

บทที่ 3

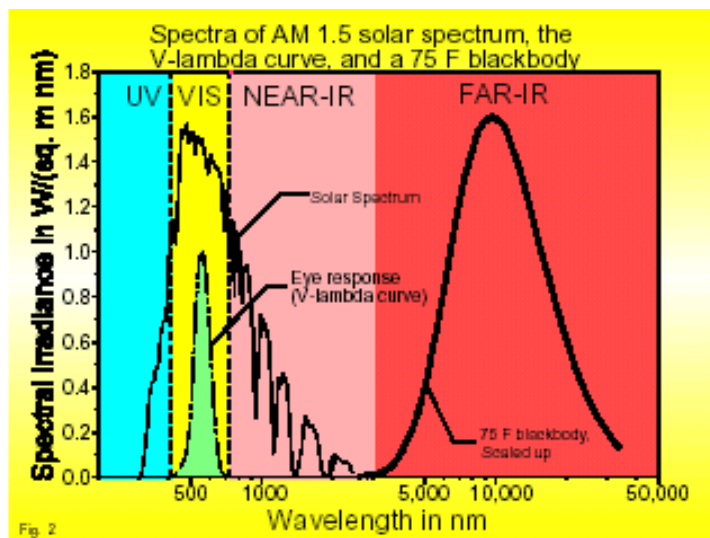
ทฤษฎี และวิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ได้แก่ วิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก วิธีการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามความยาวคลื่นและมุมตกกระทบ วิธีการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกตามวิธีของโปรแกรม Window 4.1[11] และวิธีการคำนวณค่าปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งการคำนวณที่แสดงไว้ทั้งหมดมีความจำเป็นที่ต้องนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะหน้าต่างกระจกและหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม การหาคุณสมบัติทาง optical ที่แปรตามความยาวคลื่นของหน้าต่างกระจกนั้นเป็นสิ่งจำเป็นในการนำไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการสะท้อนรังสี ค่าการดูดกลืนรังสี รวมทั้งอุณหภูมิของผิวกระจก ค่าคุณสมบัติที่คำนวณได้เหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณต่อเพื่อหาดัชนีการส่งผ่านความร้อนตามวิธีของ Chaipayinunt และคณะ [2]

3.1 คลื่นรังสีแสงอาทิตย์ และคุณสมบัติทาง Optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามความยาวคลื่น

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกนั้น จำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะของคลื่นรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวกระจกที่ความยาวคลื่นต่างๆ ลักษณะของคลื่นรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.1 และจากรูปที่ 3.1 จะพบว่าช่วงของความยาวคลื่นต่ำกว่า 360 นาโนเมตร จะเป็นช่วงของรังสี UV และช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 360 ถึง 760 นาโนเมตร จะเป็นช่วงของรังสีของการมองเห็น (Visible) และช่วงตั้งแต่ 760 นาโนเมตรขึ้นไปจนถึงประมาณ 3,500 นาโนเมตร จะเป็นช่วงของรังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นช่วงของการแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาว

โดยทั่วไปแล้ว หน้าต่างกระจกที่เหมาะสมสำหรับภูมิอากาศที่มีลักษณะร้อนอบอ้าวอย่างในประเทศไทย จะเป็นหน้าต่างกระจกในลักษณะที่ให้ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงในช่วงของการมองเห็น ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 360 ถึง 760 นาโนเมตร และมีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำในช่วงของรังสีอินฟราเรด ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 760 ถึง 3,500 นาโนเมตร รวมทั้งยังต้องมีค่าการสะท้อนรังสีสูงในช่วงของอินฟราเรด เพื่อที่จะสะท้อนรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวกระจกออกไปยังภายนอกอาคาร ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่เหมาะสมสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนได้ดังในรูปที่ 3.2 และ 3.3

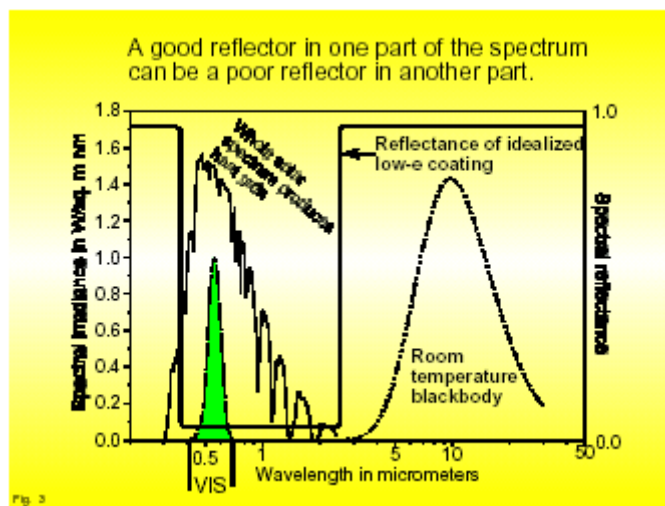


รูปที่ 3.1 ลักษณะค่าการกระจายตัวของคลื่นรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

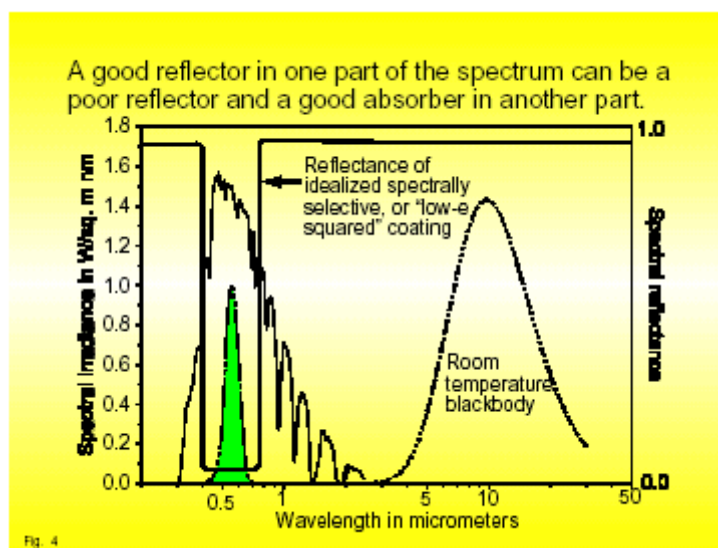
จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ให้ปริมาณของแสงสว่างมาก จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 ถึง 0.7 ไมครอน ดังนั้นหน้าต่างกระจกจึงควรที่จะมีค่าการส่งผ่านรังสีสูงในช่วงของความยาวคลื่นนี้ เหตุผลก็เพื่อให้ปริมาณของแสงสว่างจากแสงอาทิตย์ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามายังภายในอาคาร และนอกจากนั้นค่าการส่งผ่านรังสีควรมีค่าต่ำในช่วงของความยาวคลื่นช่วงอื่น เพื่อที่จะไม่ให้คลื่นรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงของรังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นรังสีความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาได้ สำหรับอาคารที่อยู่ในเขตหนาวนอกเหนือจากความต้องการแสงสว่างจากแสงอาทิตย์ผ่านกระจกแล้ว อาคารดังกล่าวมักจะต้องการความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านกระจกเข้ามาให้ความอบอุ่นแก่ผู้อยู่อาศัย และเมื่อความร้อนที่ผ่านเข้ามาในอาคารแล้วก็ยังต้องการกักความร้อนดังกล่าวไม่ให้ส่งผ่านกลับไปสู่อากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นกระจกที่คุณสมบัติดังกล่าวจะต้องมีค่าการส่งผ่านรังสีสูงในช่วงการมองเห็นและช่วงรังสีแสงอาทิตย์ (0.3 ถึง 2.5 ไมครอน) (ค่าการสะท้อนรังสีต่ำ) และมีค่าการส่งผ่านรังสีต่ำในช่วงรังสีคลื่นยาว (ค่าการสะท้อนรังสีต่ำ) ในรูปที่ 3.2 ยังแสดงถึงกระจกที่เคลือบสาร low-E ทางอุดมคติที่จะมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำในช่วงการมองเห็นและช่วงรังสีแสงอาทิตย์ (ค่าการส่งผ่านรังสีสูง) เพื่อรับแสงสว่างและความร้อนผ่านกระจก และมีค่าการสะท้อนรังสีสูงในช่วงของรังสีช่วงยาว (ค่าการส่งผ่านรังสีต่ำ) เพื่อสะท้อนรังสีความร้อนที่เข้ามาในอาคารแล้วไม่ให้ส่งผ่านกระจกออกสู่ภายนอก ซึ่งกระจกชนิดนี้เป็นกระจกที่เหมาะสมสำหรับอาคารในเขตหนาว

ในรูปที่ 3.3 ยังได้แสดงถึงค่าการสะท้อนรังสีของกระจกเคลือบสาร low-E อีกแบบที่จะมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำเฉพาะในช่วงการมองเห็น (ค่าการส่งผ่านรังสีสูง) และมีค่าการสะท้อนรังสีสูงในช่วงของรังสีแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรด และรังสีคลื่นยาว (ค่าการส่งผ่านรังสีต่ำ) เพื่อสะท้อนรังสีความร้อนออกจากกระจก ซึ่งกระจกชนิดนี้เป็นกระจกที่เหมาะสมสำหรับอาคารในเขตร้อน ที่ยอมให้เฉพาะแสงสว่าง

ผ่านกระจกเข้ามาในอาคารแต่ป้องกันความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นอื่น ๆ ไม่ให้ส่งผ่านกระจกเข้ามา



รูปที่ 3.2 คลื่นรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการสะท้อนรังสีที่แปรตามความยาวคลื่นของหน้าต่างกระจกเคลือบสาร low-E ทางอุดมคติที่เหมาะสมสำหรับใช้กับอาคารในภูมิอากาศเขตนาน



รูปที่ 3.3 คลื่นรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการสะท้อนรังสีที่แปรตามความยาวคลื่นของหน้าต่างกระจกสำหรับใช้กับอาคารในภูมิอากาศเขตร้อน

3.2 วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

ความร้อนที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามายังภายในอาคารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ซึ่งการถ่ายเทความร้อน 3 ลักษณะดังกล่าวนี้จะแบ่งเป็น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยในสองลักษณะแรกจะสามารถคิดรวมกันให้เป็นผลที่เกิดเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศภายใน ส่วนลักษณะที่สาม จะเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวของหน้าต่างกระจกและสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ และเกิดจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับหน้าต่างกระจกโดยตรง รวมทั้งเกิดจากการสะท้อนรังสีจากพื้นดินและสิ่งก่อสร้างหรืออาคารที่อยู่ใกล้เคียง โดยสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับคำนวณความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหัวข้อนี้อ้างอิงมาจากบทที่ 29 ใน ASHRAE Handbook Fundamental 1997 [5] สำหรับสมการการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกต่อพื้นที่ชั่วขณะใดขณะหนึ่ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$q = (SHGC) \cdot I_t + U \cdot (t_{out} - t_{in}) \quad (3.1)$$

เมื่อ	q	= อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกต่อหน่วยพื้นที่, W/m^2
	U	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม, $W/m^2 \cdot K$
	t_{in}	= อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, $^{\circ}C$
	t_{out}	= อุณหภูมิอากาศภายนอก, $^{\circ}C$
	$SHGC$	= Solar heat gain coefficient
	I_t	= รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, W/m^2

โดยสมการที่ 3.1 สามารถเขียนแยกการคำนวณเป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายได้เป็นตามสมการที่ 3.2

$$q = SHGC_D(\theta) \cdot I_{Dir} + \langle SHGC \rangle_d \cdot I_{diff} + U \cdot (t_{out} - t_{in}) \quad (3.2)$$

