

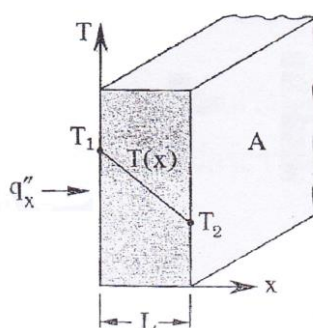
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อน คือ การถ่ายโอนความร้อนเกิดเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งกระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยอาจเกิดจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือเกิดพร้อมกันหลายวิธีก็ได้ ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนจะดำเนินไปจนกระทั่งอุณหภูมิเข้าสู่สมดุล [4]

2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) คือ การโอนถ่ายความร้อนที่ผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่องกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ อัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) โดย กฎของฟูเรียร์กล่าวว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายโอนความร้อน (Q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายโอนความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว ($\frac{dT}{dx}$) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด x [4]

โดยการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ

Q_x	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวกลาง (W/m.K)
A	คือ	พื้นที่ถ่ายโอนความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (m^2)
$\frac{dT}{dx}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางการไหล

โดยที่ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$q_x'' = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

เมื่อ

q_x''	คือ	ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลาง (W/m^2)
---------	-----	---------------------------------------

2.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ผลการเคลื่อนไหวยังส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น (h) พลังงานความร้อนถูกถ่ายโอนเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวยังไปทั้งปริมาตรของของไหล

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Free convection) และการพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection)

1) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Free convection) คือ การเคลื่อนไหวยังของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลสองบริเวณ

2) การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) คือ การเคลื่อนไหวยังของไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหว

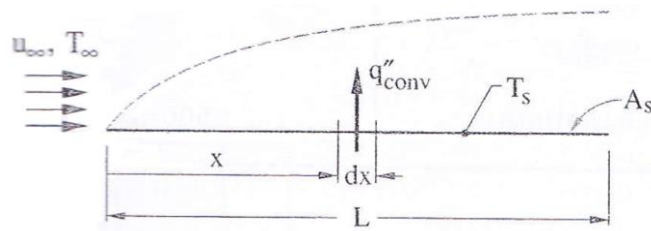
โดยการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$Q_c = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

เมื่อ

Q_c	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล (W)
h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ (W/m^2K)
A_s	คือ	พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (m^2)
T_s	คือ	อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)
T_∞	คือ	อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุ (K)

เมื่อพิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ A_s อุณหภูมิผิว T_s ของของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว u_∞ และอุณหภูมิ T_∞ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อนและชั้นขีดผิวความเร็ว [4]

ค่าฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อนตามกฎการทำให้เย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's law of cooling) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

เมื่อ

q''	คือ	ฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อน (W/m^2)
T_s	คือ	อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)
T_∞	คือ	อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุ (K)

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ การถ่ายโอนความร้อนจากผิวซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยพลังงานของการแผ่รังสีจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือในรูปของโฟตอนโดยไม่ต้องอาศัย

ตัวกลาง โดยพื้นผิวนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ โดยการแผ่รังสีความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$Q_r = \sigma A T^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ

Q_r	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากการแผ่รังสี (W)
σ	คือ	ค่าคงที่ของสเติเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
A	คือ	พื้นที่ผิวที่แผ่รังสีความร้อน (m^2)
T	คือ	อุณหภูมิของผิวที่แผ่รังสีความร้อน (K)

2.2 การถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร

ค่าการถ่ายโอนความร้อนของผนังด้านนอกอาคารแต่ละด้าน (OTTV_i) คือ ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคารด้านที่พิจารณา [5] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$\text{OTTV}_i = (U_w)(1-\text{WWR})(\text{TD}_{\text{eq}}) + (U_f)(\text{WWR})(\Delta T) + (\text{WWR})(\text{SHGC})(\text{SC})(\text{ESR}) \quad (2.6)$$

เมื่อ

OTTV_i	คือ	ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้าน i ที่พิจารณา (W/m^2)
U_w	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังทึบ ($\text{W/m}^2\text{.K}$)
WWR	คือ	อัตราส่วนพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา
TD_{eq}	คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ (K)
U_f	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกระจก ($\text{W/m}^2\text{.K}$)
ΔT	คือ	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (K)
SHGC	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจก
SC	คือ	สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
ESR	คือ	ปริมาณรังสีอาทิตย์ตกกระทบที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนผ่านกระจกและหรือผนังทึบ (W/m^2)

ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) คือ ค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกแต่ละด้าน (OTTV_i) รวมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}} \quad (2.7)$$

เมื่อ

A_{wi} คือ พื้นที่รวมของผนังทึบและผนังโปร่งแสงด้าน i ที่พิจารณา (m^2)
 $OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้าน i ที่พิจารณา (W/m^2)

2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกรอบอาคาร (U_w) ของผนังด้านนอกอาคารแต่ละด้านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$U_w = \frac{1}{R_T} \quad (2.8)$$

เมื่อ

U_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกรอบอาคาร ($W/m^2.K$)
 R_T คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของวัสดุ ($m^2.K/W$)

ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad (2.9)$$

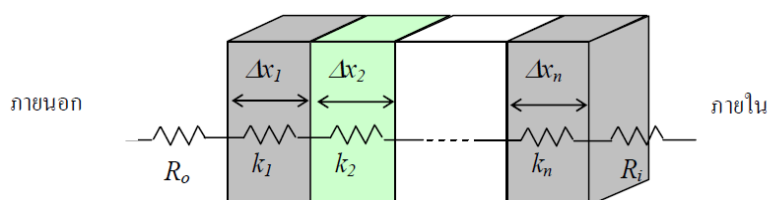
เมื่อ

R คือ ค่าความต้านทานความร้อน ($m^2.K/W$)
 Δx คือ ความหนาของวัสดุ (m)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($W/m.K$)

ในกรณีที่ผนังอาคารประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลายชนิดค่าความต้านทานความร้อนของผนังอาคารมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด โดยเป็นเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ผนังอาคารประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด และกรณีที่ผนังอาคารมีช่องว่างอากาศ

1. กรณีที่ผนังอาคารประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด

ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_T) ของกรอบอาคารซึ่งประกอบด้วยวัสดุ n ชนิดที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร [5]

ซึ่งมีโครงสร้างประกอบขึ้นจากวัสดุแตกต่างกัน n ชนิด และสามารถคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวมได้จากสมการที่ 2.10

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \quad (2.10)$$

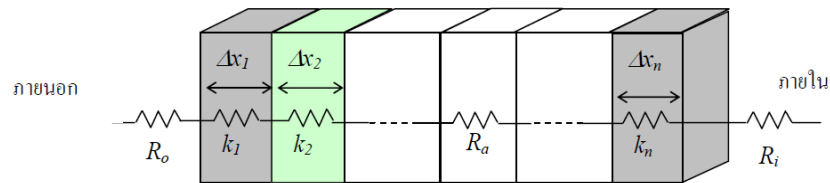
เมื่อ

R_T	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวม ($m^2.K/W$)
$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$	คือ	ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นกรอบอาคาร (m)
$k_1, k_2, \dots, k_n$	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นกรอบอาคาร ($W/m.K$)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร ($m^2.K/W$)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร ($m^2.K/W$)

2. กรณีที่ผนังอาคารมีช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศระหว่างชั้นของกรอบอาคารมีค่าความต้านทานความร้อนค่าหนึ่ง แสดงดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 การถ่ายโอนความร้อนผ่านผนังอาคารที่ประกอบด้วยวัสดุ n ชนิดที่แตกต่างกันและมีช่องว่างอากาศภายใน [5]

และสามารถคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวมได้จากสมการที่ 2.11

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + R_a + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \quad (2.11)$$

เมื่อ

R_T	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวม ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)
$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$	คือ	ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นกรอบอาคาร (m)
$k_1, k_2, \dots, k_n$	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นกรอบอาคาร (W/m.K)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)
R_a	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในผนังอาคาร ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)

2.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกระจก

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกระจก (U_g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$U_f = \frac{1}{R_f} \quad (2.12)$$

เมื่อ

U_f	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของกระจก ($W/m^2.K$)
R_f	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระจก ($m^2.K/W$)

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระจกขึ้นอยู่กับชนิดของกระจก ดังนี้

1. กระจกชั้นเดียว

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม (U_f) ของกระจกชั้นเดียว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$R_f = R_o + \frac{\Delta x}{k} + R_i \quad (2.13)$$

เมื่อ

R_f	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของกระจก ($m^2.K/W$)
Δx	คือ	ความหนาของกระจก (m)
k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกระจก ($W/m.K$)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร ($m^2.K/W$)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร ($m^2.K/W$)

2. กระจกลามิเนต

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม (U_f) ของกระจกลามิเนต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$R_f = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \quad (2.14)$$

