โดยพิจารณาภายใต้สภาวะสมดุลความร้อน และค่าทั้งสองนั้นจะแปรตามค่ากิจกรรม และมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงค่าอุณหภูมิที่ผิวหนัง และปริมาณความชื้นเทียบกับค่ากิจกรรมของผู้อยู่อาศัย [33]

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิที่ผิวหนังและค่าปริมาณความชื้นที่ผิวหนังที่สภาวะสมดุลนี้หลัก ๆ จะแปรตามกิจกรรมของผู้อยู่อาศัย อย่างไรก็ตามยังคงเห็นอีกว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้นี้มีลักษณะที่ค่อนข้างจะกระจาย อันเป็นผลเนื่องจากการตอบสนองทางร่างกายของแต่ละบุคคลนั้นแตกต่างกัน (คนบางคนอาจจะมีเหงื่อออกมากกว่าอีกคน และปริมาณเหงื่อที่ออกก็ยังคงส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่ผิวหนัง) และเนื่องจากร่างกายของผู้อยู่อาศัยนั้นจะสบายในช่วงแคบ ๆ ดังนั้น สามารถอาจจะกำหนด และเขียนในเชิงคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$a < t_s < b \quad (3.122)$$

$$c < E_{sw} < d \quad (3.123)$$

- เมื่อ
- a คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวหนังต่ำสุดที่ผู้อยู่อาศัยยังรู้สึกสบาย
  - b คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวหนังสูงสุดที่ผู้อยู่อาศัยยังรู้สึกสบาย
  - c คือ ค่าความชื้นที่ผิวหนังต่ำสุดที่ผู้อยู่อาศัยยังรู้สึกสบาย
  - d คือ ค่าความชื้นที่ผิวหนังสูงสุดที่ผู้อยู่อาศัยยังรู้สึกสบาย

ดังนั้นเพื่อเป็นการแน่ใจว่าค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นที่ผิวหนัง จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และทำให้เกิดความสบาย ดังนั้นถ้าพิจารณาให้ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดในกราฟเป็นของเขตบน และขอบเขตล่าง จะเป็นผลให้สามารถหาค่าอุณหภูมิผิวหนังเฉลี่ย และค่าความชื้นที่ผิวหนังเฉลี่ยได้เป็น

$$\bar{t}_s = 35.7 - 0.0275 \cdot M \quad (3.124)$$

$$\bar{E}_{sw} = 0.42 \cdot (M - 58.15) \quad (3.125)$$

สมการ 3.124 และ 3.125 นี้ ถือเป็นสภาวะเพิ่มเติมกับสมการสมดุลพลังงาน เพื่อสร้างสมการสบาย (comfort equation) แทนค่าทั้งสองสมการนี้ ลงในสมการ 3.121 จะได้

$$\begin{aligned} & M - 3.05 \cdot (5.73 - 0.007 \cdot M - P_a) - 0.42 \cdot (M - 58.15) - 0.0173 \cdot M \cdot (5.87 - P_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &= \frac{35.7 - 0.0275 \cdot M - t_{cl}}{0.155 \cdot I_{cl}} \\ &= 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{min} + 273)^4 \right] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \quad (3.126)$$

จากสมการที่ 3.126 จะเห็นได้ว่าสมการนั้นประกอบไปด้วย 2 สมการ นั่นคือ

$$\begin{aligned} & M - 3.05 \cdot (5.73 - 0.007 \cdot M - P_a) - 0.42 \cdot (M - 58.15) - 0.0173 \cdot M \cdot (5.87 - P_a) \\ & - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) = \frac{35.7 - 0.0275 \cdot M - t_{cl}}{0.155 \cdot I_{cl}} \end{aligned} \quad (3.127)$$

โดยสมการที่ 3.127 นี้จะแทนส่วนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างร่างกายของผู้อยู่อาศัยกับเสื้อผ้าที่สวมใส่ และอีกส่วนของสมการที่แทนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเสื้อผ้ากับสิ่งแวดล้อม นั่นคือ

$$\frac{35.7 - 0.0275 \cdot M - t_{cl}}{0.155 \cdot I_{cl}} = 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{min} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (3.128)$$

โดยถ้าทำการเขียนสมการ 3.127 ใหม่เพื่อหาค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้าจะได้ ค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้าเป็น

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275 \cdot M - 0.155 \cdot I_{cl} \cdot \left[ \begin{array}{l} M - 3.05 \cdot (5.73 - 0.007 \cdot M - P_a) \\ - 0.42 \cdot (M - 58.15) - 0.0173 \cdot M \cdot (5.867 - P_a) \\ - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \end{array} \right] \quad (3.129)$$

อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้าที่คำนวณได้จากสมการนี้จะเป็นจริงเมื่ออุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศเท่านั้น เพราะสมการนี้ไม่ได้รวมถึงอิทธิพลของอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าที่แตกต่างจากอุณหภูมิอากาศ โดยค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้าที่รวมอิทธิพลในส่วนของอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจะได้จากสมการ 3.128 นั่นคือ

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275 \cdot met - 0.155 \cdot I_{cl} \left[ \begin{array}{l} 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} - 273)^4 - (T_{min} + 273)^4) \\ + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \end{array} \right] \quad (3.130)$$

แต่ในสมการที่ 3.130 นี้ค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้ากลับไม่สามารถหาค่าได้โดยตรงเพราะสมการที่ได้เป็นแบบไม่ชัดเจน (implicit equation) ดังนั้นในการคำนวณค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้านั้นจะหาค่าได้โดยการทำซ้ำที่สมการ 3.130 นี้จนค่าลู่เข้า โดยที่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเพื่อหาค่าอุณหภูมิของเสื้อผ้านี้จะสามารถหาค่าอุณหภูมิเสื้อผ้าในกรณีไม่มีการแผ่รังสีจากสมการ 3.129

ถ้าพิจารณาจากสมการสบาย (สมการ 3.126) จะทำให้ทราบได้ว่าในการสร้างสภาวะให้เกิดความสบายนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 6 ตัวด้วยกัน คือ

1. ค่าอุณหภูมิอากาศ
2. ค่าความชื้น
3. ค่าความเร็วลม
4. ลักษณะของกิจกรรมของผู้อยู่อาศัย
5. ลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่
6. ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature, MRT)

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ นี้สามารถพิจารณาออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ

1. กลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวกับผู้อยู่อาศัยเอง ได้แก่ ลักษณะของกิจกรรม และลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่
2. กลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้น ค่าความเร็วลม และค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย

ดังนั้นในการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนนั้น ก่อนอื่นจึงจำเป็นที่จะต้องประเมินค่าลักษณะของกิจกรรม และลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่ เสียก่อน จากนั้นระบบปรับอากาศจึงจะมีส่วนในการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสม และเกิดความสบาย โดยระบบปรับอากาศที่ใช้กันทั่วไปนั้น (conventional air conditioning) จะสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้น และค่าความเร็วลมได้ ในขณะที่ระบบปรับอากาศแบบ radiant cooling จะใช้การควบคุมอุณหภูมิการแผ่รังสีเป็นหลักในการสร้างความสบายเชิงความร้อนให้กับผู้อยู่อาศัย

อย่างไรก็ตามที่สภาวะอากาศที่เหมาะสมนั้นอาจเกิดจากค่าของตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ที่แตกต่างกัน เช่นที่สภาวะที่มีความสบายเชิงความร้อนแล้ว การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้ร้อนขึ้น และเพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น ก็สามารถทำให้เกิดสภาวะที่มีความสบายเชิงความร้อนเหมือนกันได้ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการรวมอิทธิพลต่าง ๆ เข้าด้วยกัน Fanger จึงได้พัฒนาดัชนีขึ้นมาตัวหนึ่งเพื่อที่จะทำนายได้ว่าภายใต้สภาวะอากาศที่สร้างขึ้นนั้น(ที่มีค่าตัวแปรที่หลากหลายนั้น) มีสภาวะสมดุลความร้อนเกิดขึ้นหรือไม่ โดยดัชนีนั้นคือ ค่า PMV (Predicted Mean Vote) และ Fanger ได้แบ่งสเกลค่า PMV นี้ออกเป็น 7 ค่า นั่นคือ

+3	คือ	ร้อน	(Hot)
+2	คือ	อบอุ่น	(Warm)
+1	คือ	อุ่นเล็กน้อย	(Slightly warm)
0	คือ	ปกติ	(Neutral)
-1	คือ	เย็นเล็กน้อย	(Slightly cool)
-2	คือ	เย็น	(Cool)
-3	คือ	หนาว	(Cold)

โดยที่ ค่า 0 คือจุดที่มีความสมดุลทางความร้อน และค่า PMV นี้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้



$$PMV = (0.3033 e^{-0.036 \cdot met} + 0.028) \cdot \begin{bmatrix} met - 3.05 \cdot (5.733 - 0.00699 \cdot met - P_a) \\ - 0.42 \cdot (met - 58.15) \\ - 0.0173 \cdot met \cdot (5.867 - P_a) \\ - 0.0014 \cdot met \cdot (34 - T_a) \\ - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \cdot ((T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4) \\ - f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a) \end{bmatrix} \quad (3.131)$$