เมื่อ	$SHGC_D(\theta)$	= Direct Solar heat gain coefficient
	$\langle SHGC \rangle_d$	= Diffuse Solar heat gain coefficient
	I_{Dir}	= รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นผิว, W/m^2
	I_{diff}	= รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นผิว, W/m^2
	θ	= มุมตกกระทบ, Degree

จากสมการที่ 3.2 จะพบว่าสองเทอมแรกที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการ เป็นความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และเทอมสุดท้ายเป็นความร้อนอันเนื่องมาจาก

ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคาร ในหัวข้อย่อยถัดไปจะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.2

3.2.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC)

เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ได้ตกกระทบกับหน้าต่างกระจก จะมีรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนที่ตกกระทบและส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาโดยตรง และจะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจกและจะถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลังโดยอาศัยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว ส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับออกไปข้างนอก ซึ่งขนาดของรังสีที่ถูกกักเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจกแล้วถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลังเรียกว่า ค่า Inward flowing fraction, N ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะของอากาศที่อยู่ล้อมรอบระหว่างด้านทั้งสองของหน้าต่างกระจก ดังนั้นค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ก็คือสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงส่วนของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกแล้วผ่านเข้ามาภายในห้องกลายเป็นความร้อนที่ได้รับ โดยเป็นส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาโดยตรง และส่วนที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจกแล้วถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลัง ดังนั้นค่า SHGC จึงเป็นคุณสมบัติใช้บอกลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแต่ละชนิด

ค่า SHGC ยังสามารถแบ่งออกเป็นค่า SHGC ในส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ โดยเขียนเป็น $SHGC_D(\theta)$ และค่า SHGC สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย โดยเขียนเป็น $\langle SHGC \rangle_d$ สำหรับค่า $SHGC_D(\theta)$ ในสมการที่ 3.2 เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบ ซึ่งจะขึ้นกับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์นั้น สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$SHGC_D(\theta) = T_{i,L}(\theta) + \sum_{i=1,L}^L N_i A_i(\theta) \quad (3.3)$$

เมื่อ $T_{i,L}(\theta)$ = ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกจากชั้นที่ 1 ถึง L
 A_i = ค่าการดูดกลืนรังสีของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i
 N_i = ค่า Inward flowing fraction ของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i
 L = จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก

สำหรับค่า $\langle SHGC \rangle_d$ เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.4

$$\langle SHGC \rangle_d = \int_0^{\pi/2} SHGC_D(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (3.4)$$

โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จะรวมส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้าไปไม่ได้ อันได้แก่ ส่วนทึบแสง (opaque element) คือ ส่วนกรอบกระจก (frame) และส่วนของลูกฟูกกั้นกระจก (divider) เข้าไปด้วย แล้วใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของส่วนต่างๆ ของหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.5

$$SHGC = \frac{SHGC_g A_g + SHGC_f A_f + \sum_{i=1}^M A_i SHGC_i}{A_g + A_f + \sum_{i=1}^M A_i} \quad (3.5)$$

เมื่อ $SHGC_f$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนกรอบหน้าต่างกระจก (frame)
 $SHGC_g$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนที่เป็นกระจก
 $SHGC_i$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนของ divider

โดยค่า SHGC ในส่วนของกรอบกระจกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6

$$SHGC_f = \alpha_f^s \left(\frac{U_f}{h_f} \right) \left(\frac{A_f}{A_{surf}} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ α_f^s = ค่าการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวภายนอกของกรอบกระจก
 U_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของกรอบกระจก
 h_f = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม (การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน) ระหว่างกรอบกระจกและสิ่งแวดล้อม
 $\frac{A_f}{A_{surf}}$ = ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ฉาย (projected area) ต่อพื้นที่ผิวของกรอบจริง

และ $SHGC_i$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

$$SHGC_i = \alpha_i^s \left(\frac{U_i}{h_i} \right) \left(\frac{A_i}{A_{surf,i}} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่ $h_f = h_{C_{out}} + 4\sigma\epsilon_f t_{out}^3$

เมื่อ h_f = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวของกรอบกระจก หรือ divider กับสิ่งแวดล้อมภายนอก, W/m²K
 ϵ_f = ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของกรอบกระจก หรือ divider ที่ผิวด้านนอก
 t_o = อุณหภูมิภายนอก, °C

σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzman , $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}$

3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, U

การหาค่าความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกทุกส่วน สามารถคำนวณได้โดยแยกการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนออกเป็นในแต่ละส่วนได้แก่ ส่วนกลางกระจก (center of glass) ส่วนขอบกระจก (edge of glass) และส่วนกรอบกระจก (frame) โดยนำค่าของทุกส่วนมารวมกันแล้วใช้วิธีถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของแต่ละส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.8

$$U = \frac{U_{cg}A_{cg} + U_{eg}A_{eg} + U_fA_f}{A_{pf}} \quad (3.8)$$

โดยที่ cg หมายถึง ส่วนของตรงกลางกระจก

eg หมายถึง ส่วนขอบกระจก

f หมายถึง ส่วนของกรอบหน้าต่าง

3.2.3 แฟกเตอร์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวมของส่วนกลางกระจก (Center-of-Glass U factor)

สำหรับการคำนวณค่า U ของกลางกระจก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.9

$$U_{cg} = \frac{1}{1/h_o + \sum_{i=1}^{M-1} (1/h_s)_i + \sum_{i=1}^{M-1} (d_i/k_i) + 1/h_i} \quad (3.9)$$

เมื่อ h_o, h_i = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอกและผิวภายใน, $\text{W/m}^2\text{K}$

h_s = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของก๊าซที่อยู่ระหว่างชั้นของกระจก, $\text{W/m}^2\text{K}$

d = ความหนาของกระจก, m

k = ค่า Thermal Conductivity, W/(m-K)

3.2.4 แฟกเตอร์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวมของส่วนขอบกระจก (Edge of glass U factor)

สำหรับหน้าต่างที่มีกระจกหลายชั้นจะมี Spacer เป็นตัวแยกระหว่างชั้นของกระจก โดยส่วนมากจะทำมาจากอลูมิเนียมที่มีค่าการนำความร้อนสูง ซึ่งจะทำให้มีการนำความร้อนไปที่บริเวณขอบของกระจกด้วย จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณดังกล่าวเป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งสมการสำหรับคำนวณหาค่า U-factor ที่บริเวณขอบกระจกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.10

$$U_{eg} = A + BU_{cg} + CU_{cg}^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ A , B และ C เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของ Edge of glass U-factor ที่ใช้ในสมการที่ 3.10

ชนิดของวัสดุ	A	B	C
โลหะ	0.223	0.842	-0.153
ฉนวน	0.120	0.682	0.244
กระจก	0.158	0.774	0.057
โลหะ+ฉนวน	0.135	0.706	0.187

3.2.5 ค่าแฟกเตอร์สัมประสิทธิ์ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของกรอบกระจก (Frame U-factor)

ส่วนประกอบของกรอบหน้าต่างจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลายส่วนด้วยกัน ซึ่งในแต่ละส่วนประกอบนั้นจะมีลักษณะของรูปร่างที่ซับซ้อนและชนิดของวัสดุที่หลากหลายและลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 2 มิติจึงทำให้ยากต่อการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการหาค่า U-factor ของส่วนที่เป็นกรอบกระจกสามารถคำนวณหาได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ THERM 2.0

3.2.6 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอกและผิวภายใน

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอก (h_o) และที่ผิวภายใน (h_i) จะเกิดจากผลของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม ที่ผิวภายนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมและตำแหน่งของอาคาร และสำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายในจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิที่ผิวกระจกรวมทั้งค่าการเปล่งรังสีที่ผิวชั้นในของกระจก สำหรับสมการที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวหน้าต่างกระจกภายนอกและภายในสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$h_o = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (3.11)$$

$$h_i = 1.77(t_{gi} - t_i)^{0.25} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (t_{gi}^4 - t_i^4) / (t_{gi} - t_i) \quad (3.12)$$

เมื่อ t_{gi} = อุณหภูมิผิวกระจกด้านใน °C

t_i = อุณหภูมิอากาศด้านใน °C

ε = ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวกระจกด้านใน

σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

V = ค่าความเร็วลมภายนอก ,m/s

3.2.7 การหาค่า Inward Flowing Fraction (N_i)

สำหรับส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจก ซึ่งประกอบด้วย รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีที่มองเห็นได้ และรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะมีผลทำให้กระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดความร้อนสะสมไว้ในตัวกระจกนั้น บางส่วนจะถูกกระจายออกไปข้างนอกอาคารโดยกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านเข้ามาข้างภายในอาคารและกลายเป็นความร้อน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามานั้นเรียกว่า ค่า Inward flowing fraction, N_i ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของอากาศที่ผิวทั้งสองด้านของกระจก รวมทั้งก๊าซที่บรรจุอยู่ระหว่างชั้นของกระจกในกรณีของหน้าต่างกระจกหลายชั้น สำหรับสมการที่ใช้หาค่าของ Inward Flowing Fraction สามารถหาได้ตามสมการที่ 3.13 ถึง 3.18

สำหรับกระจก 1 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1} \right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1} \right) + \frac{1}{h_i}} \quad (3.13)$$

สำหรับกระจก 2 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1} \right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1} \right) + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.14)$$

$$N_2 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_2/2}{k_2} \right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1} \right) + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.15)$$

สำหรับกระจก 3 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k} \right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.16)$$

$$N_2 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_2/2}{k_2} \right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.17)$$

$$N_3 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_3/2}{k_3} \right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.18)$$

โดยที่

N_i = ค่า Inward flowing fraction ของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$

k_i = ค่า Thermal conductivity (W/m·K) ของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$

d_i = ความหนาของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$, (m)

h_i = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของอากาศภายใน, W/m²K

h_o = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของอากาศภายนอก, W/m²K

h_s = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของก๊าซระหว่างชั้นของกระจก, W/m²K

3.3 การคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ ซึ่งอาจแบ่งเป็นกระจกชนิดไม่เคลือบ ซึ่งได้แก่ กระจกใส และกระจกสี กระจกชนิดเคลือบ และกระจกติดฟิล์ม ซึ่งค่าคุณสมบัติที่คำนวณได้จะเป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบของรังสี และแปรตามความยาวคลื่น นอกจากนั้นในหัวข้อนี้ยังกล่าวถึงการคำนวณค่าคุณสมบัติดังกล่าวอยู่ในรูปรวม (ได้แปรตามความยาวคลื่นแสง) ด้วย

3.3.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)

การหาคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดไม่เคลือบ ซึ่งได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก (Transmittance) ค่าการสะท้อนรังสีของกระจก (Reflectance) และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก (Absorptance) ที่ขึ้นกับความยาวคลื่น และมุมตกกระทบนั้น จำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉากกับกระจก ($\theta = 0^\circ$) โดยทั่วไปแล้วค่าดังกล่าวจะทราบได้จากข้อมูลของการตรวจวัดของผู้ผลิตกระจก สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบ โดยทั่วไปจะมีลักษณะของเนื้อกระจกเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous glass) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติของกระจกซึ่งแปรตามความยาวคลื่นที่ผิวด้านหน้า และด้านหลังกระจกนั้นมีค่าเท่ากัน คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก ($T^f = T^b$)

ค่าการสะท้อนรังสีของกระจก ($R^f = R^b$) และ ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก ($A^f = A^b$) สำหรับสมการที่ใช้หาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดไม่เคลือบอ้างอิงจาก Fuller [12] โดยสามารถคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดนี้ที่แปรตามมุมตกกระทบได้ตามสมการที่ 3.19 และ 3.20