เมื่อ

R_f	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของกระจก ($m^2.K/W$)
$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$	คือ	ความหนาของกระจกแต่ละชนิด (m)

$k_1, k_2, \dots, k_n$	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกระจกแต่ละชนิด (W/m.K)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร (m ² .K/W)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร (m ² .K/W)

3. ระบบหน้าต่างที่ประกอบด้วยกระจกหลายชั้นและมีช่องว่างอากาศภายใน

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม (U_f) ของกระจกหลายชั้นและมีช่องว่างอากาศภายในสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$R_f = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + R_a + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i \quad (2.15)$$

เมื่อ

R_f	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของกระจก (m ² .K/W)
$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$	คือ	ความหนาของกระจกแต่ละชนิด (m)
$k_1, k_2, \dots, k_n$	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกระจกแต่ละชนิด (W/m.K)
R_o	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร (m ² .K/W)
R_i	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร (m ² .K/W)
R_a	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ ระหว่างแผ่นกระจก (m ² .K/W)

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด

ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient; SC) ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นกระจกและส่วนที่เป็นอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกและสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร [5] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$SC = SC_1 \times SC_2 \quad (2.16)$$

เมื่อ

SC_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจก

SC_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร

2.2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจก

ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจก (SC_1) คือ อัตราส่วนของพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ผ่านกระจกที่พิจารณาเข้ามาในอาคารต่อความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ผ่านกระจกใสหนา 3 มิลลิเมตร โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$\text{Shading Coefficient} = \frac{\text{Solar Factor ของกระจกที่พิจารณา}}{\text{Solar Factor ของกระจกใสหนา 3 มิลลิเมตร}} \quad (2.17)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจก [2]

ประเภทกระจก	ความหนา (มิลลิเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ การบังแดดของกระจก (SC_1)
กระจกโฟลตใส	6	0.96
กระจกสี		
Cool gray	6	0.64
Skyblue	6	0.68
Ocean green	6	0.65
กระจกตัดแสง		
Cool gray	6	0.32
Skyblue	6	0.51
Ocean green	6	0.67
กระจกสะท้อนแสง		
Yellow	6	0.24
Blue	6	0.32
Green	6	0.28
กระจกกันความร้อน		
Clear G./Dry Air/Clear G.	6-12-6	0.82
Clear G. + Low-E/Dry Air/Clear G.	6-12-6	0.27

2.2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร (SC_2) คือ อัตราส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลอดผ่านอุปกรณ์บังแดดไปตกกระทบยังส่วนโปร่งแสงหรือกระจกของหน้าต่าง [5] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18

$$SC_2 = \frac{E_{ew}}{E_{et\theta}} \quad (2.18)$$

เมื่อ

SC_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร
 E_{ew} คือ รังสีอาทิตย์ที่ผ่านอุปกรณ์บังแดดมาตกกระทบบนหน้าต่าง (W/m^2)

$E_{et\theta}$ คือ รังสีรวมของดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบบนหน้าต่างที่พิจารณาเสมือนหนึ่งไม่มีอุปกรณ์บังแดด (W/m^2)

1. รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหน้าต่างที่มีอุปกรณ์บังแดด (E_{ew})

การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหน้าต่างที่มีอุปกรณ์บังแดด สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.19

$$E_{ew} = (A_{fu}/A_f)(E_{es})(\cos\theta) + (E_{ed})\frac{(1+\cos\beta)}{2} \quad (2.19)$$

เมื่อ

E_{ew}	คือ	รังสีอาทิตย์ที่ผ่านอุปกรณ์บังแดดมาตกกระทบบนหน้าต่าง (W/m^2)
A_{fu}	คือ	พื้นที่ของหน้าต่างที่ไม่อยู่ภายใต้เงา (m^2)
A_f	คือ	พื้นที่ของหน้าต่างทั้งหมด (m^2)
E_{es}	คือ	รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (W/m^2)
E_{ed}	คือ	รังสีกระจายของดวงอาทิตย์บนพื้นผิวแนวนอน (W/m^2)
θ	คือ	มุมระหว่างระนาบที่พิจารณากับทิศของดวงอาทิตย์
β	คือ	มุมเอียงของระนาบที่พิจารณา

2. รังสีอาทิตย์บนระนาบที่ไม่มีการบังแดด ($E_{et\theta}$)

กรณีที่ช่องแสงของผนังหรือระนาบใดๆ ไม่มีการบังแดดปริมาณ รังสีรวมของดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบบนระนาบดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20

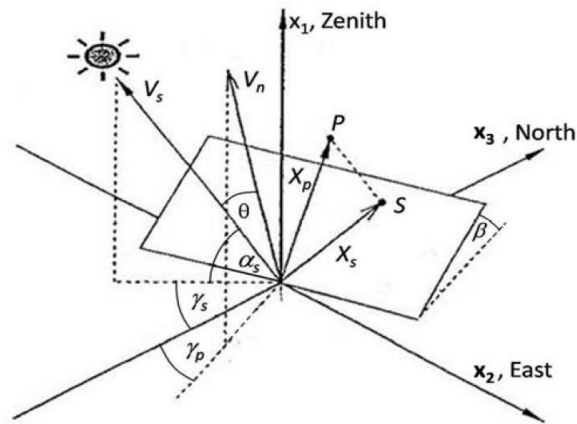
$$E_{et\theta} = (E_{es})(\cos\theta) + (E_{ed})\frac{(1+\cos\beta)}{2} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$E_{et\theta}$	คือ	รังสีรวมของดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกกระทบบนหน้าต่างที่พิจารณาเสมือนหนึ่งไม่มีอุปกรณ์บังแดด (W/m^2)
E_{es}	คือ	รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (W/m^2)
E_{ed}	คือ	รังสีกระจายของดวงอาทิตย์บนพื้นผิวแนวนอน (W/m^2)
θ	คือ	มุมระหว่างระนาบที่พิจารณากับทิศของดวงอาทิตย์
β	คือ	มุมเอียงของระนาบที่พิจารณา

การคำนวณค่ามุมระหว่างระนาบที่พิจารณากับทิศของดวงอาทิตย์ (θ)

เมื่อพิจารณาพิกัด (x_1, x_2, x_3) ซึ่งถูกกำหนดด้วยเส้นซีก (zenith) ทิศตะวันออกและทิศเหนือ ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งและทิศทางของระนาบและจุดต่างๆ
บนระนาบที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ [5]

จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณหาเวกเตอร์แสดงทิศของดวงอาทิตย์ (โซลาร์เวกเตอร์, V_s^x) และเวกเตอร์ของระนาบเอียง (V_n^x) ซึ่งตั้งฉากกับระนาบเอียง จากสมการที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ

$$V_s^x = \begin{pmatrix} \sin \alpha_s \\ -\cos \alpha_s \cdot \sin \gamma_s \\ -\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s \end{pmatrix}, \text{ โซลาร์เวกเตอร์} \quad (2.21)$$

$$V_n^x = \begin{pmatrix} \cos \beta \\ -\sin \beta \cdot \sin \gamma_p \\ -\sin \beta \cdot \cos \gamma_p \end{pmatrix}, \text{ เวกเตอร์ของระนาบเอียง} \quad (2.22)$$

สามารถคำนวณค่ามุมระหว่างระนาบที่พิจารณากับทิศของดวงอาทิตย์ (θ) จากสมการที่ 2.23

$$\begin{aligned} \cos \theta &= (V_s^x, V_n^x) \\ &= (\sin \alpha_s)(\cos \beta) + (\cos \alpha_s)(\sin \gamma_s)(\sin \beta)(\sin \gamma_p) + (\cos \alpha_s)(\cos \gamma_s)(\sin \beta)(\cos \gamma_p) \end{aligned} \quad (2.23)$$

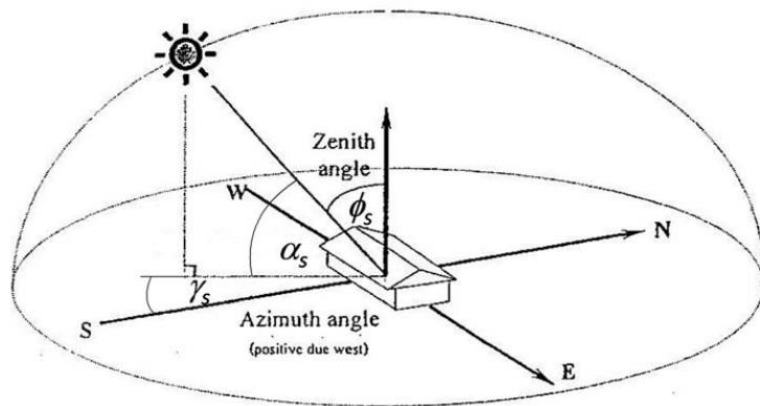
เมื่อ

θ คือ มุมระหว่างระนาบที่พิจารณากับทิศของดวงอาทิตย์

β	คือ	มุมเอียง (Inclination angle) ของระนาบที่พิจารณา
γ_p	คือ	มุมอะซิมุทของระนาบที่พิจารณา (Azimuth of surface)