โดยที่ค่า partial pressure ของไอน้ำ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ

$$P_a = RH \cdot P_{sat @ T_a} \quad (3.132)$$

โดย

$$P_{sat @ T_a} = e^{\left(18.4854 - \frac{5169.5248}{T_a + 273.15}\right)} \quad (3.133)$$

เมื่อ  $P_{sat @ T_a}$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ, kPa  
RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง, %

และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จาก

$$h_c = \begin{cases} 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} & ; 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V} \\ 12.1\sqrt{V} & ; 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V} \end{cases} \quad (3.134)$$

เมื่อ  $V$  คือ ค่าความเร็วของอากาศภายใน, m/s

ค่า clothing area factor, สามารถหาได้จาก

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.0 + 0.2I_{cl} & ; I_{cl} < 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl} & ; I_{cl} \geq 0.5clo \end{cases} \quad (3.135)$$

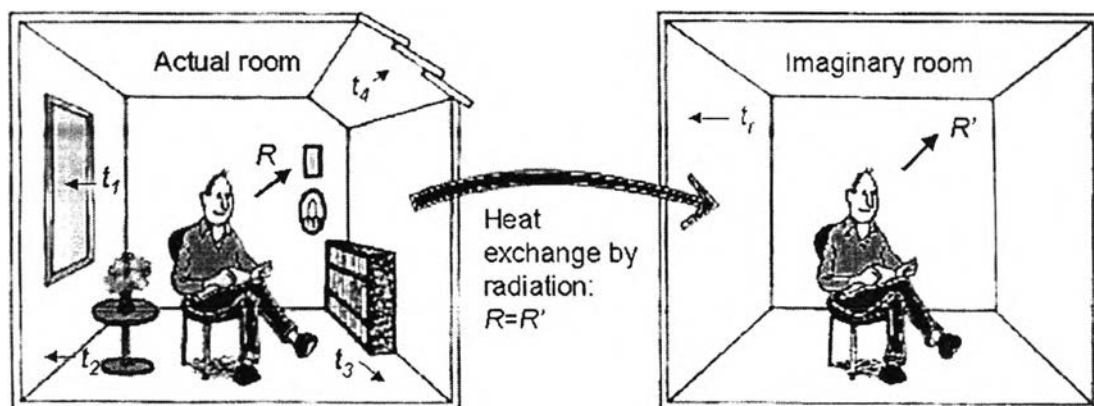
อย่างไรก็ตามที่สภาวะซึ่งเกิดสมดุลทางความร้อนนี้ ( $PMV=0$ ) คนบางคนอาจรู้สึกไม่สบายได้ อันเป็นผลมาจากสภาวะเพิ่มเติม(สมการ 3.124 และ 3.125) ที่ได้เพิ่มเติมให้กับสมการสมดุลพลังงานนั้น ได้พิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งหมายความว่าสมการ PMV จะบอกสภาวะสบายได้เฉพาะคนโดยเฉลี่ยเท่านั้นไม่สามารถครอบคลุมให้ครบทุก ๆ คนได้ ดังนั้น Fanger จึงได้ขยายช่วงสบายให้อยู่ระหว่าง  $-0.5$  ถึง  $+0.5$  เพื่อครอบคลุมถึงคนโดยทั่ว ๆ ไปด้วย และได้พัฒนาดัชนีอีกหนึ่งตัว

เพื่อทำนายว่าภายใต้สภาวะที่สร้างขึ้นจะมีคนจำนวนคนเท่าใดที่รู้สึกไม่สบาย โดยดัชนีนั้นคือ Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) และมีความสัมพันธ์กับค่า PMV ดังสมการ

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (3.136)$$

### 3.5.1 การหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature)

อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, MRT) เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย ซึ่งจะแทนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกรอบของอาคารแต่ละด้านกับร่างกายของผู้อยู่อาศัย โดยนิยามแล้วนั้นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย คืออุณหภูมิเฉลี่ยของผนังที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเท่ากับผนังจริง (ที่มีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงนิยามของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย [33]

โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่ไม่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบกรอบอาคาร (Unirradiant Mean radiant Temperature,  $T_{umrt}$ )

โดยที่ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีนี้จะเกิดขึ้นในกรณีของห้องที่ไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของห้องที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ ซึ่งอุณหภูมิ  $T_{umrt}$  นี้จะทำให้เกิดการแผ่รังสีคลื่นยาวแต่เพียงอย่างเดียว