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 e^{-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}} \quad (3.19)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot (1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}) \quad (3.20)$$

- เมื่อ T = ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก
 R = ค่าการสะท้อนรังสีของกระจก
 τ = ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสี (Transmitsivity)
 ρ = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี (Reflectivity)
 θ = มุมตกกระทบ , Degree
 ϕ = มุมหักเหของรังสี, Degree
 λ = ความยาวคลื่น , nm
 α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Absorbtion coefficient)
 d = ความหนาของกระจก , mm

ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก และค่าการสะท้อนรังสีของกระจก ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.19 และ 3.20 นั้น จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่ขึ้นกับความยาวคลื่นและมุมตกกระทบ โดยหาได้จากสมการที่ 3.21

$$\rho(\theta, \lambda) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_\lambda \cos \theta - \cos \phi}{n_\lambda \cos \theta + \cos \phi} \right)^2 + \left(\frac{n_\lambda \cos \phi - \cos \theta}{n_\lambda \cos \phi + \cos \theta} \right)^2 \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ n_λ = ดัชนีการหักเหของรังสีที่แปรตามความยาวคลื่น (Index of refraction)

และความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมของการหักเหของรังสีสามารถหาได้โดย สมการที่ 3.22

$$\sin \theta = n_\lambda \cdot \sin \phi \quad (3.22)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากสมการที่ 3.21 โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.23

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (3.23)$$

ในการคำนวณหาค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก และการสะท้อนรังสีของกระจก ในสมการที่ 3.19 และ 3.20 นั้น จำเป็นต้องทราบค่า n_λ และ α_λ ซึ่งสามารถหาค่าดัชนีของการหักเหของรังสีได้โดยแทนค่ามุมตกกระทบที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) ในสมการที่ 3.21 แล้วแก้สมการจะได้เป็น

$$n_\lambda = \frac{1 + \sqrt{\rho_\lambda(0)}}{1 - \sqrt{\rho_\lambda(0)}} \quad (3.24)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α_λ) สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการที่ 3.19 , 3.20 และ 3.21 โดยแทนค่ามุมตกกระทบที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) จะได้เป็น

$$\alpha_\lambda = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{R_\lambda(0) - \rho_\lambda(0)}{\rho_\lambda(0) \cdot T_\lambda(0)} \right) \quad (3.25)$$

และเพื่อที่จะสามารถแก้สมการที่ 3.24 และ 3.25 ได้ จำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) โดยการใช้สมการที่ 3.19 และ 3.20 ซึ่งจะได้เป็นสมการที่ 3.26

$$\rho_\lambda(0) = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_\lambda(0)) \cdot R_\lambda(0)}}{2(2 - R_\lambda(0))} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$\beta = T_\lambda(0)^2 - R_\lambda(0)^2 + 2R_\lambda(0) + 1 \quad (3.27)$$

โดยที่ค่า $T_\lambda(0)$ และ $R_\lambda(0)$ เป็นข้อมูลจากการตรวจวัดค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการสะท้อนรังสีที่ตำแหน่งตั้งฉากของผู้ผลิตกระจก แต่ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของคุณสมบัติทาง optical ที่ขึ้นกับความยาวคลื่น จะใช้ค่าความยาวคลื่นเฉลี่ยในแต่ละช่วง โดยในช่วงของ Solar spectrum จะใช้ $\lambda = 898$ นาโนเมตร และในช่วงของ Visible spectrum จะใช้ $\lambda = 575$ นาโนเมตร

3.3.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)

การหาคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่เคลือบผิวจะทำให้ลักษณะของการสะท้อนรังสีภายในเนื้อกระจกเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้ง ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลของการตรวจวัดเพิ่มเติมจากข้อมูลที่ได้ในตำแหน่งตั้งฉากเพียงอย่างเดียว แต่เครื่องมือและขั้นตอนของการตรวจวัดยังไม่ได้จัดทำเป็นรูปแบบมาตรฐาน ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าแบบสมการเส้นถดถอยพหุนามกำลังสี่ของ Finlayson [10] ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดของค่าการส่งผ่านรังสีที่ตำแหน่งตั้งฉากในการพิจารณา

โดยเงื่อนไขของ Finlayson จะกำหนดไว้ว่า ถ้าค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($T(0)$) มีค่ามากกว่า 0.645 กระจกชนิดนั้นจะใช้แบบจำลองของกระจกใสสำหรับการคำนวณ แต่ถ้ากระจกมีค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645 กระจกชนิดนั้นจะใช้แบบจำลองของกระจก Bronze glass คำนวณ ซึ่งแบบจำลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสี ($\tau(\theta)$) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี ($\rho(\theta)$) ที่แปรตามมุมตกกระทบ สำหรับกระจกใสและกระจก Bronze glass สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.28 และสมการที่ 3.29

$$\bar{\tau}(\theta) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cos(\theta) + \bar{\tau}_2 \cos(\theta)^2 + \bar{\tau}_3 \cos(\theta)^3 + \bar{\tau}_4 \cos(\theta)^4 \quad (3.28)$$

$$\bar{\rho}(\theta) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cos(\theta) + \bar{\rho}_2 \cos(\theta)^2 + \bar{\rho}_3 \cos(\theta)^3 + \bar{\rho}_4 \cos(\theta)^4 - \bar{\tau}(\theta) \quad (3.29)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์พหุนาม (polynomial coefficient) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี ที่อยู่ทางด้านขวามือในสมการที่ 3.28 และ 3.29 ที่ได้จากการวิจัยของ Finlayson [12] นั้น สามารถแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์พหุนามจากสมการที่ 3.28 และ 3.29

คุณสมบัติ	ตัวห้อย 0	ตัวห้อย 1	ตัวห้อย 2	ตัวห้อย 3	ตัวห้อย 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
$\bar{\tau}_{brn^{**}}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599
$\bar{\rho}_{brn}$	0.997	-1.868	6.513	-7.862	3.225

* สัญลักษณ์ตัวห้อย clr หมายถึงคุณสมบัติที่ใช้แบบจำลองของกระจกชนิด clear glass

** สัญลักษณ์ตัวห้อย brn หมายถึงคุณสมบัติที่ใช้แบบจำลองของกระจกชนิด bronze glass

ดังนั้น ค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการสะท้อนรังสีของกระจกเคลือบสีที่แปรตามมุมตกกระทบต่างๆ สามารถหาได้ตามสมการที่ 3.30 ถึง 3.33

สำหรับกรณี $T(0) > 0.645$

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{clr}(\theta) \quad (3.30)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{clr}(\theta)) + \bar{\rho}_{clr}(\theta) \quad (3.31)$$

สำหรับกรณี $T(0) \leq 0.645$

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{brn}(\theta) \quad (3.32)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{brn}(\theta)) + \bar{\rho}_{brn}(\theta) \quad (3.33)$$

3.3.3 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติ optical ของกระจกเชิงครึ่งทรงกลม (hemispherical values, $P_{\cap}$)

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกในช่วงครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัมซึ่งเป็นค่าอัตราคุณสมบัติทาง optical ในทุกทิศทางต่อความยาวคลื่นหนึ่งหน่วย ก็เพื่อที่จะนำค่าดังกล่าวไปใช้สำหรับการคำนวณค่าในส่วนของรังสีกระจายที่ผ่านหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.34

$$P_{\cap} = 2 \int_0^{90^\circ} P(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (3.34)$$

เมื่อ P = คุณสมบัติทาง optical ของกระจก

θ = มุมตกกระทบของรังสีที่วัดจากระนาบแนวนอน ($\theta = 0$ องศา) จนถึง ระนาบแนวตั้ง ($\theta = 90$ องศา)

3.3.4 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกหลายชั้น

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกหลายชั้นที่แปรตามความยาวคลื่นแสงและมุมตกกระทบ สามารถคำนวณได้ โดยใช้การคำนวณตามวิธีการของ Rubin [17] ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3.35 ถึง 3.37

$$T_{i,j}(\lambda) = \frac{T_{i,j-1}(\lambda) T_{j,j}(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.35)$$

$$R_{i,j}^f(\lambda) = R_{i,j-1}^f(\lambda) + \frac{(T_{i,j-1}(\lambda))^2 \cdot R_{j,j}^f(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.36)$$

$$R_{j,i}^b(\lambda) = R_{i,j-1}^b(\lambda) + \frac{(T_{i,j-1}(\lambda))^2 \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.37)$$

เมื่อ

- $T_{i,j}$ = ค่าการส่งผ่านรังสีจากกระจกชั้นที่ i ถึงกระจกชั้นที่ j
 $R_{i,j}$ = ค่าการสะท้อนรังสีจากกระจกชั้นที่ i ถึงกระจกชั้นที่ j
 λ = ค่าความยาวคลื่น, nm
 f = คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหน้าของกระจก
 b = คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหลังของกระจก

และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก (A_j) แต่ละชั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.38 ถึง 3.40

$$A_j(\lambda) = \frac{T_{1,j-1}(\lambda) \cdot A_j^f(\lambda)}{1 - R_{j,N}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,1}^b(\lambda)} + \frac{T_{1,j}(\lambda) \cdot R_{j+1,N}^f(\lambda) \cdot A_j^b(\lambda)}{1 - R_{j,1}^b(\lambda) \cdot R_{j+1,N}^f(\lambda)} \quad (3.38)$$

$$A_j^f(\lambda) = 1 - T_{j,j}(\lambda) - R_{j,j}^f(\lambda) \quad (3.39)$$

$$A_j^b(\lambda) = 1 - T_{j,j}(\lambda) - R_{j,j}^b(\lambda) \quad (3.40)$$

- เมื่อ A_j = ค่าการดูดรังสีของกระจกชั้นที่ j
 i,j = กระจกชั้นที่ i หรือ ชั้นที่ j
 f = คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหน้าของกระจก
 b = คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหลังของกระจก
 N = จำนวนชั้นของกระจก

3.3.5 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical รวม

การหาคุณสมบัติทาง optical รวม (Total) ของกระจก ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น เป็นการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นเฉลี่ยด้วย spectral weighting function ของแต่ละความยาวของช่วงความยาวคลื่นนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.41

$$P_x = \frac{\int_a^b P(\lambda) \cdot \Phi_x(\lambda) \cdot \Gamma_x(\lambda) d\lambda}{\int_a^b \Phi_x(\lambda) \cdot \Gamma_x(\lambda) d\lambda} \quad (3.41)$$

- เมื่อ P = คุณสมบัติทาง optical รวมที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในแต่ละช่วงคลื่น
 Φ = Spectral weighting function

Γ = Auxiliary function

a = เขตจำกัดล่างของการอินทิเกรตในแต่ละช่วงคลื่น

b = เขตจำกัดบนของการอินทิเกรตในแต่ละช่วงคลื่น

x ใช้แสดงช่วงของการเฉลี่ยว่าอยู่ในช่วง visible ,solar หรือ infrared

สำหรับค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณคุณสมบัติทาง Optical ในแต่ละช่วงคลื่นตามสมการที่ 3.41 สามารถหาได้จากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกในช่วงความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ

X ช่วงการอินทิเกรต	P คุณสมบัติ	a เขตจำกัดล่าง ของช่วงความ ยาวคลื่น (ไมครอน)	b เขตจำกัดของ ช่วงความยาว คลื่น (ไมครอน)	Φ_x Weighting Function	Γ_x Auxiliary Function
Solar	T,R,A	0.32	2.5	[ISO 9845 ASTM 891] ¹	1.0
Visible	T,R	0.32	0.78	[ISO 9845 ASTM 891]	[ISO/CIE 10527] ²
Thermal	T,R	5.0	50.0	Planck's Function ^{**}	1.0