2.2.3.3 ตำแหน่งและทิศของดวงอาทิตย์

ตำแหน่งและทิศของดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อจุดใด ๆ บนพื้นโลก สามารถระบุได้โดยอาศัยมุมเงยหรือมุมยกขึ้นของดวงอาทิตย์ (Altitude, α_s) ซึ่งเป็นมุมที่แนวรังสีตรงของดวงอาทิตย์กระทำกับแนวระดับของพื้นโลก และมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์ (Azimuth, γ_s) ซึ่งเป็นมุมที่ตำแหน่งดวงอาทิตย์ในแนวระนาบกระทำกับทิศใต้ของโลก [5] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งและทิศของดวงอาทิตย์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของอาคารบนพื้นโลก [5]

1. เวลาสุริยะ (Solar time)

เวลาสุริยะ คือ เวลาที่สอดคล้องกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยเวลาที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่มีค่ามุมเงยหรือมุมยกขึ้น (Altitude) สูงสุด หรือเวลาที่เที่ยงสุริยะ (Solar noon) เวลาสุริยะ ให้คำนวณจากสมการที่ 2.24

$$t_s = t_l - 4(L_{gs} - L_{gl}) + E_{qt} \quad (2.24)$$

เมื่อ

t_s	คือ	เวลาสุริยะ
t_l	คือ	เวลามาตรฐานท้องถิ่น
L_{gs}	คือ	เส้นแวงหลักมาตรฐาน สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 105 องศาตะวันออก

L_{gl}	คือ	เส้นแวงของตำแหน่งที่พิจารณา สำหรับประเทศไทยให้ใช้ค่าเท่ากับ 100.5 องศาตะวันออก
E_{qt}	คือ	สมการของเวลา (Equation of time) หรือผลต่างของเวลาสุริยะกับเวลาปกติ มีหน่วยเป็นนาที

โดยสมการของเวลาคำนวณจากสมการที่ 2.25 และสมการที่ 2.26

$$E_{qt} = 9.87(\sin 2B) - 7.53(\cos B) - 1.5(\sin B) \quad (2.25)$$

$$B = \frac{(360^\circ)(j_d - 81)}{364} \quad (2.26)$$

เมื่อ

j_d คือ วันจูเลียน (Julian date) คือ ลำดับที่ของวันในหนึ่งปี

2. ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของตำแหน่งของดวงอาทิตย์มุมเงย และมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$\sin \alpha_s = (\sin L_t)(\sin \delta) + (\cos L_t)(\cos \delta)(\cos \omega) \quad (2.27)$$

$$\sin \gamma_s = \frac{(\cos \delta)(\sin \omega)}{\cos \alpha_s} \quad (2.28)$$

เมื่อ

L_t	คือ	เส้นรุ้ง (latitude) ของตำแหน่งที่พิจารณา เช่น กรุงเทพฯ มีค่าเท่ากับ 13.7 องศาเหนือ
δ	คือ	มุมเบี่ยงของดวงอาทิตย์ หรือมุมเดคลิเนชัน (Declination angle) มีหน่วยเป็น เรเดียน (rad)
ω	คือ	มุมแทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์ก่อนหรือหลังเวลาเที่ยงสุริยะ (Solar hour angle) มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad) โดยคำนวณจากสมการที่ 2.29

$$\omega = \pi(t_s - 12)/12 \quad (2.29)$$

เมื่อ

t_s คือ เวลาสุริยะ

มุมเบี่ยงของดวงอาทิตย์ คือ มุมที่แนวลำแสงอาทิตย์ไปยังจุดกึ่งกลางของโลกกระทำกับระนาบเส้นศูนย์สูตร มุมเบี่ยงของดวงอาทิตย์สำหรับวันจูเลียน (j_d) ใดๆ ให้คำนวณจากสมการที่ 2.30

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{(360^\circ)(284 + j_d)}{365} \right) \quad (2.30)$$

เมื่อ

j_d คือ วันจูเลียน (Julian date) คือ ลำดับที่ของวันในหนึ่งปี

2.2.4 ค่าการส่งผ่านรังสีของแสงธรรมชาติที่ตามองเห็น

ค่าการส่งผ่านรังสีของแสงธรรมชาติที่ตามองเห็น (Visible light transmittance) คือ ค่าสัดส่วนที่แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นสามารถส่องผ่านกระจก โดยค่าการส่งผ่านรังสีของแสงธรรมชาติที่ตามองเห็น ของกระจก แสดงดังตารางที่ 2.2

2.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar heat gain coefficient; SHGC) คือ ค่าของรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านวัสดุผนังและหลังคาส่วนโปร่งแสง ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนเข้าภายในอาคาร โดยค่าดังกล่าวเป็นผลรวมระหว่างค่ารังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกหรือวัสดุโปร่งแสงโดยตรงกับค่าการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากรังสีอาทิตย์ถูกดูดกลืนไว้ในตัวกระจกหรือผนังโปร่งแสงเข้ามายังภายในอาคาร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบและคำนวณโดยผู้ผลิตกระจก โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ของกระจก แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าการส่งผ่านรังสีของแสงธรรมชาติที่ตามองเห็นของกระจกและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ของกระจก หน้า 6 มิลลิเมตร [5]

ชนิดของกระจก	ค่าการส่งผ่านรังสีที่ตามองเห็น (Visible transmittance)	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)
กระจกชั้นเดียว ไม่เคลือบผิว (Uncoated single glazing)		
กระจกใส	0.88	0.73
กระจกสีบรอนซ์	0.54	0.54
กระจกสีเขียว	0.76	0.54
กระจกสีเทา	0.46	0.52
กระจกสีฟ้าอมเขียว	0.75	0.55
กระจกสะท้อนแสงชั้นเดียว (Reflective single glazing)		
กระจกใสเคลือบโลหะสแตนเลส 20%	0.2	0.28
กระจกใสเคลือบไทเทเนียม 20%	0.2	0.27
กระจกใสเคลือบไทเทเนียม 30%	0.3	0.35
กระจกสองชั้น ไม่เคลือบผิว (Uncoated double glazing)		
กระจกใส-กระจกใส	0.78	0.6
กระจกสีบรอนซ์-กระจกใส	0.47	0.41
กระจกสีเขียว-กระจกใส	0.68	0.41
กระจกสีเทา-กระจกใส	0.41	0.39
กระจกสีฟ้าอมเขียว-กระจกใส	0.67	0.43
กระจกสีเขียวคุณภาพสูง-กระจกใส	0.59	0.33
กระจกสะท้อนแสงสองชั้น (Reflective double glazing)		
กระจกใสเคลือบไทเทเนียม 30% และกระจกใส	0.27	0.25
กระจกเคลือบสารแผ่รังสีต่ำสองชั้น (Low-e double glazing), $e = 0.2$ on surface 2		
กระจกเคลือบสารแผ่รังสีต่ำและกระจกใส	0.73	0.53
กระจกเคลือบสารแผ่รังสีต่ำสองชั้น (Low-e double glazing), $e = 0.1$ on surface 2		
กระจกเคลือบสารแผ่รังสีต่ำและกระจกใส	0.72	0.44
กระจกสีเขียวคุณภาพสูง-กระจกเคลือบสารแผ่รังสีต่ำ	0.57	0.27

2.3 ระบบทำความเย็น

หลักการทำงานของระบบทำความเย็นในเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่

1. ระบบที่ใช้กลไก (Mechanical system) เป็นระบบที่สร้างหรือทำความเย็นขึ้นโดยอาศัยการทำงานของกลไกต่างๆ เป็นที่นิยมแพร่หลายที่สุด ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า การทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor compression refrigeration)

2. ระบบที่ไม่ใช้กลไก (Non-mechanical system) เป็นระบบที่สร้างหรือทำความเย็นให้เกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหรือกลไกใดๆ การทำความเย็นระบบนี้ที่มีใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorbption refrigeration) การทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำ (Steam jet refrigeration) และการทำความเย็นแบบใช้การขยายตัวของอากาศ (Air expansion refrigeration) [6]