- กรณีที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบกรอบอาคาร

ในกรณีนี้จะเกิดจากการที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบหน้าต่างกระจก และส่งผ่านรังสีเข้ามา และตกกระทบที่ผิวของผู้อยู่อาศัยโดยตรง โดยการตกกระทบของรังสีที่กระจกนี้จะทำให้เกิดผลต่อการแผ่รังสี 2 ส่วนคือ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจกและทำให้การแผ่รังสีคลื่นยาวที่มากขึ้น และรังสีที่ส่งผ่านเข้ามาตกกระทบผิวของผู้อยู่อาศัยโดยตรงอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้น ค่าอุณหภูมินี้อาจเรียกได้เป็น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเนื่องจากอุณหภูมิการแผ่รังสี และการแผ่รังสีคลื่นยาวโดยตรง ( Mean Radiant Temperature due to surface temperature and solar radiation,  $T_{smrt}$  )

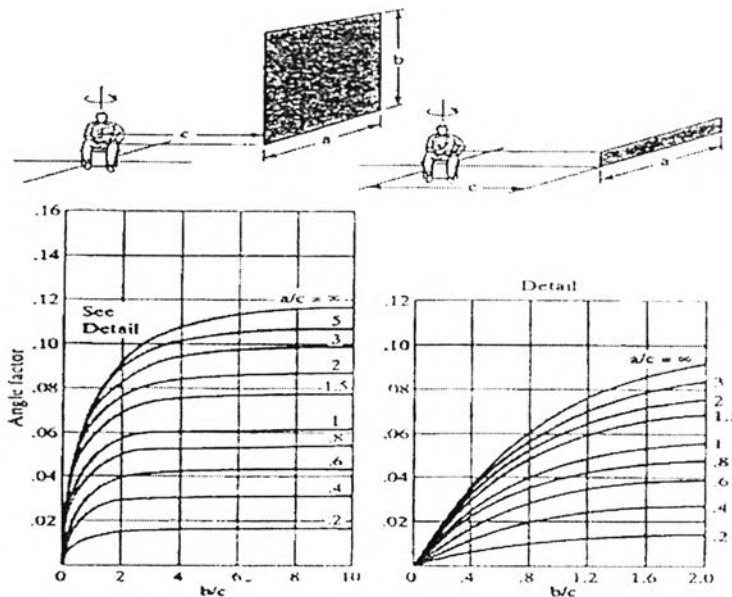
3.5.1.1 การหาค่าอุณหภูมิ unirradiated mean radiant temperature,  $T_{umrt}$

จะเป็นค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ผิวต่าง ๆ เทียบกับตำแหน่งของผู้อยู่อาศัยในอาคาร ตามความสัมพันธ์

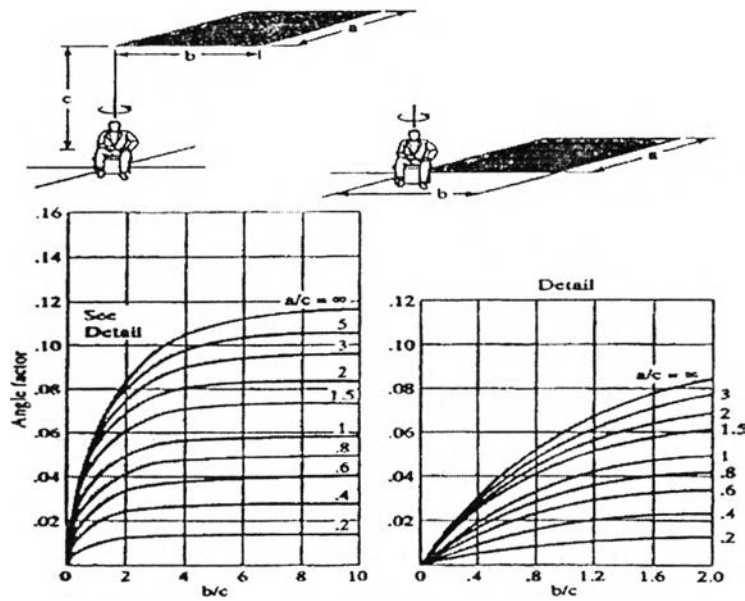
$$\sigma(T_{umrt} + 273)^4 = B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + \dots + B_n \cdot F_{p-n} \tag{3.137}$$