1. ค่า Solar weighting function จากมาตรฐาน ASTM E-891 ปี ค.ศ.1987 [12] ,ตารางที่ 1 โดยใช้ค่ามวลอากาศเท่ากับ 1.5
2. ค่า Auxiliary function จากมาตรฐาน CIE ปี ค.ศ. 1990 [11] ,ตารางที่ 1

$$^{**} \text{ Planck's Function : } E(\lambda) = 2\pi c_1 \lambda^{-5} (\exp(c_2 / \lambda \Theta) - 1)^{-1}$$

$$\text{เมื่อ } c_1 = 0.59544 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 / \text{m}^2, c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K} \text{ และ } \Theta = 300 \text{ K}$$

3.3.6 การคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม

สำหรับการคำนวณคุณสมบัติทาง Optical ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Rubin [16] โดยจำเป็นต้องทราบข้อมูลทาง Optical ของหน้าต่างกระจกตัวเปล่าและ

คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้จากการตรวจวัดที่ตำแหน่งตั้งฉาก โดยในขั้นแรกจำเป็นต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของกระจกตัวเปล่าซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.42 ถึง 3.45

$$r_s = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_s) \cdot R_s}}{2 \cdot (2 - R_s)} \quad (3.42)$$

เมื่อ r_s = สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีของกระจก

โดยที่

$$\beta = T_s^2 - R_s^2 + 2R_s + 1 \quad (3.43)$$

และ
$$a_s = \frac{R_s - r_s}{r_s T_s} \quad (3.44)$$

$$t_s = 1 - r_s \quad (3.45)$$

เมื่อ a_s = สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีของกระจก

t_s = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของกระจก

เนื่องจากกระจกชนิดที่พิจารณาจะมีค่าคุณสมบัติการสะท้อนที่ผิวด้านหน้าและที่ผิวด้านหลังเท่ากัน ($R_s^f = R_s^b$) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังจึงมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.46

$$r_s^f = r_s^b \quad (3.46)$$

โดยที่ T_s = ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกตัวเปล่า
 R_s^f = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของกระจกตัวเปล่า
 R_s^b = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหลังของกระจกตัวเปล่า
 t_s = ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของกระจกตัวเปล่า
 r_s^f = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีด้านหน้าของกระจกตัวเปล่า
 r_s^b = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีด้านหลังของกระจกตัวเปล่า
 a_s = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของกระจกตัวเปล่า

เนื่องจากกระจกติดฟิล์มจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทาง optical ของเนื้อกาว (adhesive) ที่ใช้ยึดระหว่างฟิล์มและตัวกระจก เนื้อกาวดังกล่าวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีของเนื้อกาว

ด้านหน้าและด้านหลังเท่ากัน ($r_a^f = r_a^b$) และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวกระจก โดยคุณสมบัติดังกล่าวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.47 ถึง 3.49

$$r_s^f = r_a^f \quad (3.47)$$

$$r_a^b = 1 - t_a \quad (3.48)$$

และ $a_a \approx 1 \quad (3.49)$

ขั้นตอนต่อไปจำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติของสารที่เคลือบกับตัวเนื้อฟิล์ม ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.50 ถึง 3.52 โดยสัญลักษณ์ตัวห้อย c หมายถึงคุณสมบัติของสารเคลือบ

$$r_c^b = \frac{R_f - r_a^f}{a_a^{f2} (t_a^2 + R_f r_a^b)} \quad (3.50)$$

$$t_c^f = \frac{T_f (1 - a_a^{f2} r_a^b r_c^b)}{a_a^f t_a} \quad (3.51)$$

$$r_c^f = R_f - \frac{a_a^{f2} t_c^2 r_a^b}{1 - a_a^{f2} r_c^b r_c^b} \quad (3.52)$$

ดังนั้นคุณสมบัติของกระจกติดฟิล์มสามารถหาค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.53 ถึง 3.55

$$T_{Ap} = \frac{a_a^f a_s^f t_s t_c}{1 - a_a^{f2} a_s^{f2} r_s^b r_c^b} \quad (3.53)$$

$$R_{Ap}^f = r_s^f + \frac{a_a^{f2} a_s^{f2} t_s^2 r_s^b}{1 - a_a^{f2} a_s^{f2} r_s^b r_c^b} \quad (3.54)$$

$$R_{Ap}^b = r_c^f + \frac{a_a^{f2} a_s^{f2} t_s^2 r_s^b}{1 - a_a^{f2} a_s^{f2} r_s^b r_c^b} \quad (3.55)$$

โดยที่

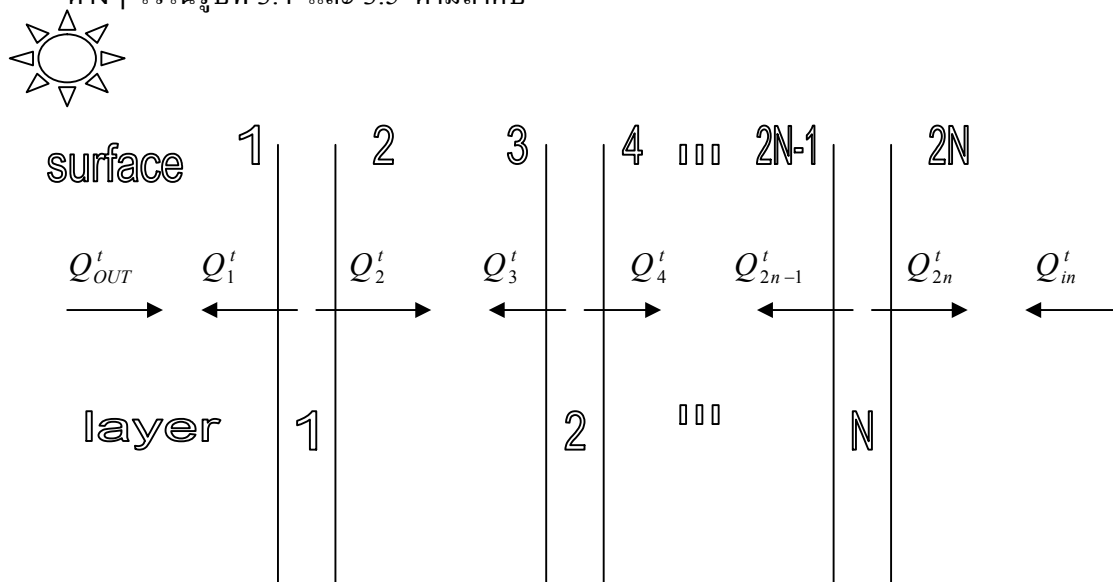
- T_f = ค่าการส่งผ่านรังสีของฟิล์มตัวเปล่า
- R_f^f = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของฟิล์มตัวเปล่า
- R_f^b = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหลังของฟิล์มตัวเปล่า
- T_{Ap} = ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกติดฟิล์มตัวเปล่า
- R_{Ap} = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของกระจกติดฟิล์มตัวเปล่า

R_{Ap}^b = ค่าการสะท้อนรังสีด้านหลังของกระจกติดฟิล์มตัวเปล่า

3.4 วิธีการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกตามวิธี Window 4.1

เนื่องจากการหาค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน และการหาค่าการส่งความร้อนผ่านกระจก นั้น จำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกและอุณหภูมิที่ผิวของกระจกทั้งด้านนอกและด้านในมาทำการคำนวณ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในกระจกแบบชนิดต่างๆ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกโดยอ้างอิงกับวิธีที่ใช้ในโปรแกรม Window 4.1

การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของหน้าต่างกระจกสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีการสมดุลความร้อนในแต่ละชั้นของกระจก ใน 1 มิติ ของ Finlayson [10] โดยจะกำหนดสถานะแวดล้อมให้มีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่พิจารณา และกำหนดให้เป็นสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งจะแบ่งชั้นกระจกเป็นจุดต่อเชื่อมกัน โดยในแต่ละชั้นของกระจกจะประกอบไปด้วย 3 จุดต่อ คือที่ผิวแต่ละด้านและบริเวณจุดตรงกลางของกระจก ซึ่งแสดงลักษณะการสมดุลความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกที่จุดต่อต่างๆ ไว้ในรูปแบบที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การสมดุลความร้อนของหน้าต่างกระจกจำนวน N ชั้น

เมื่อ Q^t เป็นค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อน) ที่แต่ละผิวของกระจก ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.56

$$Q^t = Q^c + Q^r + Q^k \quad (3.56)$$

เมื่อ

$$Q^c = \text{ค่าการพาความร้อนต่อพื้นที่, W/m}^2$$

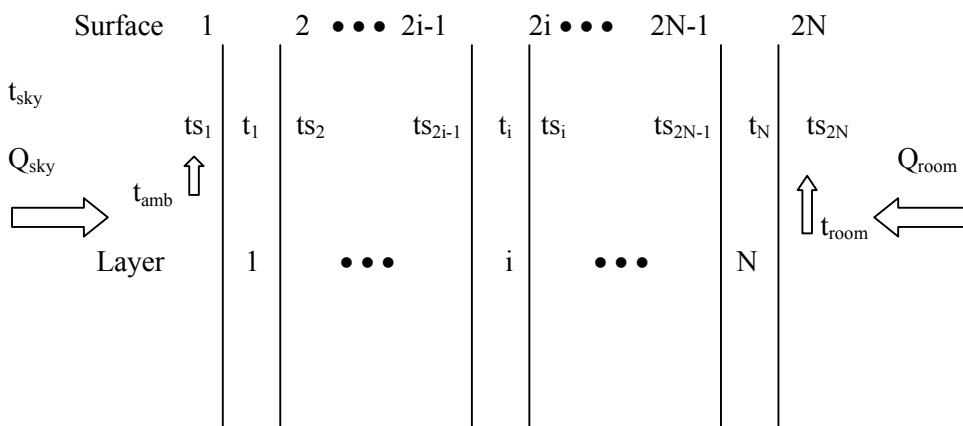
$$Q^r = \text{ค่าการแผ่รังสีความร้อนต่อพื้นที่, W/m}^2$$

$$Q^k = \text{ค่าการนำความร้อนต่อพื้นที่, W/m}^2$$

จากรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการการสมดุลความร้อนในแต่ละชั้นของกระจกได้ โดยกำหนดให้ความร้อนที่ไหลออกมีค่าเป็นบวก และความร้อนที่ไหลเข้ามีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.57

$$0 = Q_{2n-1}^r + Q_{2n}^r - Q_{2n-2}^r - Q_{2n+1}^r + Q_{2n-1}^c + Q_{2n}^c - Q_{2n-2}^c - Q_{2n+1}^c + Q_{2n-1}^k + Q_n^k - Q_{n+1}^k - A_n \cdot Q_{sky} \quad (3.57)$$

โดยสัญลักษณ์ด้วย r,c,k ใช้แทน การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อน ตามลำดับ และ n ใช้แทนจำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก A ใช้แทนค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก และ Q_{sky} เป็นรังสีที่ตกกระทบบนกระจก



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของจุดต่อต่างๆ ของอุณหภูมิและค่า heat flux ซึ่งใช้หาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก

จากรูปที่ 3.5 ที่บริเวณด้านนอกของกระจกจะมีฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนมาจากด้านนอกคือ Q_{sky} ซึ่งเป็นค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนกระจกและมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวด้านในคือ Q_{room} โดยที่บริเวณผิวด้านนอกของกระจก จะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยบังคับและส่วนที่บริเวณผิวด้านในของกระจกจะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ และสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จะกำหนดให้สภาวะของสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่และเป็นสภาวะสม่ำเสมอ