2.3.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอเริ่มต้นที่คอมเพรสเซอร์ดูดสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นไอจากอีแวปอเรเตอร์ที่ทางด้านดูด (Suction) ของคอมเพรสเซอร์และอัดสารทำความเย็นเพิ่มให้มีความดันสูงขึ้นและส่งออกทางด้านส่งของคอมเพรสเซอร์และไหลผ่านต่อไปยังคอนเดนเซอร์ สารทำความเย็นภายใต้อุณหภูมิ และความดันสูงนี้ เมื่อผ่านคอนเดนเซอร์จะระบายความร้อนออกจนถึงจุดควบแน่น สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากไอไปเป็นของเหลว และไหลผ่านต่อไปที่เอ็กแพนชันวาล์วหรือวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นเกิดการขยายตัวส่งผลให้ความดันลดลงเพื่อให้สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ตลอดช่วงที่ผ่านอีแวปอเรเตอร์ อากาศในห้องซึ่งมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากของเหลวได้รับความร้อนจากอากาศที่ผ่านอีแวปอเรเตอร์ ทำให้บริเวณโดยรอบอีแวปอเรเตอร์มีอุณหภูมิลดลง เมื่อสารทำความเย็นผ่านอีแวปอเรเตอร์ จะเปลี่ยนสถานะเป็นไอและถูกคอมเพรสเซอร์ดูดและอัดให้มีความดันสูงขึ้น และถูกส่งไปใช้งานในระบบทำความเย็นโดยหมุนเวียนเช่นนี้ไปตลอด [6]

2.3.2 หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ มีรายละเอียดดังนี้

1) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นไอจากอีแวปอเรเตอร์และอัดให้มีความดันสูงจนสามารถควบแน่นได้ที่คอนเดนเซอร์

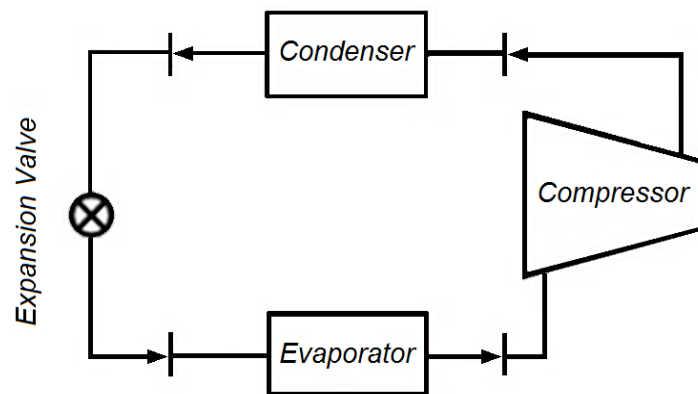
2) คอนเดนเซอร์ (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นเพื่อควบแน่นเป็นของเหลว และส่งเข้ารีซีฟเวอร์

3) รีซีฟเวอร์ (Receiver) ทำหน้าที่สะสมของเหลวที่มาจากคอนเดนเซอร์เพื่อจ่ายให้กับอีแวปอเรเตอร์ ตลอดระยะเวลาของการทำงาน

4) วาล์วลดความดัน (Expansion valve) ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่มาจากคอนเดนเซอร์ เพื่อจ่ายให้กับอีแวปอเรเตอร์

5) อีแวปอเรเตอร์ (Evaporator) ทำหน้าที่ดูดความร้อนออกจากบริเวณรอบๆ เพื่อทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นไอและทำให้บริเวณใกล้เคียงเกิดความเย็นขึ้น

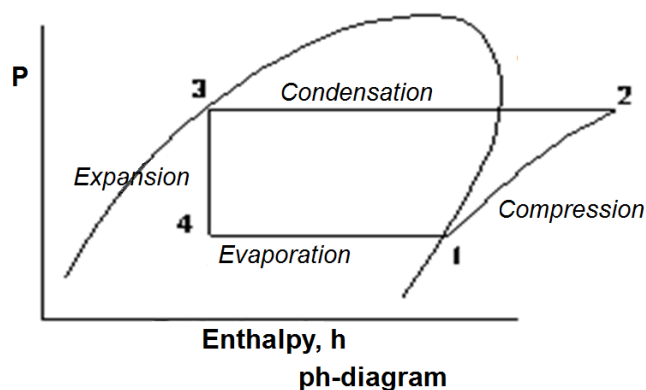
โดยวงจรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [6]

2.3.3 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

หลักการทำงานของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไออธิบายได้โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Pressure) และเอนทัลปี (Enthalpy) [6] แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภูมิความดัน-เอนทัลปีของเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ [6]

ช่วงสภาวะที่ 1 – 2	การอัด (Compression) สารทำความเย็นสถานะก๊าซจากความดันต่ำให้เป็นก๊าซร้อนความดันสูงขึ้น
ช่วงสภาวะที่ 2 – 3	การควบแน่น (Condensing) สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นก๊าซควบแน่นกลายเป็นของเหลวและคายความร้อนออก
ช่วงสภาวะที่ 3 – 4	การขยายตัว (Expansion) ทำให้สารทำความเย็นมีความดันลดต่ำลงพร้อมทั้งอุณหภูมิลดลงและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของเหลวผสมก๊าซ
ช่วงสภาวะที่ 4 – 1	การระเหย (Evaporation) สารทำความเย็นรับความร้อนจากสารตัวกลาง (อากาศหรือน้ำ) ทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ

2.3.4 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of performance, COP) คือ อัตราส่วนระหว่างความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ (W) ต่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (W) [5] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.31

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (2.31)$$

เมื่อ

Q	คือ	ความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ (W)
W	คือ	กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (W)

2.3.5 ประสิทธิภาพการให้ความเย็น

ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็น (Energy efficiency ratio, EER) คือ ค่าที่แสดงระดับประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ โดยที่ประสิทธิภาพการให้ความเย็นเป็นอัตราส่วนระหว่างความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ (Btu/hr) ต่อกำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (W) [5] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.32

$$EER = 3.412(COP) \quad (2.32)$$

เมื่อ

EER	คือ	ประสิทธิภาพการให้ความเย็น ((Btu/hr)/W)
COP	คือ	สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น

2.4 การคำนวณผลประหยัดพลังงานจากการปรับปรุงค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร

การคำนวณผลการประหยัดพลังงานจากการปรับปรุงค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) [7] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.33

$$\text{พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้} = \frac{(\text{Cooling load}_{\text{old}} - \text{Cooling load}_{\text{new}}) \times \text{Area}}{\text{COP}} \quad (2.33)$$

เมื่อ

Cooling load _{old}	คือ	ภาระการทำความเย็นก่อนการปรับปรุงผนังอาคาร (W/m ²)
Cooling load _{new}	คือ	ภาระการทำความเย็นหลังจากปรับปรุงผนังอาคาร (W/m ²)
Area	คือ	พื้นที่รวมของผนังทึบและผนังโปร่งแสง (m ²)
COP	คือ	สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

2.5 ประเภทรังสีอาทิตย์ที่ผิวโลก

รังสีอาทิตย์ที่ตกผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกนั้น รังสีบางส่วนถูกดูดกลืนเข้าสู่ภายในโลก แต่บางส่วนถูกสะท้อนกลับสู่บรรยากาศ โดยรังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาสู่ผิวโลกนั้น แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รังสีตรง (Beam or Direct radiation), รังสีกระจาย (Diffuse radiation) และรังสีรวม (Total or Global radiation) [8]

2.5.1 รังสีตรง

รังสีตรง (Beam or Direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโลกโดยไม่เปลี่ยนทิศทางและตกบนผิวรับแสงด้วยทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ซึ่งทิศของรังสีตรงอยู่ในแนวรังสีอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางที่แน่นอนจึงสามารถรวมรังสีหรือโฟกัสรังสีตรงได้

2.5.2 รังสีกระจาย

รังสีกระจาย (Diffuse radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ตกกระทบกับอนุภาคในชั้นบรรยากาศแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมรังสีกระจายได้

2.5.3 รังสีรวม

รังสีรวม (Total radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวรับรังสี ในกรณีที่ผิวรับรังสีเป็นแผ่นเอียง (Incline plane) รังสีรวมประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Total radiation สำหรับกรณีที่ผิวรับรังสีเป็นแผ่นราบ (Horizontal plane) รังสีรวมมาจากรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าไม่มีรังสีกระจายที่มาจากผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Global radiation

2.6 การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงิน

การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินเป็นแนวทางที่ใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกดำเนินการโครงการ โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน [9]

2.6.1 ระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้น

ระยะเวลาคืนทุน (Simple payback period) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับเงินลงทุน โดยไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การประเมินโครงการโดยคำนึงถึงระยะเวลาคืนทุนนั้นควรเลือกระยะเวลาคืนทุนที่มีค่าน้อย เพราะมีความเสี่ยงจากการลงทุนต่ำ สำหรับในกรณีที่ผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายในแต่ละปีมีค่าเท่ากันทุกปี สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้จากสมการที่ 2.34

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้น} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน}}{\text{กระแสเงินสดสุทธิต่อปี}} \quad (2.34)$$

เมื่อ $\text{กระแสเงินสดสุทธิต่อปี} = \text{กระแสเงินสดที่ได้รับต่อปี} - \text{กระแสเงินสดที่จ่ายต่อปี}$