- เมื่อ  $T_{umrt}$  คือ ค่า unirradiated mean radiant temperature, °C
- $B_i$  คือ ค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิว,  $W/m^2$
- $F_{p-n}$  คือ ค่า angle factor ระหว่างผู้อยู่อาศัยกับพื้นผิวที่ n

โดยค่า angle factor ต่าง ๆ นั้น สามารถหาได้จากรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 แสดงค่าเฉลี่ยของ angle factor ระหว่างคนนั่งกับผนังตั้งฉาก



รูปที่ 3.11 แสดงค่าเฉลี่ยของ angle factor ระหว่างคนนั่งกับเพดานและพื้น

แต่เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นกรอบอาคารนั้นจะมีค่าการดูดกลืนที่ค่อนข้างสูงทำให้สามารถตัดค่าการสะท้อนได้ และถ้าพิจารณาให้ผนังภายในห้องเป็นพื้นผิวดำค่าของ  $T_{umrt}$  จะสามารถหาได้จาก

$$T_{umrt} = \left[ (T_1 + 273)^4 \cdot F_{p-1} + (T_2 + 273)^4 \cdot F_{p-2} + \dots + (T_n + 273)^4 \cdot F_{p-n} \right]^{0.25} - 273 \quad (3.138)$$

### 3.5.1.2 การหาค่าอุณหภูมิ mean radiant temperature due to surface temperature and solar radiation, $T_{smrt}$

ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีในส่วนนี้สามารถหาค่าจากสมการที่เสนอโดย Fanger โดยจะมีความสัมพันธ์กับรังสีที่ตกกระทบ ดังสมการ

$$T_{smrt} = \left[ T_{umrt}^4 + f_p \cdot \alpha_p \cdot \frac{q}{(\epsilon_p \cdot \sigma)} \right]^{0.25} \quad (3.139)$$

โดยที่

$$q = I_{dir} \times T^{RH}(\theta, \phi) + I_{diff} \times T_{hem} \quad (3.140)$$

เมื่อ	$\alpha_p$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.6)
	$\epsilon_p$	คือ ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.97)
	$f_p$	คือ ค่า Projected area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ภาพฉายผิวคนต่อพื้นที่รับแสง และจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและทิศทางของรังสี
	$q$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามา และตกกระทบผิวผนังคน, $W/m^2$
	$I_{dir}$	คือ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, $W/m^2$
	$I_{diff}$	คือ ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, $W/m^2$
	$T^{RH}(\theta, \phi)$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ
	$T_{hem}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีครึ่งวงกลม

แต่เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบนั้นจะมีค่าที่สูงมาก และจะก่อให้เกิดค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ( $T_{smrt}$ ) ที่สูงตามไปด้วย โดยถ้านำค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้โดยวิธีนี้ไปใช้ในการคำนวณค่า PMV โดยตรงนั้นจะทำให้ค่าที่ PMV ที่ได้มีค่าเกินสเกลที่กำหนดไว้ ดังนั้นในการหาค่าความสบายเชิงความร้อนในส่วนนี้จึงมักพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า PMV แทนโดยรายละเอียดต่าง ๆ นั้นจะอยู่ในหัวข้อถัดไป

### 3.5.2 การหาค่า PMV ในกรณีที่มีผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก

การคำนวณค่า PMV ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ จะสามารถหาได้จากวิธีที่เสนอโดย Lyon [5]

$$\frac{dPMV}{dq} = \frac{\partial PMV}{\partial T_{smrt}} \cdot \frac{\partial T_{smrt}}{\partial (\alpha_p f_p q)} \cdot \frac{\partial (\alpha_p f_p q)}{\partial q} \quad (3.141)$$

เมื่อ	$\alpha_p$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีที่ผิวของผู้อยู่อาศัย
	$f_p$	คือ ค่า projected area factor
	$q$	คือ ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก และผ่านเข้ามากระทบผิว

ดังนั้นจะสามารถหาค่า PMV ในกรณีที่มีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านได้จากสมการ

$$PMV_{(total)} = PMV + \frac{dPMV}{dq} \cdot q \quad (3.142)$$

เมื่อ  $PMV_{(total)}$  คือ Total PMV  
 $PMV$  คือ ค่า PMV ในกรณีที่ไม่มีแสงแดด (no solar)

จากค่า  $PMV_{(total)}$  จะทำให้สามารถหาค่า  $PPD_{(total)}$  ได้จากสมการ 3.136 และค่า  $PPD$  เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์อย่างเดียวนั้นจะสามารถหาค่าได้จาก

$$PPD_{(solar)} = PPD_{(total)} - PPD_{(surface)} \quad (3.143)$$