(steady state) ซึ่งจะทำให้ผลรวมของความร้อนที่จุดต่อใดๆ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 3.57 ให้อยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิได้เป็น

$$Q_i = \frac{(t_i - t_{i-1})}{R_i} + \frac{(t_i - t_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs_i} = 0 \quad (3.58)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} t_i &= \text{อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของชั้นกระจกที่ } i \\ R_i &= \text{thermal resistance ระหว่างจุดกึ่งกลางทั้งสอง โดยรวมผลของการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน} \\ Q_{abs_i} &= \text{ปริมาณของฟลักซ์ความร้อนที่ตกกระทบและถูกดูดกลืน โดยชั้นของกระจก, W/m}^2 \text{ ซึ่งมีค่าเท่ากับ } A_i^{sol} Q_{sky} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_i^{sol} &= \text{ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ของกระจกชั้นที่ } i \\ Q_{sky} &= \text{ค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ, W/m}^2 \end{aligned}$$

สำหรับขั้นตอนแรกในการแก้สมการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจก จำเป็นต้องสมมุติค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางและที่ผิวของกระจกทั้งสองด้าน โดยให้ค่าการกระจายของอุณหภูมิกระจกมีลักษณะเชิงเส้นตรง โดยเริ่มต้นจากจุดอุณหภูมิด้านนอกจนถึงอุณหภูมิด้านใน หลังจากนั้นทำการสมดุลความร้อนในส่วนของการแผ่รังสีความร้อน (Q_i^r) ระหว่างผิวของหน้าต่างกระจกในแต่ละชั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.59 และ 3.60 เป็น

$$Q_{2n}^r = S_{2n}^r + R_{2n} Q_{2n+1}^r + T_{2n} Q_{2n-2}^r \quad (3.59)$$

$$Q_{2n-1}^r = S_{2n-1}^r + R_{2n} Q_{2n-2}^r + T_{2n} Q_{2n+1}^r \quad (3.60)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} S_i^r &= \text{พลังงานความร้อนที่เปล่งรังสีคลื่นยาวจากผิวกระจกที่ } i = \sigma \cdot \varepsilon \cdot t_s^4 \\ R_i &= \text{ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนของผิวหน้าต่างกระจกที่ } i \\ T_i &= \text{ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นที่ } i \\ n &= \text{จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก} \end{aligned}$$

จากสมการ ที่ 3.59 และ 3.60 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทาง matrix ขนาด $2N \times 2N$ ได้ตามสมการที่ 3.61

$$M_{ij} Q_i^r = Y_j \quad (3.61)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} M_{ii} &= 1 \\ M_{2i-1, 2i-2} &= -R_{i,i}^f \\ M_{2i-1, 2i+1} &= M_{2i, 2i-2} = -T_{i,i} \\ M_{2i, 2i+1} &= -R_{i,i}^b \end{aligned} \quad (3.62)$$

และ

$$\begin{aligned} Y_1 &= \sigma \varepsilon_1 t_{s1}^4 + R_{1,1}^f Q_{sky}^r \\ Y_2 &= \sigma \varepsilon_1 t_{s2}^4 + T_{1,1} Q_{sky}^r \\ Y_{2i-1} &= \sigma \varepsilon_{2i-1} t_{s2i-1}^4 \\ Y_{2i} &= \sigma \varepsilon_{2i} t_{s2i}^4 \\ Y_{2N-1} &= \sigma \varepsilon_{2N-1} t_{s2N-1}^4 + T_{N,N} Q_{room}^r \\ Y_{2N} &= \sigma \varepsilon_{2N} t_{s2N}^4 + R_{N,N}^b Q_{room}^r \end{aligned} \quad (3.63)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} i &= \text{ลำดับชั้นกระจกที่ } i, \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \\ j &= \text{ลำดับชั้นกระจกที่ } j, \text{ เมื่อ } j = 1, 2, \dots, n \\ n &= \text{จำนวนชั้นของกระจก} \\ N &= \text{จำนวนผิวของกระจก } (N = 2 \times n) \end{aligned}$$

$$Q_{sky}^r = \sigma \varepsilon_{sky} t_{sky}^4 \quad (3.64)$$

$$Q_{room}^r = \sigma t_{room}^4 \quad (3.65)$$

ดังนั้นสามารถหาคำตอบของ Q_i^r ได้โดยนำค่า $M_{i,i}^{-1}$ คูณสมการที่ 3.63 จะได้ตามสมการที่ 3.66

$$Q_i^r = (M_{ij})^{-1} Y_j \quad (3.66)$$

3.4.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

เมื่อแก้สมการที่ (3.66) แล้วก็จะได้ค่าความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของผิวกระจก Q_i^r ที่คำนวณได้ไปคำนวณหาค่าของสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ผิวภายนอกและภายใน รวมทั้งที่บริเวณ gaps

โดยนำค่าแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิผิวกระจกและค่าอุณหภูมิอากาศไปหาร ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.67 ถึง 3.69

$$hr_{out} = (Q_{sky}^r - Q_1^r) / (t_{sky} - t_{s1}) \quad (3.67)$$

$$hr_{in} = (Q_{2N}^r - Q_{room}^r) / (t_{s2N} - t_{room}) \quad (3.68)$$

$$hr_{gap_i} = (Q_{2i}^r - Q_{2i+1}^r) / (t_{s2i} - t_{s2i+1}) \quad (3.69)$$

เมื่อ hr_{out} = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีภายนอก, W/m^2K^4
 hr_{in} = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีภายใน, W/m^2K^4
 $hr_{gap,i}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีภายในช่องว่างระหว่างกระจกช่องว่างที่ i ,
 W/m^2K^4

3.4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายใน (h_{in})

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายในจะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวของผนังภายในและอุณหภูมิของอากาศในห้อง รวมทั้งลักษณะการเอียงตัวของกระจก ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Arasteh [6] ตามสมการที่ 3.70

$$h_{in} = 1.77 \cdot (|t_{s2N} - t_{room}|)^{0.25} \quad (3.70)$$

สำหรับค่า h_{in} ที่มุมเอียงใด 90° 45° และ 0° สามารถหาได้จากตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและผิวกระจกที่แปรตาม การเอียงตัวของกระจก

ϕ	$h_{in} (W / m^2 K)$
90	3.0415502
45	2.2477496
0	0.943649

3.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายนอก (h_{out})

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายนอกจะขึ้นกับความเร็วลมและทิศทางของลมเมื่อเทียบกับการวางตัวของหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Arasteh [6] ตามสมการที่ 3.71 ถึง 3.73

สำหรับด้านหน้าของอาคาร ($|\phi < \pi/2|$)

$$\text{เมื่อ } V > 2 \text{ m/s} \quad h_{out} = 8.07V^{0.605} \quad (3.71)$$

$$\text{เมื่อ } V < 2 \text{ m/s} \quad h_{out} = 12.27 \quad (3.72)$$

เมื่อ

V = ความเร็วลมภายนอก, m/s

h_{out} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายนอก, W/m²K

สำหรับด้านหลังอาคาร ($|\phi \geq \pi/2|$)

$$h_{out} = 18.64(0.3 + 0.05v)^{0.605} \quad (3.73)$$

3.4.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ช่องว่างอากาศระหว่างชั้นหน้าต่างกระจก (gaps)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ gaps จะรวมผลของการนำและการพาความร้อน ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.74

$$h_s = k \cdot Nu / \omega \quad (3.74)$$

เมื่อ

h_s = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ช่องว่างอากาศระหว่างชั้นกระจก, W/m²K

k = ค่า thermal conductivity ของก๊าซที่อยู่ภายใน gap, W/m·K

ω = ความกว้างของ gap, m

Nu = ค่า Nusselt number

โดยที่

$$Nu = \left[1 + (0.0303Ra^{0.402})^{11} \right]^{0.091} \quad \text{สำหรับ } Ra < 2 \times 10^5 \quad (3.75)$$

Ra = ค่า Rayleigh number ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.76 เป็นผลคูณระหว่างค่า Gr

และ Pr

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.76)$$

เมื่อ

Pr = ค่า Prandtl number

Gr = ค่า Grashoff number

$$\text{โดยที่ } Gr = \frac{g\beta\rho^2\omega^3\Delta t}{\mu^2} \quad (3.77)$$

$$\begin{aligned}
g &= \text{ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก } 9.81 \text{ m/s}^2 \\
\mu &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์หนืดจลน์ของก๊าซ, kg·m/s} \\
\beta &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซเชิงความร้อน, 1/K} \\
\rho &= \text{ค่าความหนาแน่นของอากาศ, kg/m}^3 \\
\Delta t &= \text{ค่าอุณหภูมิผิวกระจกแตกต่างระหว่างชั้นกระจก, K}
\end{aligned}$$

สำหรับค่าของ Nusselt number ที่มุมเอียงใดๆ หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Elsherbiny [11] ตามสมการที่ 3.78

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \phi} \right] \cdot \left(1 - \frac{(\sin 1.8\phi)^{1.6} 1708}{Ra \cos \phi} \right) + \left[\left(\frac{Ra \cos \phi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (3.78)$$

เมื่อ ϕ = มุมการเอียงตัวของหน้าต่างกระจก, Degree

3.4.5 การคำนวณหาความต้านทานความร้อนที่ผิวภายนอกภายใน และที่ช่องอากาศระหว่างชั้นกระจก

ความต้านทานความร้อนที่ผิวกระจกจะประกอบด้วย 3 ลักษณะด้วยกันคือ ความต้านทานพื้นผิวที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอก ความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายใน และความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวที่สัมผัสกับก๊าซที่อยู่ภายใน gap

สำหรับผิวที่ 1 ของกระจกชั้นที่ 1 ซึ่งสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอก สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.79 ถึง 3.81

$$Rh_1 = 1 / (hc_{out} + hr_{out}) \quad (3.79)$$

$$Rk_1 = 0.5w_1 / k_1 \quad (3.80)$$

$$R_1 = Rh_1 + Rk_1 \quad (3.81)$$

เมื่อ

$$hc_{out} = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก, W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$hr_{out} = \text{สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนภายนอก, W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$Rh_1 = \text{สัมประสิทธิ์การต้านทานการพาความร้อนรวมภายนอก, m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$Rk_1 = \text{สัมประสิทธิ์การต้านทานการนำความร้อนรวมภายนอก, m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$w_i = \text{ความหนากระจกชั้นที่ } i, \text{m}$$

สำหรับผิวที่ 2N ของกระจกชั้นที่ N ซึ่งสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายใน สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.82 ถึง 3.84

$$Rh_N = 1 / (hc_{in} + hr_{in}) \quad (3.82)$$

$$Rk_N = 0.5w_{in} / k_{in} \quad (3.83)$$

$$R_N = Rh_{in} + Rk_{in} \quad (3.84)$$

เมื่อ

hc_{in} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใน, $W/m^2 \cdot K$

hr_{in} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนภายใน, $W/m^2 \cdot K$

Rh_N = สัมประสิทธิ์การต้านทานการพาความร้อนรวมภายใน, $m^2 \cdot K/W$

Rk_N = สัมประสิทธิ์การต้านทานการนำความร้อนรวมภายใน, $m^2 \cdot K/W$

w_{in} = ความหนากระจกชั้นใน, m

สำหรับสภาวะแวดล้อมภายใน gap สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ใช้สมการที่ 3.85 ถึง 3.87

$$Rh_i = 1 / (hc_{gap_i} + hr_{gap_i}) \quad (3.85)$$

$$Rk_i = 0.5w_i / k_i + w_{i+1} / k_{i+1} \quad (3.86)$$

$$R_i = Rh_{gap_i} + Rk_{gap_i} \quad (3.87)$$

hc_{gap_i} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่องว่างอากาศระหว่างกระจกช่องว่างที่ i, $W/m^2 \cdot K$

hr_{gap_i} = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในช่องว่างอากาศระหว่างกระจกช่องว่างที่ i, $W/m^2 \cdot K$