กรณีที่ผลตอบแทนสุทธิที่ได้รับต่อปีไม่เท่ากัน การรวมผลตอบแทนสุทธิที่ได้รับแต่ละปีจนกระทั่งถึงปีที่ผลสะสมของผลตอบแทนสุทธิเท่ากับจำนวนเงินลงทุน จำนวนปีนี้ คือ ระยะเวลาคืนทุน

2.6.2 อัตราผลตอบแทนภายใน

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return; IRR) คือ ผลที่ได้รับจากการลงทุนในโครงการ โดยคิดเป็นอัตราร้อยละเมื่อเทียบกับเวลาตลอดอายุโครงการที่ลงทุนไป โดยวิธีการคำนวณหาผลตอบแทนการลงทุนนี้เป็นอัตราที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับศูนย์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.35

$$I - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) = 0 \quad (2.35)$$

เมื่อ

I	คือ	เงินลงทุนครั้งแรก (บาท)
C_t	คือ	กระแสเงินสดสุทธิที่ได้รับในแต่ละงวด (บาท/ปี)
t	คือ	ปีที่ 1 ถึงปีที่ n (ปี)
n	คือ	อายุโครงการ (ปี)
r	คือ	อัตราผลตอบแทน

2.7 ประเภทของกระจก

ในปัจจุบันกระจกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำเป็นกรอบอาคาร เนื่องจากกระจกเป็นวัสดุสำเร็จรูป ติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็วกว่ากรอบอาคารที่ทำจากผนังทึบ รวมไปถึงกระจกยังช่วยเพิ่มแสงสว่างภายในอาคารทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าในส่วนของระบบแสงสว่างและยังช่วยเพิ่มทัศนวิสัยให้กับผู้อยู่อาศัยในการมองเห็นภายนอกอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระจกเป็นวัสดุโปร่งใสจึงทำให้ความร้อนจากภายนอกอาคารสามารถถ่ายโอนเข้าสู่ภายในอาคารผ่านผนังกระจกได้ง่าย ดังนั้นการเลือกใช้กระจก ควรคำนึงถึงสมบัติของกระจกแต่ละประเภท การส่องสว่าง การประหยัดพลังงาน รวมไปถึงความสวยงามด้วย โดยกระจกสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ [2]

2.7.1 กระจกโฟลต

กระจกโฟลต (Float glass) คือ กระจกพื้นฐานที่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยตรง ก่อนที่จะมีการดัดแปลงเป็นกระจกประเภทอื่นๆ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) กระจกโฟลตใส (Float glass) คือ กระจกโปร่งใสที่มีผิวทั้งสองด้านเรียบสนิท โดยที่กระจกประเภทนี้ยอมให้แสงสว่างผ่านเข้าสู่ภายในอาคารได้สูง ทนทานต่อการขีดขีดได้ดี จึงนิยมนำกระจกโฟลตใสไปใช้เป็นผนังภายนอกอาคาร และยังใช้เป็นกระจกพื้นฐานในการนำไปผลิตเป็น

กระจกประเภทอื่นๆ แต่ข้อเสียของกระจกโพลติส คือ ความร้อนสามารถผ่านเข้าสู่ภายในอาคารได้สูง

2) กระจกสีตัดแสง (Tinted glass) คือ กระจกที่มีการผลิตคล้ายกับกระจกใส แต่มีการผสมโลหะออกไซด์ลงไปในเรื่องกระจกระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้กระจกประเภทนี้เกิดเป็นสีต่างๆ โดยกระจกสีตัดแสงนี้นิยมใช้ในการประดับตกแต่งเนื่องจากมีสีสวยๆ และยังสามารถช่วยลดรังสีอาทิตย์ที่ส่องเข้ามาภายในอาคารได้อีกด้วย แต่ข้อเสียของกระจกประเภทนี้ คือ การผสมโลหะออกไซด์ลงไปในเรื่องกระจก ส่งผลทำให้กระจกดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์เข้ามาสะสมภายในกระจกมากขึ้น ส่งผลทำให้กระจกแตกได้ง่าย

2.7.2 กระจกอบความร้อน

กระจกอบความร้อน (Heat treated glass) คือ การนำกระจกใส (Float glass) มาผ่านกรรมวิธีการอบและทำให้เย็นตัวอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้กระจกมีสมบัติในการรับแรงมากขึ้น แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) กระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered safety glass) คือ กระจกใส (Float glass) ที่นำมาผ่านกระบวนการอบความร้อนอีกครั้งหนึ่ง แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยกระจกนิรภัยเทมเปอร์สามารถรับแรงได้มากกว่ากระจกใสที่มีความหนาเท่ากันได้ 5-10 เท่า ซึ่งกระจกนิรภัยเทมเปอร์เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงมาก เช่น ประตูกระจก, ผนังกระจกที่ไม่มีกรอบกระจก และผนังด้านนอกอาคารสูง เป็นต้น กระจกนิรภัยเทมเปอร์เมื่อแตกจะมีลักษณะเป็นเม็ล็ดข้าวโพด จึงนิยมติดฟิล์มนิรภัยหรือนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของกระจกนิรภัยหลายชั้น

2) กระจกฮีตสเตรงเทน (Heat strengthened glass) คือ กระจกใส (Float glass) ที่นำมาผ่านกระบวนการอบความร้อนอีกครั้งหนึ่ง แต่ปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระจกฮีตสเตรงเทนน้อยกว่ากระจกนิรภัยเทมเปอร์ แต่ยังสามารถรับแรงได้มากกว่ากระจกใสที่มีความหนาเท่ากันได้ 2-3 เท่า ข้อดีของกระจกฮีตสเตรงเทน คือ สามารถทนความร้อนได้มากกว่ากระจกนิรภัยเทมเปอร์ และเมื่อกระจกประเภทนี้แตกจะยึดติดอยู่กับกรอบกระจก ไม่ร่วงหล่นเหมือนกระจกนิรภัยเทมเปอร์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปทำเป็นผนังภายนอก โดยเฉพาะผนังกระจกระบบแขวน

2.7.3 กระจกเคลือบผิวหรือกระจกสะท้อนแสง

กระจกเคลือบผิวหรือกระจกสะท้อนแสง (Surface coated glass) คือ การนำกระจกใส (Float glass) ไปเคลือบโลหะออกไซด์บนผิวกระจก เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงและความร้อน การเคลือบโลหะออกไซด์นี้ แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ Hard coat และ Soft coat โดยการเคลือบโลหะออกไซด์แบบ Hard coat เป็นการเคลือบโลหะออกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกับตัวกระจก โดยการอบกระจกให้อ่อนตัวแล้วจึงโรยผงโลหะออกไซด์บนกระจก เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีข้อเสีย คือ สีและการสะท้อนแสง

ของกระจกไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ส่วนการเคลือบโลหะออกไซด์แบบ Soft coat นั้นเป็นการพ่นผงโลหะออกไซด์ที่ผิวของกระจก ทำให้มีข้อเสีย คือ ไม่ทนต่อการขีดขีด ซึ่งกระจกเคลือบผิวหรือกระจกสะท้อนแสงนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) กระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflective glass) คือ การนำกระจกใส (Float glass) มาเคลือบผิวด้วยโลหะออกไซด์ ทำให้กระจกมีค่าสะท้อนแสงค่อนข้างสูง แต่ค่าความโปร่งแสงค่อนข้างต่ำ ข้อดีกระจกประเภทนี้ คือ สามารถสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้าสู่ตัวอาคาร ส่งผลทำให้รังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่ภายในตัวอาคารน้อยลง กระจกประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นผนังภายนอกอาคาร ที่คำนึงถึงการประหยัดพลังงาน แต่ข้อเสียของกระจกประเภทนี้ คือ ถ้าอุณหภูมิภายนอกกับภายในตัวอาคารแตกต่างกันมากเกินไป อาจทำให้กระจกแตกร้าวได้

2) กระจกแผ่นรังสีต่ำ (Low emissivity glass; Low-e glass) คือ กระจกที่มีกระบวนการผลิตคล้ายกับกระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์ แตกต่างที่โลหะที่ใช้ในการเคลือบกระจกแผ่นรังสีต่ำมีโลหะเงินบริสุทธิ์เป็นส่วนประกอบ ทำให้มีสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนต่ำกว่ากระจกธรรมดา ซึ่งช่วยลดการแผ่รังสีความร้อนสู่ภายในอาคาร และยังช่วยในการถ่ายโอนความร้อนของตัวกระจกได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ลดโอกาสการแตกร้าวของกระจกซึ่งเป็นปัญหาของกระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกและภายในที่มีค่าแตกต่างกันมากเกินไป รวมไปถึงกระจกแผ่นรังสีต่ำยอมให้แสงผ่านมากกว่ากระจกสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์อีกด้วย แต่กระจกแผ่นรังสีต่ำมีข้อเสีย คือ สามารถลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้น้อยกว่ากระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์ ในส่วนของการใช้งานกระจกแผ่นรังสีต่ำคล้ายกับกระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์ แต่สามารถใช้ในพื้นที่ที่มีผลต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในตัวอาคารสูงกว่ากระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์

2.7.4 กระจกดัดแปลง

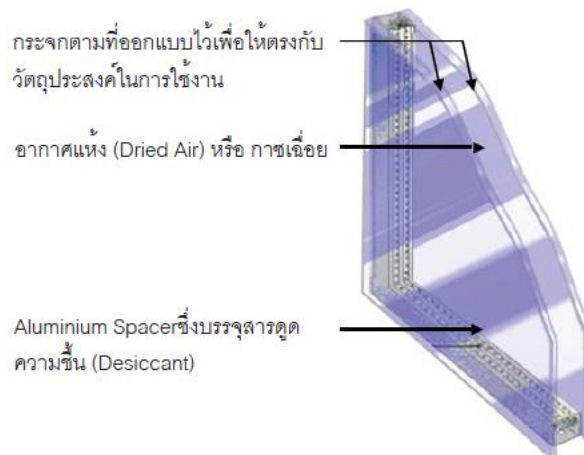
กระจกดัดแปลง (Processed glass) คือ การนำเอากระจกที่กล่าวมาข้างต้นมาประกอบเข้าด้วยกัน ตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป เพื่อเป็นการนำเอาข้อดีของกระจกแต่ละประเภทมารวมกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) กระจกฉนวน (Insulation glass) คือ กระจกที่ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่นขึ้นไปมาประกบกัน โดยมีเฟรมอลูมิเนียมที่บรรจุสารดูดความชื้นคั่นอยู่ตรงกลาง แล้วบรรจุฉนวนป้องกันความร้อน เช่น อากาศแห้งหรือก๊าซเฉื่อยไว้ภายใน ดังรูปที่ 2.9 โดยที่อากาศหรือก๊าซเฉื่อยที่บรรจุภายในช่องระหว่างกระจกมีลักษณะคล้ายกับสุญญากาศซึ่งมีสมบัติเฉพาะในการป้องกันความร้อนจากภายนอก ซึ่งกระจกชนิดนี้นิยมใช้งานมี 2 ชนิด ได้แก่

1.1) กระจกฮีตมิเรอร์ (Heat mirror glass) เป็นกระจกที่ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่นขึ้นไป โดยกระจกที่อยู่ด้านนอกของอาคารเคลือบสารที่ทำให้เกิดสภาพการแผ่รังสีต่ำ และมีการบรรจุ

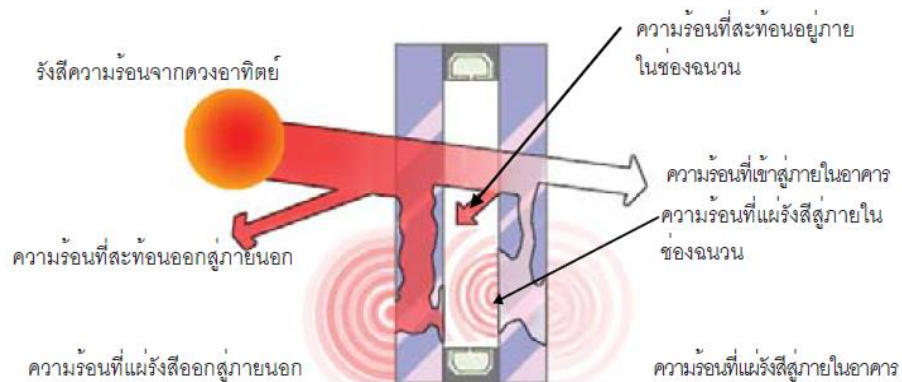
อากาศแห้งที่ช่องว่างระหว่างแผ่นกระจก กระจกฮีตมิเรอร์นี้สามารถสะท้อนความร้อนได้ประมาณ 80%

1.2) กระจกฮีตสโตป (Heat stop mirror) มีลักษณะคล้ายกับกระจกฮีตมิเรอร์ แต่แตกต่างตรงที่ช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน ส่งผลให้สามารถสะท้อนความร้อนออกไปจากกระจกได้มากกว่ากระจกฮีตมิเรอร์



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกระจกฉนวน [10]

กระจกฉนวน (Insulation glass) เหมาะสำหรับอาคารที่มุ่งเน้นด้านการประหยัดพลังงานภายในอาคาร เนื่องจากตัวกระจกมีสมบัติการยอมให้แสงสว่างผ่านเข้ามาภายในอาคารได้มาก แต่ความร้อนผ่านเข้ามาได้น้อย เนื่องจากสามารถลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ผ่านกระจกฉนวนเข้าสู่ภายในอาคารโดยการสะท้อนความร้อนออกสู่ภายนอก ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสะท้อนรังสีความร้อนจากรังสีอาทิตย์ของกระจกฉนวน [10]

2) กระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated safety glass) คือ กระจกที่ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่นขึ้นไปมาประกบกัน โดยมีแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิล (Poly Vinyl Butyral; PVB) อยู่ระหว่างกระจกแต่ละแผ่น ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งกระจกนิรภัยหลายชั้น มีข้อดี คือ เมื่อกระจกประเภทนี้แตก ตัวกระจกจะติดกับ PVB ทำให้ไม่ร่วงหล่น นอกจากนี้ยังสามารถนำกระจกนิรภัยหลายชั้นไปใช้งานในการออกแบบเชิงประหยัดพลังงานได้ เนื่องจากสามารถเลือกประเภทของกระจกที่นำมาประกบกันเพื่อให้ได้สมบัติในการลดความร้อนจากภายนอกอาคารที่เข้าสู่ภายในตัวอาคาร รวมไปถึงแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลบิวทิลบางชนิดยังมีสมบัติเป็นฉนวนช่วยลดความร้อนได้อีกด้วย กระจกนิรภัยหลายชั้นจึงเหมาะสำหรับสถานที่ที่ต้องการความปลอดภัยเป็นพิเศษ เช่น พนักภายนอกอาคารที่เป็นอาคารสูง และตู้ปลาขนาดใหญ่ เป็นต้น รวมไปถึงสถานที่ที่ต้องการใช้แสงธรรมชาติสูง แต่ต้องการกระจกที่มีค่าการส่องผ่านความร้อนต่ำเพื่อช่วยลดการส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เช่น อาคารสูง โรงพยาบาล และสถานที่ราชการ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของกระจกนิรภัยหลายชั้น [10]

2.7.5 กระจกเพื่อการใช้งานเฉพาะทาง

กระจกเพื่อการใช้งานเฉพาะทาง (Application glass) คือ กระจกที่ดัดแปลงเพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่างหรือเพื่อทำให้เกิดความสวยงาม เช่น

- 1) กระจกลอยดล (Pattern glass) คือ การนำกระจกใส (Float glass) ที่ยังไม่แข็งตัว มาเข้ากระบวนการโดยผ่านลูกกลิ้งที่มีลวดลายพิมพ์อยู่ ทำให้กระจกเกิดลวดลายที่สวยงาม
- 2) กระจกเสริมลวด (Wired glass) คือ กระจกที่ใส่แผงตาข่ายลวดลงในตัวกระจกในขณะที่กระจกกำลังหลอมเหลวอยู่ เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของกระจก
- 3) กระจกกันกระสุน คือ กระจกที่ประกอบไปด้วยกระจกนิรภัยชนิดพิเศษหลายแผ่น มาประกอบติดกันโดยมีแผ่นฟิล์มพลาสติกอยู่ตรงกลาง ทำให้กระจกประเภทนี้มีความหนาและแข็งแรงมากเป็นพิเศษ

2.8 โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร

โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (Building Energy Code; BEC) เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบอาคารต่อเกณฑ์มาตรฐานการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ภายใต้หลักเกณฑ์ของกฎกระทรวง กำหนดประเภทหรือ ขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ วิธีในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 โดยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) นี้สามารถวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานและการถ่ายโอนความร้อนผ่านกรอบอาคาร และยังเป็นตัวช่วยในการออกแบบอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงานอีกด้วย ในการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานและการถ่ายโอนความร้อนผ่านกรอบอาคาร โดยใช้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) จำเป็นต้องป้อนตัวแปรเข้าไปในโปรแกรม เช่น ชนิดของวัสดุก่อสร้างที่ใช้ของกรอบอาคาร ข้อมูลระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ข้อมูลระบบปรับอากาศ เป็นต้น

โดยโครงสร้างของโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ฐานข้อมูล (Database) แบบจำลองอาคาร (Building model) และรายงานผลวิเคราะห์ (Report)

2.8.1 ฐานข้อมูล

ฐานข้อมูล (Database) ในโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

2.8.1.1 ระบบกรอบอาคาร

ข้อมูลของระบบกรอบอาคาร (Envelope system) ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1) วัสดุ (Material)

ข้อมูลในส่วนของวัสดุกรอบอาคารแสดงถึงประเภทและสมบัติของผนังทึบและผนังโปร่งแสงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