เมื่อทำการหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดของกึ่งกลางกระจกทั้งหมดได้แล้ว นำค่าดังกล่าวและค่าอุณหภูมิเริ่มต้น รวมทั้งค่า Q_{abs_i} ในแต่ละชั้นของกระจกไปแทนลงในสมการที่ 3.58 ก็จะได้ค่า Δ_i ซึ่งเรียกว่า residual ซึ่งได้จากสมการที่ 3.88

$$\Delta_i = \frac{(t_i - t_{i-1})}{R_i} + \frac{(t_i - t_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs_i} \quad (3.88)$$

โดยค่า Δ_i ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละชั้นของกระจกมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ จะถือว่าเป็นจุดที่มีการสมดุลความร้อนเกิดขึ้น แต่ถ้ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ก็จะถือว่ายังไม่มีสมดุลความร้อน

3.4.6 การคำนวณอุณหภูมิผิวกระจก (t_s)

อุณหภูมิของผิวกระจกตามการคำนวณของโปรแกรม WINDOW 4.1 [11] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.89 ถึง 3.92

สำหรับผิวชั้นนอก

$$t_{s1} = (t_1 / R_{k_1} - t_{out} / R_{h_1}) / (1 / R_{k_1} + 1 / R_{h_1}) \quad (3.89)$$

สำหรับผิวกระจกชั้นใน

$$t_{sN} = (t_N / R_{k_N} - t_{room} / R_{h_N}) / (1 / R_{k_N} + 1 / R_{h_N}) \quad (3.90)$$

สำหรับผิวที่เหลือของชั้นกระจกที่ i สามารถหาได้โดย

$$t_{s2i-1} = (t_i / R_{k_i} - t_{s2i} / R_{h_{i+1}}) / (1 / R_{k_i} + 1 / R_{h_{i+1}}) \quad (3.91)$$

$$t_{s2i} = (t_{i+1} / R_{k_{i+1}} - t_{s2i-1} / R_{h_{i+1}}) / (1 / R_{k_{i+1}} + 1 / R_{h_{i+1}}) \quad (3.92)$$

เมื่อ

t_i = ค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกของชั้นกระจกที่ i , K

t_s = ค่าอุณหภูมิผิวกระจก, K

t_{out} = ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, K

t_{room} = ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, K

R_{k_i} = ค่าความต้านทานการนำความร้อนของกระจกชั้นที่ i , $m^2 \cdot K/W$

R_{h_i} = ค่าความต้านทานการพาความร้อนของกระจกชั้นที่ i , $m^2 \cdot K/W$

หลังจากที่คำนวณค่าของอุณหภูมิผิวกระจกใหม่ได้แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าของเก่า ถ้าค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองอุณหภูมิมีค่าเกิน 0.01 จะต้องทำการคำนวณซ้ำ โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่คำนวณได้ใหม่นี้ เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ และย้อนทำการคำนวณหาอุณหภูมิผิวใหม่นวนกว่าค่าตอบจะลู่เข้า

หากค่าตอบยังไม่ลู่เข้าก็จำเป็นต้องเริ่มทำการคำนวณใหม่ ซึ่งจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกใหม่ โดยนำค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกเก่ามาบวกกับค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก ซึ่งจะหาได้จากกราฟของค่า Δ_t ที่ได้จากสมการที่ 3.74 เทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกโดยสามารถเขียนได้เป็น

$$t_k = t_k^0 + \delta t_k \quad (3.93)$$

เมื่อ

t_k = ค่าของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก, K

t_k^0 = ค่าของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกที่ได้จากการประมาณครั้งก่อน, K

$$\delta t_k = -[\partial \Delta_k / \partial t_j]^{-1} \times \Delta_j^0 \quad (3.94)$$

เมื่อ

Δ_k = ค่าความแตกต่างของการสมดุลความร้อนที่กึ่งกลางกระจกที่ k เมื่อ $k = 1, \dots, n$

Δ_j = ค่าความแตกต่างของการสมดุลความร้อนที่ผิวกระจกที่ j เมื่อ $j = 1, \dots, n$

0 = แสดงสัญลักษณ์ของค่าที่ได้จากการคำนวณครั้งก่อน

ถ้าค่าของ δt_k มีค่ามากกว่าค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนสูงสุดจากการประมาณในครั้งก่อน จะแทนค่า δt_k ด้วย $0.5 \delta t_k$ ลงในสมการที่ (3.94) ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการแกว่งของคำตอบ

3.5 การคำนวณค่าปริมาณรังสีแสงอาทิตย์

ปริมาณแสงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ รังสีแสงอาทิตย์แบบตรง (Direct Solar Radiation) ที่เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และ อีกประเภทคือ รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (Diffuse Solar Radiation) ที่เกิดจากการกระจัดกระจายของรังสีเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์กระทบกับไอน้ำหรือก้อนเมฆในชั้นบรรยากาศ และผลรวมของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวระนาบเรียกว่า รังสีแสงอาทิตย์แบบรวม (Global Solar Radiation) ซึ่งสามารถแสดงได้เป็น

$$I_{toth} = I_{DN} \cdot \cos \theta_z + I_{diffh} \quad (3.106)$$

เมื่อ

I_{toth} = ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบกับพื้นผิวในแนวนอน, W/m²

I_{DN} = ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงตั้งฉากที่ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับรังสีของดวงอาทิตย์, W/m²

I_{diffh} = ค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบกับพื้นผิวในแนวราบ, W/m²

θ_z = ค่ามุม zenith ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีจากดวงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิว, Degree

ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จำเป็นต้องทราบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับพื้นผิวของหน้าต่างกระจก ซึ่งลักษณะการติดตั้งของหน้าต่างกระจกโดยส่วนใหญ่จะติดตั้งในลักษณะอยู่ในแนวดิ่ง แต่ข้อมูลรังสีที่ได้จากการตรวจวัดส่วนใหญ่มักเป็นข้อมูลของรังสี

แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่วางตัวอยู่ในแนวนอน ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวนอนไปเป็นค่ารังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวตั้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ในบทที่ 2 และการคำนวณหารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวตั้งโดยรวมซึ่งจะมีทั้งผลจากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.107

$$\frac{I_{dirv}}{I_{dirh}} = \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_z} \quad (2.1)$$

$$I_{totv} = I_{dirh} \cdot \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_z} + I_{diffh} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{toth} \cdot \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.107)$$

เมื่อ

I_{totv} = ค่ารังสีรวมที่ตกกระทบบนพื้นผิวเอียง, W/m^2

I_{dirh} = ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวนอน, W/m^2

I_{diffh} = ค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวนอน, W/m^2

θ_v = มุมตกกระทบบนผนังตั้งฉาก ซึ่งเป็นมุมระหว่างแสงที่ตกกระทบบนและระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิวเอียง, Degree

θ_z = มุม Zenith angle

β = มุมเอียงของพื้นผิว, Degree

ρ_g = ค่าการสะท้อนรังสีของพื้นผิวดิน

3.6 การกำหนดสภาวะอากาศภายนอก

ในการที่จะศึกษาสมรรถนะของวัสดุกรอบอาคารในมุมมองทางด้านพลังงานนั้น สภาวะอากาศภายนอกก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ และจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึง เพราะว่าสภาวะอากาศนั้นจะมีผลโดยตรงต่อการส่งผ่านความร้อนไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสี หรือการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคาร และอาคารชนิดเดียวกันถ้าอยู่ในสภาวะอากาศที่แตกต่างกันก็จะมีค่าการส่งผ่านความร้อน หรือสมรรถนะเชิงความร้อนที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากที่กรอบของอาคารควรมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่เหมาะสมกับสภาวะของอากาศในบริเวณนั้น ๆ

อย่างไรก็ตามค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของกรอบอาคารนี้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อันเป็นผลเนื่องมาจากสภาวะอากาศภายนอกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นั่นเอง และคงจะเป็นการยากอีกเช่นกันที่จะกำหนดและเปรียบเทียบสมรรถนะของอาคารแต่ละชนิดว่าอาคารแต่ละแห่งมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีหรือไม่ในเวลาใด ๆ ที่สภาวะอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลา เพราะถึงแม้ว่า

อาคารเหล่านั้นจะเป็นอาคารที่อยู่ใกล้เคียงกันก็ตามค่าสภาวะอากาศบางตัวกลับมีค่าที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นค่าความเร็วลม หรือค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวอาคาร ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของอาคารซึ่งถูกออกแบบโดยสถาปนิก ที่ตั้งของอาคาร (position) และทิศทาง (orientation) ของตัวอาคารเอง ดังนั้นในการวิเคราะห์สมรรถนะของตัวอาคารนั้นจึงมักจะกำหนดสภาวะอากาศภายนอกมาตรฐานขึ้นเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ โดยในการพัฒนาข้อมูลสภาวะอากาศมาตรฐานนั้นจะอ้างอิงกับสภาวะอากาศในบริเวณนั้น ๆ มาเป็นเกณฑ์ก่อน แล้วจากนั้นจึงนำค่าสภาวะอากาศที่ได้นี้เป็นข้อมูลมาตรฐานเหมือนกับว่าอาคารทุก ๆ อาคารอยู่ภายใต้สภาวะอากาศมาตรฐานนี้แบบเดียวกัน แล้วดูว่าอาคารจะมีสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นอย่างไร เป็นไปตามกฎเกณฑ์ และมีลักษณะที่เอื้อต่อการประหยัดพลังงานหรือไม่ เพื่อที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบเพื่อดูสมรรถนะของอาคารแต่ละประเภท

ในการศึกษานี้จะใช้สภาวะอากาศมาตรฐานของกรุงเทพมหานครที่ได้จากการพัฒนาโดยสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [3] และค่าสภาวะอากาศมาตรฐานที่ได้ประกอบไปด้วย

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบนหน้าต่างกระจกตั้งฉาก = 658 W/m^2 มุมตกกระทบบน 43°

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบนหน้าต่างกระจกตั้งฉาก = 111 W/m^2

ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 35°C

ค่าความเร็วลม = 3.8 m/s

3.7 การแบ่งกลุ่มของฟิล์ม

ตารางที่ 3.5 แสดงถึงกลุ่มฟิล์มทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งเมื่อนำฟิล์มแต่ละกลุ่มไปติดกระจกจะได้กระจกติดฟิล์มกลุ่มที่ 1 จำนวน 288 ชิ้น กระจกติดฟิล์มกลุ่มที่ 2 จำนวน 288 ชิ้น และกระจกติดฟิล์มกลุ่มที่ 3 จำนวน 64 ชิ้น รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์และค่าการดูดกลืนรังสี

ตารางที่ 3.5 กลุ่มฟิล์มทั้ง 3 กลุ่ม

• ฟิล์มกลุ่มที่ 1	• ฟิล์มกลุ่มที่ 2	• ฟิล์มกลุ่มที่ 3
• RE20NEAR_MMM • RE35NEAR_MMM • RE50NEAR_MMM • RE70NEAR_MMM • S35NEAR_MMM	• P18AR_MMM • RE15SIX_MMM • NRMS_CPF • R20-CPF • R50-CPF	• P19AR_MMM • LE30CUAR_MMM • LE35AMAR_MMM • LE50AMAR_MMM •

• N1020G_CPF • N1035G_CPF • N1050G_CPF • NRM_CPF • V58_CPF • V33_CPF • V45_CPF • RE20BRAR_MMM • RE35BRAR_MMM • RE50BRAR_MMM • RE25SLAR_MMM • RE35SLAR_MMM • RE50SLAR_MMM	• V28_CPF • V38_CPF • N1020B_CPF • N1035B_CPF • N1050B_CPF • R15GO_CPF • R15B_CPF • R15BL_CPF • R15G_CPF • NV_15 • NV_25 • NV_35 • NV_45	
--	--	--

3.8 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติตาม และเนื่องจากโปรแกรม WINDOW 4.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะให้ผลเฉลยเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่าอุณหภูมิผิวกระจก ค่า SHGC ที่มุมตกกระทบต่างๆ กัน และค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกในรูปแบบ ไม่ได้บอกค่าที่แปรตามความยาวคลื่นซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์อื่นๆ ในงานวิจัยนี้ จนอาจกล่าวได้ว่าโปรแกรม WINDOW 4.1 ให้ผลเฉลยในส่วนที่เป็นค่าคุณสมบัติทาง optical นั้น ไม่ละเอียดเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะอื่น เนื่องจากกระจกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติทางความร้อนของหน้าต่างกระจกตามวิธีการในโปรแกรม WINDOW 4.1 เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้คือลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งรายละเอียดของโปรแกรม WINDOW 4.1 โปรแกรม OPTIC 5.02 และโปรแกรม DOE 2.1E

3.8.1 ลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

ด้วยเหตุผลความไม่สะดวกในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป WINDOW 4.1 มาประกอบการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นมาใหม่เพื่อสามารถใช้วิธีคำนวณตามโปรแกรม WINDOW 4.1 มาใช้ในการวิเคราะห์และนำผลที่ได้ไปคำนวณ เพื่อหาผลเฉลยตามต้องการเพียงครั้งเดียว ลักษณะของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นตัวโปรแกรมถูกเขียนขึ้นเพื่อทำงานบนโปรแกรม Fortran 90 เหตุผลในการเลือกพัฒนาโปรแกรมบน Fortran 90 เนื่องจากโปรแกรม Fortran เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยงานวิจัยสำหรับสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และมีลักษณะของการประมวลผลที่รวดเร็วโดยเฉพาะการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลจำนวนมาก นอกจากนี้ชุดคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Fortran 90 ง่ายต่อการเข้าใจ และโปรแกรม Fortran 90 จะสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำงานได้ง่าย

ขั้นตอนการแก้ปัญหาของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะมีลักษณะขั้นตอนที่สำคัญดังนี้คือ

1. โปรแกรมเริ่มทำงานโดยการอ่านข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ สภาพอากาศภายนอกและสภาพอากาศภายในห้องที่กำหนด ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสบาย จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความหนาของหน้าต่างกระจก คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกเชิงความร้อนและคุณสมบัติทาง optical แต่ละชั้น ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดจะถูกบรรจุไว้ในแฟ้มข้อมูล [optic.dat และ weather.dat]
2. ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE SUR_TEMP]
3. ทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE CAL_OPTIC]
4. ทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มที่แปรตามมุมตกกระทบ ด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE OPTIC_FILM]
5. ทำการคำนวณหาค่าดัชนีบ่งบอกความสบายเชิงความร้อนของคนที่มีผลจากการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และผลของอุณหภูมิผิวกระจก ด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE CAL_COMFORT]
6. ทำการพิมพ์ผลลัพธ์ ซึ่งได้แก่ ค่าคุณสมบัติทาง optical ที่แปรตามมุมตกกระทบ ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน ค่า mean radiant temperature ค่า PMV และค่า PPD ลงในแฟ้มข้อมูล
7. ทำการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกด้วยโปรแกรมหลัก [WINDOW_COMFORT.F90] โดยคำนึงถึงสถานะแวดล้อมภายนอกและภายในที่กำหนด

3.8.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติที่มีผลต่อความสบายเชิงความร้อนของคนที่อาศัยอยู่ในห้องได้ ลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะทำงานเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกันไม่สามารถข้ามขั้นตอนได้ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์สุดท้าย ส่วนการเชื่อมโยงของข้อมูลระหว่างโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย หรือการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยด้วยกันเองจะเชื่อมโยงโดยการส่งค่าผ่านตัวแปรโดยตรง ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะแสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [3] และเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะขออธิบายหน้าที่และรายละเอียดของโปรแกรมต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นโดยย่อ ดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก WINDOW_COMFORT.F90

โปรแกรม [WINDOW_COMFORT.F90] เป็นโปรแกรมที่บรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆ เพื่อใช้เชื่อมโยงข้อมูลสำหรับการคำนวณระหว่างโปรแกรมย่อยและโปรแกรมหลัก และยังใช้อ่านค่าข้อมูลเบื้องต้นจากแฟ้มข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณซึ่งได้แก่ ค่าสภาวะอากาศภายนอกและสภาวะอากาศภายในห้องที่กำหนด ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสบาย จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความหนาของหน้าต่างกระจก คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกเชิงความร้อนและคุณสมบัติทาง optical แต่ละชั้นของหน้าต่างกระจก

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE SUR_TEMP

มีหน้าที่ในการคำนวณหาอุณหภูมิผิวกระจก ตามวิธีของโปรแกรม WINDOW 4.1 และยังบรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ประกอบการคำนวณในส่วนนี้ โดยจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยอื่น ๆ โดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE CAL_OPTIC

มีหน้าที่ในการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ตามวิธีของโปรแกรม WINDOW 4.1 และยังบรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ประกอบการคำนวณในส่วนนี้ โดยจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยอื่น ๆ โดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE OPTIC_FILM

มีหน้าที่ในการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม ตามวิธีของ Rubin[9] ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยอื่นๆ โดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง

แฟ้มข้อมูล weather.dat

เป็นแฟ้มบรรจุข้อมูลสภาวะอากาศออกแบบภายนอกและภายใน ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบผิวในแนวดิ่ง (W/m^2) ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบผิวในแนวดิ่ง (W/m^2) อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งภายนอก ($^{\circ}\text{C}$) อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งภายใน ($^{\circ}\text{C}$) ความเร็วลมภายนอก (m/s) ทิศทางลม (องศา) มุมเอียงของหน้าต่างกระจก (องศา) เรียงตามลำดับ โดยมีตัวอย่างแฟ้มข้อมูลที่เรียงตามลำดับต่อไปนี้คือ

658.00 111.00 35.00 25.00 3.80 .00 90.00

แฟ้มข้อมูล optic.dat

แฟ้มข้อมูล optic.dat เป็นแฟ้มบรรจุข้อมูลคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้ กล่าวคือ สำหรับบรรทัดแรกจะเป็นชื่อของกระจก จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความกว้างของช่องอากาศกรณีเป็นกระจกสองชั้น (mm) บรรทัดที่สองจะเป็น ความหนากระจก (mm) ค่า Thermal conductivity ,k ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) ค่าการเปล่งรังสีของกระจกที่ผิวด้านหน้า ค่าเปล่งรังสีของกระจกที่ผิวด้านหลัง ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการสะท้อนรังสีของผิวกระจกด้านหน้าที่มีมุมตกกระทบที่กำหนด ค่าการสะท้อนรังสีของผิวกระจกด้านหลังที่มีมุมตกกระทบที่กำหนด เรียงตามลำดับ สำหรับกรณีของหน้าต่างกระจกสองชั้น จะเพิ่มข้อมูลคุณสมบัติทาง optical อยู่บรรทัดที่สาม โดยมีรูปแบบการจัดเรียงเหมือนกับบรรทัดที่สอง โดยมีตัวอย่างของแฟ้มข้อมูลดังต่อไปนี้

```
CLEAR      2 12.00
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
COOLGRAY   2 12.00
6.00 .90 .84 .84 .430 .060 .060
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
DARKCOOLGRAY 2 12.00
6.00 .90 .84 .84 .340 .050 .050
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
SKYBLUE    2 12.00
6.00 .90 .84 .84 .450 .060 .060
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
OCEAN_GREEN 2 12.00
6.00 .90 .84 .84 .350 .070 .070
6.00 .90 .84 .84 .800 .070 .070
```

3.8.3 ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะมีทั้งหมด 2 ส่วนด้วยกัน โดยในส่วนแรกจะแสดงค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้ สำหรับบรรทัดที่ 1 จะเป็นชื่อของกระจก จำนวนชั้นของกระจก ความกว้างของช่องอากาศ

(mm) สำหรับบรรทัดที่ 2 จะเป็นค่ามุมตกกระทบ (องศา) กับผนังกระจกในแนวตั้งฉากโดยมีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา ซึ่งจะเพิ่มทุก 10 องศา บรรทัดที่ 3 แสดงค่าการส่งผ่านรังสีโดยจะแสดงค่าที่สอดคล้องกับมุมตกกระทบจาก 0-90 องศา ซึ่งจะแสดงค่าการส่งผ่านรังสีทุก 10 องศา บรรทัดที่ 4, 5 และ 6 แสดงค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และค่าการดูดกลืนรังสีรวมทั้งสองชั้นตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบการจัดเรียงเหมือนบรรทัดที่ 3 สำหรับบรรทัดที่ 7, 8 และ 9 แสดงค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้า ด้านหลัง และค่า SHGC ของกระจกในแนวตั้งฉาก ซึ่งมีรูปแบบการจัดเรียงเหมือนบรรทัดที่ 3 สำหรับบรรทัดที่ 10, 11 และ 12 แสดงค่า Inward flowing fraction ของกระจกชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และค่า SC ตามลำดับ โดยมีตัวอย่างเพิ่มข้อมูลดังนี้

CLR_6	1 Plane Air gap = .00										
Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis
Tsol	.775	.774	.771	.765	.754	.731	.683	.577	.345	.000	.696
Abs1	.154	.155	.158	.162	.168	.175	.182	.184	.173	.000	.170
Abs2	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
AbsT	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
Rfsol	.071	.071	.071	.073	.078	.094	.135	.239	.482	1.000	.134
Rbsol	.071	.071	.071	.073	.078	.094	.135	.239	.482	1.000	.134
SHGC	.826	.825	.823	.819	.809	.789	.743	.637	.402	.000	.752
Inw1	.329										
Inw2	.000										
SC :	.95										

3.8.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทำได้โดยเปรียบเทียบผลเฉลยของโปรแกรมในส่วนของการคำนวณเกี่ยวกับคุณสมบัติหน้าต่างกระจกกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 4.1 และโปรแกรม Optic 5.02 และทำการเปรียบเทียบผลเฉลยของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในส่วนของการคำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนกับโปรแกรม Thermal Comfort ของ ASHRAE โดยใช้ข้อมูลเข้าชุดเดียวกัน

ตารางที่ 3.9 แสดงถึงผลของค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกใสขนาด 6 มม. ที่เป็นค่าการส่งผ่านรังสี (Transmittance) ค่าการสะท้อนรังสี (Reflectance) ค่าการดูดกลืนรังสี (Absorptance) และค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ที่แปรตามมุมตกกระทบที่คำนวณได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป WINDOW 4.1 และจากโปรแกรม WINDOW_COMFORT.F90 ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองชุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ตาราง ที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 6 มม. โดยโปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)