2) องค์ประกอบผนัง (Component of section)

ข้อมูลในส่วนขององค์ประกอบผนังประกอบด้วย ประเภทและสมบัติของผนังทึบและผนังโปร่งแสง รวมถึงความหนาของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารที่ทำการศึกษา

3) ส่วนของผนัง (Section of wall)

ข้อมูลในส่วนของผนังแสดงถึงพื้นที่ของผนังอาคารแต่ละด้านที่ใช้ในการศึกษา

4) ผนังอาคาร (Wall)

ข้อมูลในส่วนของผนังอาคารแสดงถึงมุมอะซิมุม (Azimuth angle) มุมเอียงของระนาบที่พิจารณา (Inclination angle) และสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด (Shading coefficient) ของผนังอาคารที่ใช้ในการศึกษา

2.8.1.2 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

ข้อมูลในส่วนของระบบแสงสว่างแสดงถึงประเภท จำนวน และกำลังไฟฟ้าของระบบแสงสว่างที่ติดตั้งภายในอาคาร เพื่อใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (W/m^2) ของพื้นที่ใช้งาน

2.8.1.3 ระบบปรับอากาศ

ข้อมูลในส่วนของระบบปรับอากาศ (Air conditioning system) แสดงถึงจำนวน ขนาด กำลังไฟฟ้าและประเภทของเครื่องปรับอากาศ โดยแบ่งประเภทของเครื่องปรับอากาศออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- 1) Split type & Window type
- 2) Packaged air-cooled unit
- 3) Packaged water-cooled unit
- 4) Central air-conditioning system

2.8.1.4 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ (PV system) แสดงถึงประสิทธิภาพรวมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงทิศและมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.8.1.5 ระบบทำน้ำร้อน

ข้อมูลในส่วนของอุปกรณ์ในระบบทำน้ำร้อน (Hot water system) แสดงถึงชนิดและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทำน้ำร้อน

2.8.1.6 อุปกรณ์อื่นๆ

ข้อมูลในส่วนของอุปกรณ์อื่นๆ (Other equipment) แสดงถึงชื่อและความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า

2.8.2 แบบจำลองอาคาร

ในแบบจำลองอาคาร (Building model) แสดงถึงชื่อของพื้นที่ในอาคาร และรายการอุปกรณ์ไฟฟ้าของพื้นที่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.8.2.1 ชื่อพื้นที่ในอาคาร

ชื่อพื้นที่ในอาคารประกอบด้วยชั้นอาคารและขนาดพื้นที่

2.8.2.2 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ของพื้นที่

รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ของพื้นที่แสดงถึงประเภทและจำนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างและระบบปรับอากาศ

2.8.3 รายงานผลวิเคราะห์

การรายงานผลของโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร (BEC) แบ่งการรายงานออกเป็นระบบต่างๆ ดังนี้

2.8.3.1 กรอบอาคาร

รายงานผลการวิเคราะห์ในส่วนของกรอบอาคาร (Envelope system) แสดงถึงผลการคำนวณค่าการถ่ายโอนความร้อนผ่านผนัง (OTTV) และค่าการถ่ายโอนความร้อนผ่านหลังคา (RTTV) โดยค่า OTTV และ RTTV แสดงทั้งในส่วนของค่ารวมทั้งอาคารและแยกตามพื้นที่ผนังแต่ละส่วน

2.8.3.2 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

รายงานผลการวิเคราะห์ในส่วนของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting system) แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในส่วน of ระบบไฟฟ้าแสงสว่างและค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด โดยสามารถแสดงทั้งในส่วน of ค่ารวมทั้งอาคารและแยกตามชั้นของอาคาร

2.8.3.3 ระบบปรับอากาศ

รายงานผลการวิเคราะห์ในส่วน of ระบบปรับอากาศ (Air-Conditioning system) แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในส่วน of ระบบปรับอากาศและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ (COP) โดยแสดงแยกเป็นรายอุปกรณ์

2.8.3.4 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

รายงานผลการวิเคราะห์ในส่วนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV system) แสดงถึงประสิทธิภาพรวมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พื้นที่ ทิศทางและมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงแสดงค่าประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อปี

2.8.3.5 ระบบทำน้ำร้อน

รายงานผลการวิเคราะห์ในส่วนของระบบทำน้ำร้อน (Hot water system) แสดงถึงประสิทธิภาพรวมของระบบทำน้ำร้อน

2.8.3.6 การใช้พลังงานรวมของอาคาร

รายงานผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานรวมของอาคาร (Whole building energy consumption) แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานรวมต่อปีของอาคารที่ศึกษา และสามารถจำแนกปริมาณพลังงานที่ใช้ตามชั้นและพื้นที่ของอาคาร

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สถาพร สกุลวัฒนะ [11] ได้ศึกษาเรื่องสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนผ่านกระจกสองชั้นและกระจกชั้นเดียว โดยทำการออกแบบสร้างอาคารจำลองและทำการติดตั้งกระจกสองชั้นและกระจกชั้นเดียวเพื่อประเมินค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ ผลจากการศึกษา พบว่า ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของอาคารจำลองเมื่อติดตั้งกระจกชั้นเดียว มีค่าเท่ากับ 63.77 W/m^2 แต่เมื่อมีการปรับปรุงโดยติดตั้งกระจกสองชั้น พบว่า ค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของอาคารลดลงเหลือ 43.24 W/m^2 และเมื่อพิจารณาเรื่องทิศทางของอาคาร พบว่า การติดตั้งกระจกสองชั้นในทิศใต้ สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศได้ $42,289 \text{ kWh/year}$ และมีระยะเวลาคืนทุน 4.73 ปี

วิชุดา อยู่ยงค์ [12] ได้ศึกษาเรื่องการประเมินเทคโนโลยีอาคารสำนักงานที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง โดยใช้โปรแกรม Energy Plus ในการจำลองการใช้พลังงานของอาคาร และคำนวณการใช้พลังงานของระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบปรับอากาศ รวมไปถึงการคำนวณหาการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนัง (OTTV) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกรอบอาคาร ซึ่งแนวทางในการปรับปรุงกรอบอาคาร คือ การเลือกวัสดุที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่ การติดตั้งกระจกสะท้อนแสงโซลาร์เทค SS114, การติดตั้งกระจกฉนวนความร้อนแพร์เทค โลว-อี สีเขียวเข้ม, การติดฟิล์ม V-Kool รุ่น VK40 และ การติดฟิล์ม Lamina รุ่น DL30 ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงอาคาร

สำนักงานกรณีศึกษาโดยการติดตั้งกระจกสะท้อนแสงโซลาร์เทค SS114 สามารถลดค่าการถ่ายโอนความร้อนรวมของผนัง (OTTV) ได้สูงสุด คือ สามารถลดได้จาก 55.16 W/m^2 เหลือ 42.33 W/m^2 ส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง $1,406 \text{ MWh/year}$ และมีระยะเวลาคืนทุน 6.7 ปี

ศราวุธ ศรีนุศิษฐ์ [13] ได้ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เหมาะสมในอาคารโรงพยาบาลเลิดสิน โดยใช้โปรแกรม DOE-2 ในการประเมินการใช้พลังงานในอาคาร อาคารที่ศึกษาได้แก่ อาคารอำนวยการและอาคาร 33 ปี ในการศึกษานี้ทำเพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงกรอบอาคารเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่ภายในอาคาร ส่งผลให้ภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศลดลง โดยแนวทางที่ใช้ในการปรับปรุงกรอบอาคาร ได้แก่ การปรับปรุงผนังทึบ, การปรับปรุงหลังคาคอนกรีต และ การปรับปรุงกระจกหน้าต่าง ผลการศึกษาพบว่า แนวทางในการปรับปรุงกรอบอาคาร 33 ปี ด้วยวิธีการปรับปรุงกระจกหน้าต่าง โดยการเปลี่ยนเป็นกระจกตัดแสงสีเขียว สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด คือ สามารถลดได้ $45,046 \text{ kWh/year}$ และมีระยะเวลาคืนทุน 5.2 ปี ส่วนแนวทางในการปรับปรุงกรอบอาคารอำนวยการ พบว่า การปรับปรุงหลังคาคอนกรีต โดยการปูฉนวนใยแก้วบนฝ้าเพดาน สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด คือ สามารถลดได้ $36,979 \text{ kWh/year}$ และมีระยะเวลาคืนทุน 3.8 ปี

Cordoba และคณะ [14] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานด้าน HVAC โดยการใช้กระจกเคลือบผิวในอาคารสำนักงานที่ตั้งอยู่ในเมืองมาดริด ประเทศสเปน และใช้โปรแกรม DOE 2.1E วิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารสำนักงาน การศึกษาได้ใช้กระจกเคลือบผิวสองชั้นทั้งหมด 4 ประเภท มาทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร ได้แก่ ประเภท A คือ กระจกเคลือบสี/ช่องว่างอากาศ/กระจกใส ประเภท B คือ กระจกเคลือบสีสะท้อนแสง/ช่องว่างอากาศ/กระจกใส ประเภท C คือ กระจกเคลือบสีสะท้อนแสง/ช่องว่างอากาศ/กระจกใสเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ และ ประเภท D คือ กระจกสีเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ/ช่องว่างอากาศ/กระจกใสเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ โดยความหนาของกระจกเคลือบผิวแผ่นนอกและแผ่นในมีความหนาเท่ากัน คือ 6 มิลลิเมตร และมีช่องว่างอากาศ 12.7 มิลลิเมตร สำหรับอาคารสำนักงานที่ใช้ในการศึกษามีพื้นที่กระจก $1,500 \text{ ตารางเมตร}$ หรือคิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผนังทั้งหมด จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้กระจกประเภท C คือ กระจกเคลือบสีสะท้อนแสง/ช่องว่างอากาศ/กระจกใสเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด คือ 12 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกระจกเคลือบสีประเภท A นอกจากนี้กระจกประเภท C ส่งผลให้ค่าการออกแบบความสามารถในการทำความเย็นมีค่าต่ำที่สุด คือ สามารถลดได้ 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกระจกเคลือบสีประเภท A แต่หากพิจารณาถึงค่าการออกแบบความสามารถในการทำความร้อน พบว่า การเลือกใช้กระจกประเภท D คือ กระจกสีเคลือบสารแผ่นรังสี

ต่ำ/ช่องว่างอากาศ/กระจกใสเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ ส่งผลทำให้ค่าการออกแบบความสามารถในการทำ ความร้อนมีค่าที่ต่ำที่สุด คือ สามารถลดได้ 32 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกระจกเคลือบสีประเภท A Sekhar และ Toon [15] ได้ศึกษาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า, ภาระการทำความเย็น, ต้นทุนตลอดอายุ การใช้งานของผนังกระจก และการปล่อยมลภาวะ โดยการใช้กระจก 2 ชั้นในอาคารสูง 20 ชั้น ที่ตั้งอยู่ใน ประเทศสิงคโปร์ และใช้โปรแกรม DOE 2.1E ในการประเมินปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและ ภาระการทำความเย็น รวมไปถึงการใช้โปรแกรม Building Life Cycle Cost (BLCC) version 4.3 ใน การประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของผนังกระจก กระจกสองชั้นที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท A คือ กระจกโฟลต/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ประเภท B คือ กระจก สะท้อนแสง/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ประเภท C คือ กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ/ ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ซึ่งกระจกแผ่นนอกแต่ละประเภท แบ่งออกเป็น 3 สี คือ ใส, สีเขียว และสีน้ำเงินเข้ม โดยความหนาของกระจกแผ่นนอกและแผ่นในมีความหนาเท่ากัน คือ 6 มิลลิเมตร และมีช่องว่างอากาศ 12 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า กระจกสองชั้นประเภท C คือ กระจกสะท้อน แสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีน้ำเงินเข้ม/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ต่ำที่สุด คือ 1,523,100 kWh หรือคิดเป็นสัดส่วนที่ลดลง 19.77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระจกสองชั้น ประเภท A นอกจากนี้กระจกสองชั้นประเภท C คือ กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีน้ำเงิน เข้ม/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ยังมีค่าภาระการทำความเย็นต่ำที่สุด คือ 315.23 kW หรือคิดเป็น สัดส่วนที่ลดลง 43.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกระจกสองชั้นประเภท A สำหรับการศึกษาต้นทุนตลอด อายุการใช้งานของผนังกระจก พบว่า กระจกสองชั้นประเภท C คือ กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่ รังสีต่ำสีน้ำเงินเข้ม/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ยังคงมีต้นทุนตลอดอายุการใช้งานที่คิดมูลค่า เทียบเท่าปัจจุบันของผนังกระจกต่ำที่สุดเช่นกัน คือ 470,932.1 US\$ ในส่วนของการปล่อยมลภาวะ พบว่า กระจกสองชั้นประเภท C คือ กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีน้ำเงินเข้ม/ช่องว่าง อากาศ/กระจกโฟลตใส มีค่าการปล่อยมลภาวะต่ำที่สุดเช่นกัน คือ มีการปล่อย CO₂, SO₂ และ NO_x เท่ากับ 1,476.4 มิลลิกรัม, 4,664.3 กิโลกรัม และ 4,447.7 กิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นสัดส่วนที่ ลดลง 19.77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระจกประเภท A

Yasar และ Kalfa [16] ได้ศึกษาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของผนัง กระจก และระยะเวลาคืนทุน โดยการใช้กระจกสองชั้นในอาคารที่พักอาศัยที่ตั้งอยู่ในเมืองแทร์บซอน ประเทศตุรกี และใช้โปรแกรม Design Builder v.1.8 ในการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ซึ่งอาคารที่พัก อาศัยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ F และ แบบ C โดยอาคารแบบ F มีพื้นที่กระจกทั้งหมด 8.3 ตารางเมตร โดยกระจกอยู่ทางทิศเหนือ, ทิศใต้ และทิศตะวันออก เท่ากับ 40.72, 57.83 และ 1.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอาคารแบบ C มีพื้นที่กระจกทั้งหมด 10.9 ตารางเมตร โดยกระจกอยู่ทาง

ทิศตะวันออกและทิศใต้ เท่ากับ 34.68 และ 63.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กระจกสองชั้นที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 8 ประเภท ได้แก่

1. กระจกโฟลตใส/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
2. กระจกโฟลตสีฟ้า/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
3. กระจกโฟลตสีเขียว/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
4. กระจกสะท้อนแสงใส/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
5. กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีฟ้า/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
6. กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีเขียว/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
7. กระจกเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ (Pyrolytic coated)/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส
8. กระจกโฟลตใส/ช่องว่างอากาศ/กระจกเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ

โดยความหนาของกระจกแผ่นนอกและแผ่นในมีความหนาเท่ากัน คือ 6 มิลลิเมตร และมีช่องว่างอากาศ 12 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า กระจกสองชั้นประเภท กระจกเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส มีค่าการใช้พลังงานต่ำที่สุดทั้งในอาคารที่พักอาศัยแบบ F และแบบ C คือ มีค่าเท่ากับ 617.12 และ 989.04 kWh ตามลำดับ หรือมีค่าลดลง 40.29 และ 41.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกระจกโฟลตใส/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส สำหรับการศึกษาต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของผนังกระจก พบว่า กระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีฟ้า/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส สามารถลดต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของผนังกระจกได้สูงที่สุด ทั้งในอาคารที่พักอาศัยแบบ F และ แบบ C คือสามารถลดได้ 2,277.46 และ 3,827.58 TL ตามลำดับ (1 TL = US\$0.6811) และหากพิจารณาในส่วนของระยะเวลาคืนทุน พบว่า กระจกโฟลตสีฟ้า/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส มีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุดทั้งในอาคารที่พักอาศัยแบบ F และแบบ C คือ มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3.2 และ 2.7 ปี ตามลำดับ ส่วนกระจกสะท้อนแสงเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำสีฟ้า/ช่องว่างอากาศ/กระจกโฟลตใส ในอาคารที่พักอาศัยแบบ F และ แบบ C มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3.6 และ 3 ปี ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น พบว่า การลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารผ่านทางผนังกระจก เป็นการลดภาระการทำความเย็นและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนประเภทของกระจกให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนน้อยลง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาและเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน โดยทำการเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างการใช้นั่งกระจกประเภทกระจกโฟลตใสกับกระจกสีสะท้อนแสงหรือกระจกสีเคลือบสารแผ่นรังสีต่ำ โดยที่ยังไม่พบการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างกระจกโฟลตใสกับกระจกใสอนุรักษ์พลังงาน สาเหตุที่จำเป็นต้องใช้กระจกใสที่มีค่าการส่อง

ผ่านของแสงธรรมชาติสูงเนื่องมาจากอาคารบางประเภท เช่น โชว์รูมจำหน่ายรถยนต์ต้องการแสดงสินค้าให้มองเห็นอย่างชัดเจนจากภายนอก จึงไม่สามารถใช้กระจกสีหรือกระจกสะท้อนแสงได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาเพื่อหาประเภทของกระจกใสที่เป็นกระจกอนุรักษ์พลังงาน เพื่อช่วยลดค่าความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคารโชว์รูมจำหน่ายรถยนต์ โดยการใช้โปรแกรม Building Energy Code (BEC) ในการวิเคราะห์ค่าการถ่ายโอนความร้อนของผนังกระจกด้านนอกอาคาร งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกประเภทของผนังกระจกสำหรับการออกแบบกรอบอาคารโชว์รูมจำหน่ายรถยนต์