คุณสมบัติทาง เชิงแสง	โปรแกรม คอมพิวเตอร์	มุมตกกระทบ									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Transmittance	Window 4.1	0.775	0.774	0.771	0.765	0.754	0.731	0.683	0.577	0.345	0.0
	Window_comfort	0.775	0.774	0.771	0.765	0.754	0.731	0.683	0.577	0.345	0.0
Reflectance	Window 4.1	0.071	0.071	0.071	0.073	0.078	0.094	0.135	0.239	0.482	1.0
	Window_comfort	0.071	0.071	0.071	0.073	0.078	0.094	0.135	0.239	0.482	1.0
Absorbance	Window 4.1	0.154	0.155	0.158	0.162	0.168	0.175	0.182	0.184	0.173	0.0
	Window_comfort	0.154	0.155	0.158	0.162	0.168	0.175	0.182	0.184	0.173	0.0
SHGC	Window 4.1	0.814	0.813	0.811	0.806	0.797	0.776	0.730	0.624	0.389	0.0
	Window_comfort	0.817	0.816	0.814	0.810	0.800	0.779	0.733	0.627	0.392	0.0

ตาราง ที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดต่างๆ โดยโปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)

ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC		ค่าอุณหภูมิผิวกระจก (°C)	
	Win_comf	Window4.1	Win_comf	Window4.1	Win_comf	Window4.1
CLR_3	6.17	6.05	0.99	1.00	34.08	34.10
CLR_6	6.25	6.00	0.94	0.95	35.33	35.30
CLR_12	6.39	5.88	0.84	0.84	37.86	37.90
BRONZE_3	6.40	6.27	0.83	0.84	38.19	38.20
BRONZE_6	6.56	6.29	0.71	0.70	41.54	41.60
BRONZE_10	6.70	6.23	0.59	0.57	44.77	44.80
GREEN_3	6.41	6.28	0.83	0.83	38.37	38.40
GREEN_6	6.56	6.28	0.71	0.71	41.40	41.40
GRAY_3	6.42	6.29	0.82	0.82	38.58	38.60
GRAY_6	6.59	6.31	0.68	0.68	42.09	42.10

3.8.5 โปรแกรม WINDOW 4.1

โปรแกรม WINDOW 4.1 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Windows and Daylight Group at Lawrence Berkeley Laboratory มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซึ่งใช้สำหรับคำนวณ ค่าดัชนีบ่งบอกคุณลักษณะของหน้าต่าง (ส่วนกรอบและส่วนกระจก) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ค่า solar heat gain coefficients, (SHGC) ค่า shading coefficients, (SC) และค่าคุณสมบัติทาง optical ได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสี (Transmittance) การสะท้อนรังสี (Reflectance) และค่าการดูดกลืนรังสี (Absorbance) ในช่วงของรังสีแสงอาทิตย์ (solar range) และในช่วงของการมองเห็น (visible range) และค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในระบบหน้าต่างกระจก เป็นต้น

3.8.6 ความสามารถของโปรแกรม

1. มีความสามารถที่จะคำนวณหาค่า U ในส่วนของตัวกระจก และส่วนกรอบกระจก
2. มีความสามารถที่จะใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกหลายชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นของกระจก ชั้นของก๊าซที่อยู่ระหว่างกระจก กรอบกระจก และ spacers ภายใต้สภาวะแวดล้อมและมุมเอียงต่างๆ
3. มีความสามารถที่จะใช้ข้อมูลส่วนประกอบของหน้าต่างแต่ละส่วนและเงื่อนไขสภาพแวดล้อมได้โดยตรงจากแฟ้มข้อมูล
4. มีความสามารถที่จะเลือกการใช้งานเป็นแบบหน่วยอังกฤษและหน่วย SI
5. มีความสามารถที่จะพิมพ์รายละเอียดของผลการคำนวณในแต่ละส่วนของหน้าต่างได้
6. มีความสามารถที่จะกำหนดขนาดและคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละส่วนของกรอบหน้าต่าง
7. มีความสามารถที่จะทำงานเชื่อมโยงกับโปรแกรม FRAME 3 ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณในส่วนของกรอบกระจกได้
8. มีความสามารถที่จะใช้หลักการของการคำนวณคุณสมบัติของกระจกที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง
9. มีความสามารถที่จะทำงานเชื่อมโยงกับโปรแกรมวิเคราะห์พลังงาน DOE-2.1E

3.8.7 การทำงานของโปรแกรม

เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานผู้ใช้สามารถออกแบบหน้าต่างที่ต้องการได้โดยการป้อนข้อมูลลงบนหน้าจอหลักซึ่งข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรมมีดังนี้

1. สภาพอากาศออกแบบ สำหรับโปรแกรม WINDOW 4.1 จะมีสภาพอากาศออกแบบไว้ 3 เงื่อนไข คือ 1.) สภาพอากาศมาตรฐานแบบ NFRC/ASHRAE 2.) สภาพอากาศมาตรฐานแบบ ASHRAE สำหรับฤดูร้อน 3.) สภาพอากาศมาตรฐานแบบ ASHRAE สำหรับฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้ก็สามารถกำหนดสภาพอากาศมาตรฐานได้โดยตัวเอง โดยเลือกจากสภาพอากาศสำหรับการออกแบบในแต่ละท้องถิ่นนั้น ซึ่งค่าสภาพอากาศมาตรฐานที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม WINDOW 4.1 นั้น จะประกอบด้วย 1.) ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับผนัง 2.) ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายใน 3.) ค่าความเร็วลมภายนอก 4.) อุณหภูมิท้องฟ้า แต่โดยทั่วไปแล้วในการคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของหน้าต่างจะทำภายใต้เงื่อนไขที่มีเมฆปกคลุมซึ่งจะทำให้ค่าการเปล่งรังสีของท้องฟ้า มีค่าเป็น 1

2. ผู้ใช้ต้องกำหนดชนิดหรือลักษณะของหน้าต่างกระจกที่ต้องการคำนวณโดยอาจเลือกจากเพิ่มข้อมูลของหน้าต่างกระจกที่ได้กำหนดข้อมูลมาแล้วหน้าแล้ว หรืออาจจะกำหนดลักษณะและขนาดจากผู้ใช้อีกได้

3. ผู้ใช้ต้องกำหนดลักษณะการวางตัวของหน้าต่างกระจกโดยการกำหนดเป็นลักษณะของมุมเอียงของหน้าต่างกระจกเมื่อมุมเอียงมีค่าเป็น 90 องศา จะหมายถึงหน้าต่างอยู่ในตำแหน่งในแนวดิ่ง และเมื่อมุมเอียงมีค่าเป็น 0 องศา จะหมายถึงหน้าต่างอยู่ในตำแหน่งแนวนอน

4. ผู้ใช้อาจเลือกชนิดของกระจกจากเพิ่มข้อมูลของกระจกซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optical รวมทั้งความหนาและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยมีข้อมูลของกระจกมากถึง 9999 ชนิด หรือผู้ใช้อาจจะกำหนดคุณสมบัติทาง optical ของกระจกได้เอง โดยอาจจะนำข้อมูลทาง optical ที่ตำแหน่งที่พื้นผิวในแนวดิ่ง และที่มุมเอียงเป็น 90 องศา มาจากผู้ผลิตกระจก แล้วใช้โปรแกรม WINDOW 4.1 คำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ที่มุมตกกระทบอื่นๆได้

5. ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของกรอบหน้าต่างได้จากเพิ่มข้อมูลของกรอบหน้าต่างซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมหรือผู้ใช้อาจจะกำหนดได้เอง

6. ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ระหว่างชั้นของกระจก (สำหรับหน้าต่างที่มีกระจกมากกว่า 1 ชั้น) หรืออาจจะกำหนดได้เอง

3.8.8 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 4.1

เมื่อผู้ใช้งานกำหนดลักษณะของหน้าต่างกระจกและสถานะแวดล้อม โปรแกรม WINDOW 4.1 จะทำการคำนวณและให้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

1. ค่า U, ค่า shading coefficient , ค่า Solar Heat Gain Coefficient ที่มุมตกกระทบต่างๆ (0 ถึง 90 องศา) สำหรับหน้าต่างกระจก

2. ค่า U ของส่วนที่เป็นกรอบกระจกและส่วนที่เป็นโครงสร้าง รวมทั้งค่า U ของส่วนที่เป็นขอบกระจก
3. ให้ค่า solar transmittance และค่า visible transmittance รวมทั้งค่า solar reflectance ค่า visible reflectance และค่า solar absorptance ที่ขึ้นกับมุมตกกระทบของส่วนที่เป็นกระจก
4. ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกซึ่งจะเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวของกระจกภายในและภายนอก
5. ให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในส่วนตรงกลางกระจก (center-of-glass)

3.8.9 โปรแกรม Optic 5

โปรแกรม Optic 5 [20] เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Windows and Daylight Group at Lawrence Berkeley Laboratory มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซึ่งใช้สำหรับคำนวณคุณสมบัติทาง Optical ที่แปรตามความยาวคลื่นและคุณสมบัติรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถคำนวณคุณสมบัติทาง Optical ของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น และหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม นอกจากนี้ผู้ใ้ยังสามารถกำหนดเงื่อนไขต่างๆได้ เช่น ค่า solar spectrum มาตรฐาน กำหนดค่ามุมเอียงของชุดกระจกชนิดของก๊าซที่คั่นกลางกรณีที่เป็นกระจก 2 ชั้น นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณคุณสมบัติทาง Optical ที่แปรตามความยาวคลื่นออกเป็นใช้เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับโปรแกรม WINDOW 4.1

3.9 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนโดยแต่ละส่วนจะสามารถกำหนดเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์ในเรื่องสมรรถนะของหน้าต่างกระจกและกระจกติดฟิล์ม การพัฒนาหาเกณฑ์และพารามิเตอร์จากค่าสัมประสิทธิ์การบังเงากับค่าคุณลักษณะเชิง optical ของฟิล์ม เพื่อใช้ในการเลือกฟิล์มจากข้อมูลที่มีแพร่หลายในตลาด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.9.1 ทำการเลือกกระจกชนิดต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ และฟิล์มชนิดต่าง ๆ จากกระจกและฟิล์มที่ถูกวิเคราะห์ในโครงการวิจัย โดยจะเน้นที่กระจกและฟิล์มที่มีการผลิตจำหน่าย หรือที่ถูกนำมาใช้งานในประเทศไทย

3.9.2 นำข้อมูลเชิง optical ที่แปรตามความยาวคลื่นของกระจกและตัวฟิล์มเปล่าชนิดต่าง ๆ ที่นำมาศึกษาเพิ่มทำการวิเคราะห์หาข้อมูลเชิง optical ที่แปรตามความยาวคลื่นของกระจกที่ติดฟิล์มดังกล่าว [16][11][2][20]

3.9.3 ทำการวิเคราะห์หาสมรรถนะของกระจกและกระจกติดฟิล์มในแง่การส่งผ่านความร้อน ด้วยค่าดัชนีการส่งผ่านพลังงานความร้อน [3]

3.9.4 นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของชุดกระจกและกระจกติดฟิล์มที่ได้มาหาความสัมพันธ์ของค่าคุณลักษณะเชิง optical ของระบบหน้าต่างกระจกกับค่าดัชนีการส่งผ่านพลังงานความร้อน

3.9.5 ทำการหาความสัมพันธ์ของค่าคุณลักษณะของฟิล์มที่แพร่หลายอยู่ในตลาดในรูปค่าการลดการส่องสว่างและค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา กับค่าคุณลักษณะเชิง optical ที่แปรตามความยาวคลื่นของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

จากนั้นก็จะนำค่าที่ได้มาประมวลและหาความสัมพันธ์ของสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกในแง่การถ่ายเทความร้อน กับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกระบบหน้าต่างกระจกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และยังสามารถใช้ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มกับฟิล์มที่มีจำหน่ายในประเทศไทยที่ไม่มีข้อมูลเชิง optical ที่แปรตามความยาวคลื่นแต่มีข้อมูลเฉพาะรูปค่าการลดการส่องสว่างและค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา