

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนประกอบไปด้วย การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน รวมถึงองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ ปัจจัยการส่งผ่านความร้อนทางระบบหน้าต่างกระจก และปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ ต่อจากนั้นเป็นรายงานผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านเปลือกอาคารส่วนที่เป็นกระจกโดยให้ความสำคัญกับระบบหน้าต่างกระจกที่มีความเป็นฉนวน ความเป็นมารวมถึงการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อเก็บกักความร้อน การประกอบกับวัสดุโครงสร้างเปลือกอาคารเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร และแนวทางในการทำงานร่วมกับระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น

2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน

กระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่อบริเวณสองบริเวณมีอุณหภูมิแตกต่างกันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า กระบวนการที่เกิดขึ้นมีสามแบบ คือ การนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเป็นของแข็งหรือของไหลนิ่ง การพาความร้อนเกิดขึ้นขณะที่ของไหลหรือตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณอื่น และการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหรือระหว่างผิวกับบริเวณโดยรอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นสูง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนคือการถ่ายโอนความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนไปในตัวกลางของแข็งที่อยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ การพาแห่งอะลูมิเนียมที่ปลายด้านหนึ่งส่งผลให้อนุภาคมีการสั่นต่อเนื่องกันไปจนถึงปลายอีกด้านหนึ่งที่ไม่ได้สัมผัสเปลวไฟ ดังนั้นแล้วความร้อนจึงถ่ายโอนได้ด้วยการสั่นของอนุภาคหรือโมเลกุลของอะลูมิเนียม ตัวนำความร้อนที่ดีได้แก่ โลหะชนิดต่าง ๆ มักถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความร้อนดังเช่น ภาชนะหุงต้มอาหาร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อไอน้ำ เป็นต้น ขณะที่วัสดุตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ได้แก่ ไม้ พลาสติก และใยแก้ว จึงถูกนำไปทำเป็นฉนวนกันความร้อน ทั้งในด้านอุตสาหกรรมโรงงานและใช้เป็นส่วนประกอบโครงสร้างเปลือกอาคาร เช่น ผนัง และหลังคา

การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางของแข็งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) สมการในหนึ่งมิติเขียนได้เป็น

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

เมื่อ q คือ ความร้อนหรือกระแสความร้อน, W

k คือ ค่านำความร้อน, W/m.K

dT/dx คือ เกรเดียนอุณหภูมิ, K/m

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่มีการถ่ายโอนความร้อน, m^2

สามารถจัดรูปสมการในรูปความต้านทานความร้อนลักษณะเดียวกับสมการทางไฟฟ้าตามกฎของโอห์มได้ดังนี้

$$R_{cd} \equiv \frac{(T_1 - T_2)}{q} = \frac{L}{kA} \quad (2.2)$$

เมื่อ R_{cd} คือ ค่าความต้านทานความร้อน, K/W

$T_1 - T_2$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิสองบริเวณ, K

L คือ ความยาวของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่าน, m

2.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวหนึ่งผ่านตัวกลางเคลื่อนที่ ได้แก่ ของเหลวและแก๊ส ดังการระบายความร้อนออกจากผนังในอาคารด้วยกระแสลมอาจเป็นได้ทั้งแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive) คือแบบมีกระแสอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติ หรือแบบที่ใช้พลังงาน (Active) โดยอาศัยอุปกรณ์ เช่น พัดลม เป็นต้น บังคับให้เกิดกระแสอากาศไหลเวียนผ่านบริเวณที่ต้องการ โดยกระแสของไหลจะพาความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งที่ตัวกลางนี้เคลื่อนที่ผ่าน การถ่ายโอนความร้อนด้วยวิธีนี้เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_{cv}) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวและกระแสของไหล ($T_s - T_f$) พื้นที่ของพื้นผิวที่ถูกพาความร้อนออกไป (S) ดังเขียนสมการได้

$$q = h_{cv} S (T_s - T_f) \quad (2.3)$$

สามารถจัดรูปสมการความต้านทานความร้อนแบบการพาความร้อนได้เช่นเดียวกับกับความต้านทานความร้อนแบบการนำความร้อนด้วยลักษณะของสมการทางไฟฟ้าดังนี้

$$R_{cv} \equiv \frac{1}{h_{cv} S} \quad (2.4)$$

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนคือการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันสองผิวหรือระหว่างผิวกับบริเวณแวดล้อมโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ตัวอย่างที่พบเห็นได้คือการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลก การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นต่อความต่างอุณหภูมิดังสมการ

$$q = \sigma AF(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.5)$$

เมื่อ F คือ ผลจากสมบัติพื้นผิวและรูปร่าง

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน มีค่าเท่ากับ $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

สมการข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_r) ดังนี้ (Bejan and Kraus, 2003, Chapter 1)

$$q = h_r S (T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

โดย $h_r = \sigma F (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)$

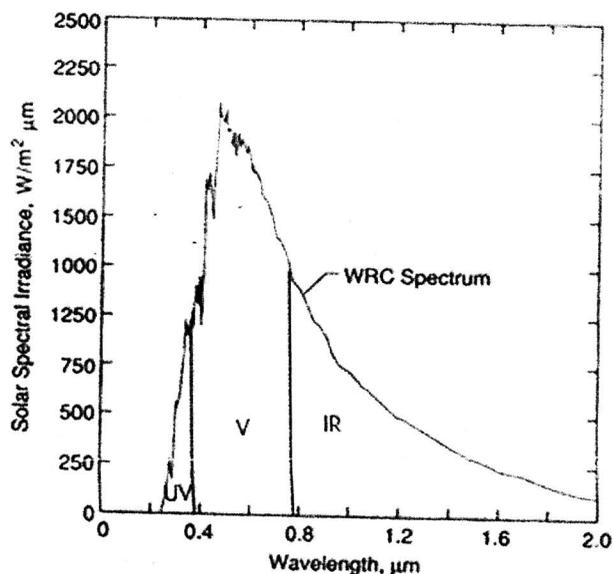
หรือเมื่อ $T_1 - T_2$ มีค่าน้อยมาก $h_r = 4\sigma F (T_1 T_2)^{3/2}$

ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนเขียนได้เป็น

$$R_r \equiv \frac{1}{h_r S} \quad (2.7)$$

2.2 แสงอาทิตย์และความร้อน

พลังงานที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยารวมตัวกันทางนิวเคลียร์ ณ บริเวณแกนกลางของดวงอาทิตย์ อยู่ในรูปของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา พลังงานส่วนนี้ถ่ายเทออกมายังผิวนอกโดยมีความยาวคลื่นมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณแกนสูงกว่าที่ผิว สเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์สามารถประมาณค่าได้ด้วยสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5777 K (the effective blackbody temperature) จากการที่เส้นทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึงเปลี่ยนแปลงไปตลอดปี ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation, G_{on}) มีค่าต่างกันทุกวัน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงประมาณ $\pm 3\%$ รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบนอกระบบบรรยากาศของโลกมีค่ากำลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 1353 W/m^2 คือค่า solar constant ค่ามาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันคือ 1367 W/m^2 อ้างอิงข้อมูลของ WRC (The world radiation centre) หรือ $433 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{hr}$ หรือ $4.92 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{hr}$ (Duffie and Beckman, 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าสเปกตรัมของการแผ่รังสีที่ผิวโลกเมื่อไม่คิดอิทธิพลของชั้นบรรยากาศเข้ามาเกี่ยวข้องมีค่าใกล้เคียงกับการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5800 K ทั้งความยาวคลื่น และพลังงานรวมที่ปลดปล่อยออกมา สเปกตรัมของแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วง คือ ช่วงรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า $0.38 \mu\text{m}$ ช่วงรังสีที่มองเห็น (Visible) มีความยาวคลื่นระหว่าง $0.38 \mu\text{m}$ และ $0.78 \mu\text{m}$ และช่วงรังสีใต้แดง (Infrared) มีความยาวคลื่นมากกว่า $0.78 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

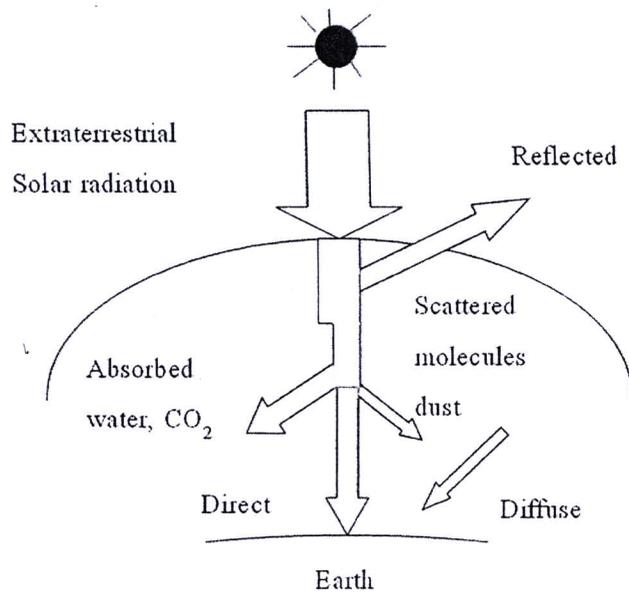


รูปที่ 2.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ช่วงคลื่นรังสีเหนือม่วง (UV) รังสีมองเห็น (V) และรังสีใต้แดง(IR)

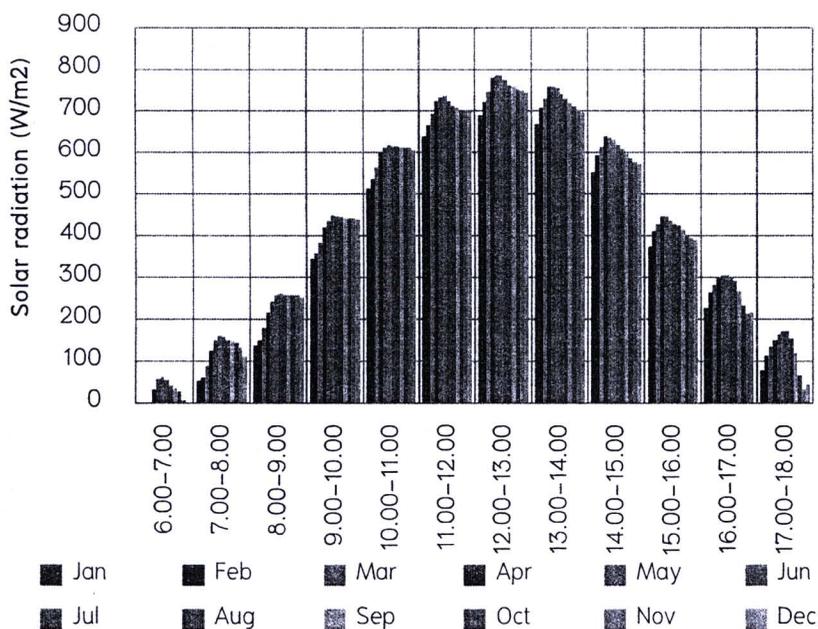
(เพิ่มรายละเอียดรูปจาก Duffie and Beckman, 2006)

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบนอกชั้นบรรยากาศเรียกว่ารังสีนอกโลก ส่วนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาตกกระทบบนผิวโลกและมีทิศอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์เรียกว่ารังสีตรง (beam or direct radiation) ส่วนของรังสีที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊ส ฝุ่นละออง และวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงซึ่งมาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าก่อนตกกระทบผิวรับแสงเรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) ดังรูปที่ 2.2 ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย เรียกว่า รังสีรวม (total radiation) ในการพิจารณารังสีรวมนั้นจะจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่นไม่เกิน 3 μm ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงอาทิตย์ โดยไม่พิจารณารวมถึงพลังงานคลื่นยาวที่เกิดจากการแผ่รังสีของผิวโลกและบรรยากาศ เนื่องจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีทำให้ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ในแต่ละวันของปีไม่คงที่ส่งผลถึงการเกิดฤดูกาล จึงมีผลทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของวัน ตามวันของปี ตำแหน่งของพื้นที่บนโลก ดังแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลกดังรูปที่ 2.3 นอกจากนั้นแล้ว

ค่ารังสีอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับสภาพท้องฟ้าในแต่ละวัน วันที่มีเมฆมากจะได้รับความเข้มรังสี
 อาทิตย์ตรงบนพื้นผิวต่ำกว่าวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ดัชนีเมฆของแต่ละพื้นที่จึงมีความสำคัญต้อง
 พิจารณาร่วมด้วย



รูปที่ 2.2 รังสีอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศและตกกระทบบนผิวโลก



รูปที่ 2.3 ความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงตลอดปี ของจังหวัดพิษณุโลก (Handbook of Solar

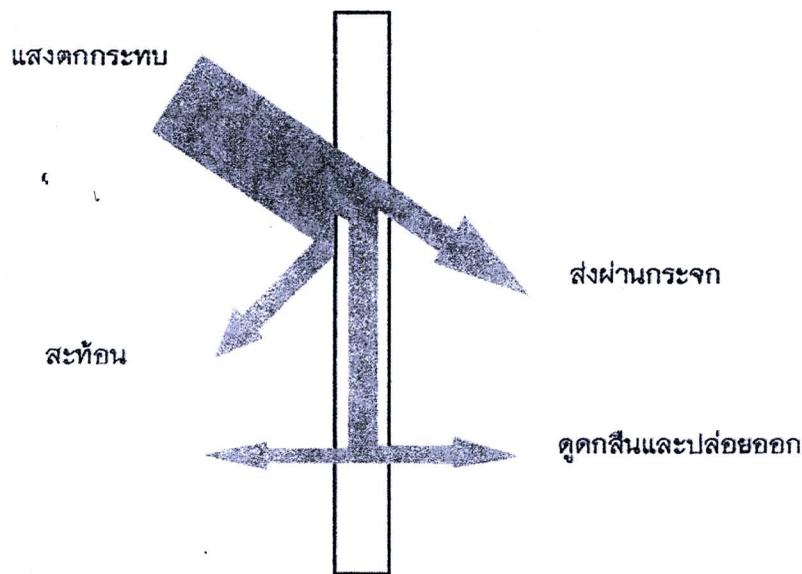
Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications, 2005)



จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารมาจากทั้งรังสีตรง และรังสีกระจาย ในที่นี้หมายรวมไปถึงผลกระทบจากการแผ่รังสีทั้งสองที่สะท้อนจากวัสดุโดยรอบและส่งเข้ามาภายในอาคาร ซึ่งเป็นเหตุให้ต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุสร้างพื้นผิวบริเวณใกล้เคียงกับอาคารจากวัสดุที่มีค่าการสะท้อนต่ำ โดยความร้อนจะส่งผ่านจากเปลือกนอกเข้าสู่ภายในอาคาร มีส่วนที่เป็นจุดอ่อนของเปลือกอาคารคือ หน้าต่างกระจก เนื่องจากมีค่าหน่วยเวลาถ่ายเทความร้อนต่ำสุด เปรียบเทียบกับส่วนอื่นของเปลือกอาคาร คือ ผนัง และหลังคา โครงสร้างประกอบอาคารสองส่วนนี้สามารถเลือกจากวัสดุที่มีค่านำความร้อนต่ำ ปรับระดับความหนาของชั้นวัสดุเพื่อเพิ่มมวลกันความร้อน รวมถึงสามารถบดหนวนระหว่างชั้นวัสดุป้องกันความร้อนได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงความทึบหรือโปร่งแสงของวัสดุ ด้วยเหตุที่ผนังและหลังคาอาคารเป็นส่วนที่มีพื้นที่มากและได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลายาวนานต่อวันนั่นเอง ขณะที่หน้าต่างก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอาคารที่ควรได้รับความใส่ใจไม่น้อยไปกว่ากันทั้งนี้เพราะอาคารที่อยู่อาศัยและอาคารสำนักงานต่างมีลักษณะการออกแบบและโครงสร้างในปัจจุบันที่ประกอบไปด้วยหน้าต่างกระจกอบอาคารมีสัดส่วนพื้นที่กระจกเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่อาคาร โดยทั่วไปหน้าต่างกระจกมีหน้าที่หลักสองประการคือ เพื่อการมองเห็นรวมทั้งป้องกันสภาพอากาศ ฝุ่นละออง และปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์จากสภาพแวดล้อมภายนอก และเพื่อรับแสงธรรมชาติสำหรับการส่องสว่างภายในอาคาร หากพิจารณาแล้วจะเห็นว่า การหุ้มฉนวนในส่วนนี้ทำได้อย่างมีข้อจำกัดเพื่อไม่ให้สูญเสียหน้าที่สองประการ จึงไม่สามารถใช้วัสดุที่มีความทึบแสงได้เหมือนในส่วนของผนังและหลังคา พิจารณาความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกไปยังภายในอาคารจะพบว่ากระจกมีลักษณะเฉพาะตัวที่มีค่าการส่งผ่าน (Transmissibility) ไม่คงที่เมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือเมื่อความ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 22 .. ส.ย. 2555 ..
เลขทะเบียน..... 246112 ..
เลขเรียกหนังสือ.....

ยวาคลึนที่ตกกระทบกระจกเปลี่นเปล่งไปค่าการส่งผ่านกระจกก็เปลี่นเปล่งไปด้วย ดั่งนั้น แสงที่ตกกระทบกระจกหน้าต่าจึนงไม่ไ้ผ่านกระจกท้งหมตร้อยเปอร์เซนต์จะมีส่วนที่สะท้อน กระจกกลับออกไปภายนอก ส่วนที่ส่งผ่านกระจกเข้ามาภายใน และส่วนที่ดูดกลืนในกระจก และปลดปล่อยออกมาในระยะเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยสองส่วนหลังที่เข้ามาภายใน อาคารคือความร้อนที่ไ้รับจากแสงอาทิตย์ (solar heat gain)



รูปที่ 2.4 ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนกระจกและผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร

ความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในอาคารไ้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ (solar heat gain coefficient, SHGC) ของระบบกระจก Oughton และ Hodkinson (2008) แสดงให้เห็นว่าระบบกระจกแผ่นเดี่ยว สองแผ่น และสามแผ่น ซึ่งแตกต่างกันด้วยค่า G คือค่าความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่อาคารไ้รับจากส่วนของการส่งผ่านโดยตรงและส่วนของการปลดปล่อยรังสีความร้อนจากที่กระจกดูดแสงไว้ อ้างอิงค่า G ทางทฤษฎีระบบกระจกใสแผ่นเดี่ยว 0.82 ระบบกระจกใสสองชั้น 0.43 ระบบกระจกดูดแสงความร้อนแบบสองชั้น 0.36 ระบบกระจกสะท้อนแสงแบบสองชั้น 0.26 ระบบกระจก

ประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้น 0.32 ระบบกระจกประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้นที่มีแผ่นทึบแสงกันกลาง 0.16 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในห้องที่ติดตั้งระบบกระจกใสแผ่นเดี่ยวมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่มีระบบกระจกใสสองชั้น และต่ำสุดคือที่มีระบบกระจกประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้นมีแผ่นทึบแสงกันกลาง กล่าวได้ว่าระบบกระจกที่มีค่า G ต่ำมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านระบบกระจกได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามระบบกระจกสองชั้นให้ผลความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องเปรียบเทียบกับระบบกระจกสามชั้นไม่เกิน 11 เปอร์เซ็นต์ขณะที่ราคาค่าใช้จ่ายต่างกันมาก จึงทำให้พบเห็นการใช้งานระบบกระจกสองชั้นมากกว่า

กระจกควบคุมความร้อนสามารถลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ด้วยการดูดแสงหรือสะท้อนกลับ ที่พบเห็นการใช้งานทั่วไปได้แก่

1. กระจกดูดแสง (Absorbing glasses) มีสองแบบคือ แบบกระจกสีที่มีสีตลอดความหนาของแผ่นกระจกส่งผลให้สมบัติการควบคุมแสงอาทิตย์และความหนาแน่นของสีขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นกระจก ที่พบเห็นได้ทั่วไปคือสีเทา บรอนซ์ และเขียว สำหรับแบบที่สองจะเป็นลักษณะอนุภาคโลหะถูกเคลือบลงบนกระจกเป็นชั้นหลายชั้นได้ตามที่ต้องการ ชนิดนี้สามารถดูดรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้ากระจกใส จึงทำให้สามารถใช้งานได้แบบกระจกแผ่นเดี่ยว
2. กระจกสะท้อนแสง (Reflective glasses) กระจกประเภทนี้จะมีการเคลือบออกไซด์โลหะหรือสารอื่นที่มีสมบัติใกล้เคียงลงบนผิวหน้าด้านหนึ่งของกระจก จะพบเห็นใช้งานกันในประเภทระบบกระจกสองชั้นโดยให้ผิวหน้านี้อยู่ภายในตรงช่องว่างของระบบ สีที่ใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตได้แก่ เงิน เทา บรอนซ์ หรือ น้ำเงิน แต่อาจพบเห็นได้ในสีอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน



3. กระจกติดฟิล์มกรองแสง (Solar control films) มีให้เลือกหลายสี ฟิล์มมักจะถูกติดไว้ที่ด้านในของกระจก มีผลควบคุมป้องกันแสงอาทิตย์คล้ายกับกระจกสะท้อนแสง ด้วยราคาที่ต่ำจึงมักถูกเลือกเพื่อนำไปเปลี่ยนหน้าต่างเดิมที่ติดกระจกใส ปัจจุบันได้มีกระจกติดฟิล์มที่สามารถปรับสีตามความเข้มของแสงได้เพิ่มเติมเข้ามา
4. กระจกอัจฉริยะ หรือ กระจกฉลาด (smart windows) มีการพัฒนาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมถึงพบเห็นการใช้งานจริงเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วยกระจกที่มีการเคลือบสีชั้นได้แก่ ชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductor) ชั้นเปลี่ยนสีสามารถเลือกดูดแสงหรือสะท้อนสีบางช่วงคลื่น (electrochromic layer) ชั้นสะสมอนุภาคประจุไฟฟ้า (ion storage) และชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชั้นที่สอง (second transparent conductor) กระจกจะปรับสีได้เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าไปที่ผิวกระจก ชั้นตัวนำทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ส่งผลให้ชั้นเปลี่ยนสีทำหน้าที่ดูดแสงบางช่วงคลื่นและส่งผ่านบางช่วงคลื่นเกิดการเปลี่ยนสีของกระจกเป็นการควบคุมความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านได้
5. กระจกปลดปล่อยรังสีความร้อนต่ำ (low emissivity coating) กระจกประเภทนี้ถูกเคลือบด้วยสารแผ่นรังสีต่ำทำได้สองแบบ แบบเคลือบแข็ง (hard coating) ยึดติดระหว่างสารโลหะที่เคลือบกับกระจกในระดับโมเลกุล มีค่าสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ระหว่าง 0.2 ถึง 0.15 และแบบเคลือบอ่อน (soft coating) มีค่าสภาพเปล่งรังสี 0.1 ถึงต่ำกว่า 0.026 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแรก

2.2.1 ความร้อนถ่ายเทจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจก

แสงอาทิตย์มีค่าความเข้มแสงรังสีตรง I_B ตกกระทบบนพื้นผิวที่บัพแสงที่มีค่าการดูดแสง (absorptivity) α จะมีค่าการแผ่รังสีจากการดูดแสงเท่ากับ $\alpha I_B \cos\theta$ เมื่อ θ คือมุมระหว่างแนวรังสีตรงกับเส้นปกติบนพื้นผิว

สำหรับกระจกหรือวัสดุโปร่งแสงชนิดอื่นจะพบว่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนวัสดุเหล่านี้จะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนถูกดูดไว้ภายในเนื้อสาร (absorbed) และที่เหลือถูกส่งผ่านวัสดุ (transmitted) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.3 ไว้แล้วนั้น สัดส่วนขององค์ประกอบสามตัวนี้แปรผันตามมุมที่แสงตกกระทบและสมบัติการดูดกลืนของตัวกลางที่แสงส่งผ่าน (Davies, 2004) เมื่อพิจารณารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนกระจกแผ่นเดียวเป็นกรณีแรก

ค่าดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสง θ_1 และมุมสะท้อน θ_2 ดังนี้

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \mu \quad (2.8)$$

รังสีตรงสะท้อนขึ้นอยู่กั้องค์ประกอบของแสงโพลาไรซ์ (polarised) และแสงตัดกัน (perpendicular) บนระนาบ สัดส่วนของแสงสะท้อนในแนวขนานและตั้งฉากแสดงได้ดังนี้

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)}; r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.9)$$

หากแสงหนึ่งหน่วยตกลงบนพื้นผิวโดยมีส่วนหนึ่งสะท้อน r และ ส่วนหักเห $1 - r$ กำหนด L คือ ความหนาของกระจก ดังนั้นความยาวของเส้นทางที่แสงหักเหคือ $L / \cos\theta_2$ ขณะที่บางส่วนของรังสีถูกดูดเมื่อผ่านระยะทางนี้ จะได้ว่าความเข้มแสงที่ไปถึงอีกด้านหนึ่งของพื้นผิวกระจกมีค่า

$$a = \exp(-kL/\cos\theta_2) \quad (2.10)$$

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การสิ้นสูญ (extinction coefficient)

ค่า k ประมาณ 4 m^{-1} สำหรับกระจกใสและมีค่าประมาณ 100 m^{-1} สำหรับกระจกดูดความร้อน (heat-absorbing glasses) ขณะที่สัมประสิทธิ์ดูดแสง (absorption coefficient) a มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 สำหรับกระจกบางแบบดูดแสงต่ำ (thin, low-absorbing glass) ค่า k ของกระจกสีจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นด้วยเหตุที่ว่าแสงสีที่ส่งผ่านไปได้เนื่องจากมีส่วนรังสีอาทิตย์ที่ไม่ได้

ถูกดูดไว้ นั่นเอง ทำนองเดียวกัน a และ r มีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง ทว่าดัชนีหักเห มีผลน้อยมากต่อความยาวคลื่นของแสง พิจารณานุกรมของแสงสะท้อนและหักเหจากฝั่งด้าน แสงตกกระทบไปยังอีกฝั่งหนึ่งตามความหนากระจก จะได้ว่าองค์ประกอบรวมของรังสีสะท้อน (reflectance) มีค่า

$$\rho = r + r(1-r)^2 a^2 / (1-r^2 a^2) \quad (2.11)$$

โดยองค์ประกอบการดูดแสงสำหรับแสงที่เคลื่อนผ่านเส้นทางหนึ่งครั้งมีค่า $(1-r)(1-a)$ และ ผลรวมค่าการดูดแสง (absorptance) มีค่า

$$\alpha = (1-r)(1-a)/(1-ra) \quad (2.12)$$

ผลรวมสัดส่วนแสงที่ส่งผ่าน หรือค่าการส่งผ่าน (transmittance) มีค่า

$$\tau = (1-r)^2 a / (1-r^2 a^2) \quad (2.13)$$

ผลรวมของสามส่วนนี้มีค่าเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ $\rho + \alpha + \tau = 1$ เนื่องจากลำแสงตกกระทบไม่ เป็นแสงโพลาไรซ์ดังนั้นแสงตกกระทบหนึ่งหน่วยจึงประกอบไปด้วยสองแนวลำแสงคือ

$$1 = \frac{1}{2}_{\parallel} + \frac{1}{2}_{\perp} \quad (2.14)$$

ดังนั้นสามารถเขียนเทอมสุทธิของค่าการดูดแสงและส่งผ่านได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{1}{2} \alpha_{\parallel} + \frac{1}{2} \alpha_{\perp} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tau_{\parallel} + \frac{1}{2} \tau_{\perp} \quad (2.16)$$

ถ้าแนวลำแสงตกกระทบบนผิวที่เส้นปกติจะได้ว่า $\theta_2 = \theta_1/\mu$ และ $\sin\theta_2 = \tan\theta_2 = \theta_2$ ดังนั้น

แล้วค่าการสะท้อนบนหนึ่งพื้นผิวคือ

$$r = ((\mu - 1)/(\mu + 1))^2 \quad (2.17)$$

r มีค่า 0.0434 สำหรับกระจกใสดัชนีหักเหเท่ากับ 1.526 โดยค่า r จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมุมตกกระทบบริบเพิ่มไปถึง $\theta_1 = 50^\circ$ แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่มุม 70° ถึง 90° ซึ่งมีค่าเป็น 1 สำหรับกระจกบางมีความสามารถในการดูดแสงน้อยจึงมีค่า α เป็น 1 มีค่าการสะท้อนอยู่ที่ $2r/(1+r)$ หรือ 0.0832 เมื่อรังสีตกกระทบบนกระจกในแนวปกติ และมีค่าการส่งผ่าน $1 - 0.0832 = 0.917$

พิจารณาทัศนศาสตร์ของกระจกสองชั้น การสะท้อน ดูดแสง และส่งผ่านรังสีตรงของแผ่นกระจกที่หนึ่งมีหลักการเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น แต่ผลจากการส่งผ่านของรังสีตรงไปยังกระจกแผ่นที่สองทำให้ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในทุกองค์ประกอบของแสงดังนี้

องค์ประกอบส่วนสะท้อนมีค่ารวมเท่ากับ

$$\rho_{12} = \rho_1 + \rho_2 \tau_1^2 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.18)$$

การดูตรงรังสีในกระจกแผ่นที่หนึ่งมีค่า

$$\alpha_{1\text{ of }2} = \alpha_1 + \alpha_1 \rho_2 \tau_1 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.19)$$

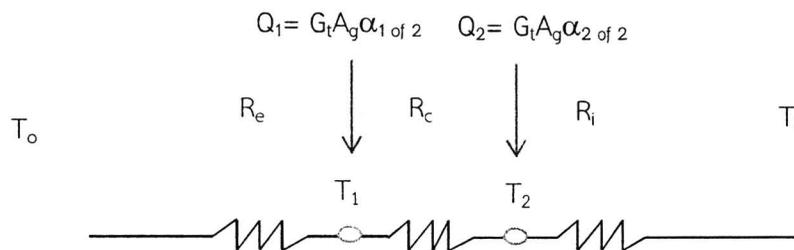
การดูตรงรังสีในกระจกแผ่นที่สองมีค่า

$$\alpha_{2\text{ of }2} = \alpha_2 \tau_1 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.20)$$

องค์ประกอบการส่งผ่านมีค่า

$$\tau_{12} = \tau_1 \tau_2 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.21)$$

สมการข้างต้นตั้งแต่ (2.8) ถึง (2.21) จากเอกสารผลงานของ Jones (1980) และ Davies (2004) เมื่อคำนึงถึงค่าความร้อนที่ส่งผ่านกระจกสองชั้นโดยรังสีตรงตกกระทบพื้นที่กระจก A_g ณ เวลา t มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ G_t ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของกระจกแผ่นแรก (1) และแผ่นสอง (2) คือ $Q_1 = G_t A_g \alpha_{1 \text{ of } 2}$ และ $Q_2 = G_t A_g \alpha_{2 \text{ of } 2}$ ตามลำดับ สามารถเขียนวงจรความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อ T_o และ T_i คืออุณหภูมิภายนอกและภายในห้อง



รูปที่ 2.5 วงจรความร้อนของระบบกระจกสองชั้น

ความร้อนที่ถ่ายเทจาก T_2 เข้าไปยังห้องปิด T_i เขียนได้ดังนี้ (Davies, 2004)

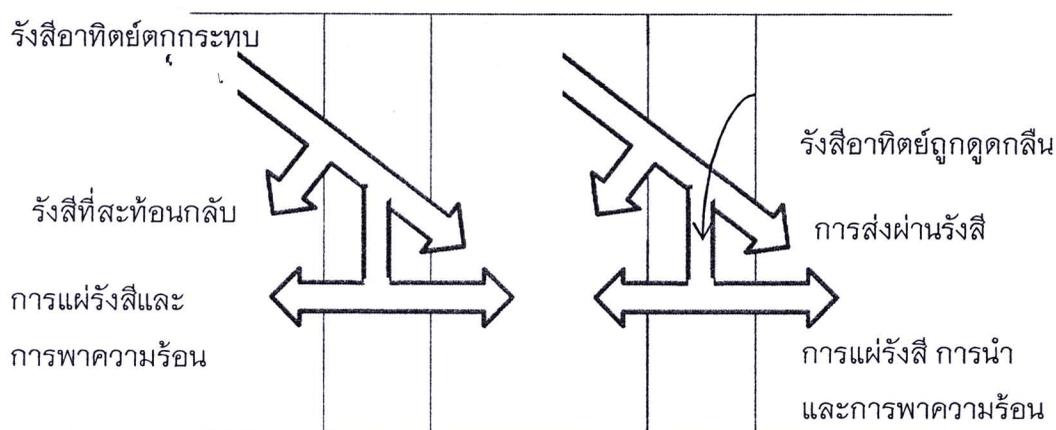
$$\frac{T_2}{R_i} = \frac{R_e + R_c}{R_e + R_c + R_i} \left(\frac{R_e}{R_e + R_c} Q_1 + Q_2 \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ R_e , R_c และ R_i คือความต้านทานความร้อนจากภายนอก ในช่องกระจก และภายในตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบกระจกสองชั้นมีการแปรผันตามขนาดของช่องว่าง หรือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกระจก พบว่าระบบที่มีช่องว่างระหว่าง 1 ถึง 2 เซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการนำความร้อนเป็นหลัก ส่วนผลของการพาความร้อนในสภาวะอากาศนิ่ง ณ ช่องว่างแคบแคบนี้มีค่าน้อยมาก ในทางตรงกัน

ข้ามกับระบบกระจกสองชั้นที่มีขนาดช่องว่าง ตั้งแต่ 3 เซนติเมตร ขึ้นไป การพาความร้อนมีความสำคัญมากกว่าการนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวกระจก. (Hagentoft, 2001)

การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นต่อหน่วยพื้นที่คือความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ที่กลับด้วยความร้อนสูญเสียจากระบบจากการพาความร้อนที่ผิวกระจกนอก และการนำความร้อนผ่านชั้นกระจกเข้ามาภายในดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 พลังงานความร้อนส่งผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้น

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ถ่ายเทผ่านกระจกมีค่า

$$Q_s = SHGC \times A \times G_T \quad (2.23)$$

เมื่อ Q_s คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจก, W

SHGC คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient)

A คือ พื้นที่กระจก, m^2

G_T คือ พลังงานแสงอาทิตย์รวม, W/m^2

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ คือ สัดส่วนของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผ่านเข้าไปภายใน ประกอบไปด้วยรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงและดูดซับไว้ด้วยสภาวะแวดล้อม



ภายใน และรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับไว้ด้วยระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นจากนั้นส่งผ่านเข้าไปยังภายในห้องด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient, SC) ดังนี้

$$SC = \frac{SHGC}{SHGC_{standard}} \quad (2.24)$$

เมื่อ SC คือ สัมประสิทธิ์การบังแดด

$SHGC_{standard}$ คือ สัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์มาตรฐาน = 0.87

(ASHRAE 1993)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient; U) ของหน้าต่างกระจกสองชั้น คำนวณได้จาก

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_o} + R_{go} + R_{gap} + R_{gi} + \frac{1}{h_i} \right)} \quad (2.25)$$

เมื่อ h_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก, (W/m².K)

h_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน, (W/m².K)

R_{go}, R_{gi} คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกแผ่นนอกและแผ่นในมีค่าเท่ากับ

$$L/k, (K/W)$$

L คือ ความหนาของแผ่นกระจก, (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของกระจก, (W/m.K)

อ้างอิงมาตรฐาน ASHRAE การออกแบบ ณ สภาวะฤดูร้อน กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การ

ถ่ายเทความร้อนภายนอก (Heat transfer coefficient for outdoor surface; h_o) เท่ากับ 22.7

$W/m^2 \cdot ^\circ C$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (Heat transfer coefficient for indoor surface; h_i) คำนวณจาก

$$h_i = \frac{1.77(T_{gi} - T_i)^{0.25} + \varepsilon_{in,2}\sigma(T_{gi}^4 - T_i^4)}{(T_{gi} - T_i)} \quad (2.26)$$

เมื่อ T_{gi} คือ อุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน, (K)

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศภายใน, (K)

$\varepsilon_{in,2}$ คือ ค่าการเปล่งรังสีของผิวกระจกแผ่นที่สองด้านใน

σ คือ ค่าคงที่ Stefan Bellman constant เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างบรรจุอากาศหรือแก๊สหรือสารเปลี่ยนสถานะระหว่างกระจก R_{gap} มีความสัมพันธ์กับค่าการเปล่งรังสีประสิทธิภาพ (Effective Emittance; ε_e) สามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{in,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{out,2}}\right) - 1} \quad (2.27)$$

เมื่อ $\varepsilon_{in,1}$ และ $\varepsilon_{out,2}$ คือค่าการเปล่งรังสีของผิวกระจกแผ่นที่ 1 ด้านในและแผ่นที่ 2 ด้านนอก เท่ากับ 0.84 กรณีกระจกใสหนา 6 mm (พรพรรณ, 2545)

หลังจากคำนวณค่า ε_e แล้วอ่านค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในช่องว่างจากตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการคำนวณสำหรับช่องว่างมีอากาศบรรจุอยู่ ขนาดช่องว่าง 12 mm ความแตกต่างอุณหภูมิกระจกแผ่นนอกและแผ่นใน $15^\circ C$ และค่า ε_e คำนวณได้เท่ากับ 0.72 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ $8 W/m^2 \cdot K$ (Chirarattananon, 2005)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับช่องว่างระหว่างกระจก

(Chirarattananon, 2005)

Thickness of space, mm	Temperature in space, °C	Temperature difference of glazing, °C	Value of coefficient, h_s , W/(m ² .K)					
			Effective emissivity, ϵ_e					
			0.28	0.72	0.40	0.20	0.10	0.05
13	30	5	7.2	6.6	4.6	3.3	2.7	2.4
		15	7.3	6.6	4.6	3.3	2.7	2.4
	50	5	8.4	7.7	5.2	3.7	2.9	2.5
		15	8.5	7.7	5.2	3.7	2.9	2.5
10	30	5	7.8	7.2	5.2	3.9	3.3	3.0
		30	7.9	7.2	5.2	4.0	3.3	3.0
	50	5	9.1	8.3	5.9	4.3	3.6	3.2
		30	9.1	8.3	5.9	4.3	3.6	3.2
6	30	< 50	9.6	9.0	7.0	5.7	5.1	4.7
	50	< 50	11.0	10.2	7.8	6.2	5.5	5.1

สัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ของกระจกแผ่นเดียวมีค่า (ASHRAE 1993)

$$SHGC = \tau_{Global} + \alpha N_i = \tau_{Global} + \alpha \left(\frac{U}{h_o} \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ N_i คือ สัดส่วนรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับและถ่ายเทเข้าภายใน

τ_{Global} คือ ค่าการส่งผ่านแสงรวม

ดังนั้นกระจกสองชั้นจึงมีค่า SHGC แสดงได้ดังนี้

$$SHGC = \tau_{Global} + \alpha_o \left(\frac{U}{h_o} \right) + \alpha_i \left(\frac{U}{h_o} + \frac{U}{h_{gap}} \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ α_o, α_i คือ ค่าการดูดแสงของกระจกแผ่นนอกและแผ่นใน

h_{gap} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในช่องระหว่างแผ่นกระจก,

(W/m².K)

จะได้ค่าความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นคือ

$$Q_w = A.G_T.SHGC + U.A.(T_o - T_i) \quad (2.30)$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสามารถใช้สมการดังแสดงไว้แล้วข้างต้นได้ประกอบกับข้อสมมติฐานดังนี้

1. พิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติที่สภาวะคงที่
2. พิจารณาสสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะเชิงมวลโดยรวม และมีค่าคงที่ในแต่ละสถานะ
3. สารเปลี่ยนสถานะอยู่ในบรรยากาศปิดเมื่อเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวไม่คำนึงถึงผลของการพาความร้อน
4. การถ่ายเทความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกได้รับแสงเกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนเท่านั้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้พลังงานไฟฟ้าในทุกภาคส่วนของประเทศไทยมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี ข้อมูลจากสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (EPPO) ปี 2552 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีมากที่สุดคือ ภาคอุตสาหกรรม รองลงมาเป็นภาคธุรกิจ และ บ้านและที่อยู่อาศัย สองภาคส่วนหลังใช้พลังงานไฟฟ้ากว่า 45 % ของประเทศ จากการศึกษาที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนชื้นเป็นผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าหลักคือระบบปรับอากาศถ้าคิดเพียงครึ่งหนึ่งของ 45% จะมีอัตราการใช้พลังงานสูงถึง 31000 GWh/ปี การมีส่วนร่วมในการลดพลังงานด้านนี้ลงได้คือการลดอัตราการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารลง ที่สำคัญคือพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกอันเป็นจุดอ่อนของอาคาร

เพราะเป็นช่องทางรับความร้อนเข้าสู่ภายในได้มากและเร็ว จึงมีความสำคัญที่ควรได้รับการป้องกันสูงสุด ปัจจุบันหน้าต่างกระจกมีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ ต่างมีข้อดีข้อด้อยเมื่อประยุกต์ใช้งานจริงบางชนิดมีผลรบกวนต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกดังเช่นพวกกระจกสะท้อนแสง บางชนิดกระทบต่อภาวะรับแสงและสภาวะการทำงานของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารดังพวกกระจกสีเข้มต่าง ๆ เป็นต้น หากทว่าเมื่อคำนึงถึงการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารแล้วถือได้ว่าเป็นประโยชน์ นอกจากนี้การป้องกันยังสามารถทำได้ด้วยการกักเก็บความร้อนที่ส่งผ่านเข้ามายังหน้าต่างกระจกเพื่อป้องกันและสามารถชะลออัตราการถ่ายเทความร้อนลงสำหรับรอเวลาปลดปล่อยออกสู่ภายนอกเมื่ออุณหภูมิภายนอกลดต่ำลงถือเป็นแนวความคิดและเทคนิคทางเลือกใหม่ที่รอการพิสูจน์ใช้งานในทางปฏิบัติจริงดังเช่นการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะที่มีสมบัติสำคัญคือการมีค่าความร้อนของการหลอมเหลวสูงทำให้สามารถเก็บกักความร้อนไว้ได้มากและอัตราการเปลี่ยนสถานะกลับสู่สภาวะของแข็งเร็วจะช่วยให้กลับมารับความร้อนได้ทันดังนี้ เป็นต้น รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับระบบหน้าต่างกระจก การป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ และการประยุกต์ใช้ในอาคาร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ระบบหน้าต่างกระจกและการป้องกันความร้อน

Rubin และคณะ (1998) ทำการหาสมบัติการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกด้วยการคำนวณจากข้อมูลทดสอบทางแสงของกระจกชนิดต่างกันและของส่วนเคลือบผิวกระจก สมมติฐานคือสมบัติของกระจกเคลือบผิวหลายชั้น กระจกลามิเนท หรือกระจกชนิดอื่น สามารถหาได้จากสมบัติทางแสงของวัสดุโครงสร้างพื้นฐานเชิงมวลและตามความหนาของแต่ละชนิดที่มีทั่วไปโดยไม่จำเป็นต้องทำการวัดความหนาแต่ละชั้นในกระจกดังกล่าว ข้อมูลทางแสงที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการคำนวณได้จากการทดสอบค่าการส่งผ่าน

และสะท้อนในช่วงของสเปกตรัมแสงระหว่าง 300 – 2500 nm โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ Perkin-Elmer Lambda 9 หรือ Lambda 19 spectrophotometer นอกจากนั้นมุมที่แสงตกกระทบกระจกถูกนำไปวิเคราะห์คำนวณถึงผลกระทบต่อสมบัติของกระจกด้วย ผลการคำนวณกระจกต่างแบบและชนิดให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ และถูกนำไปขยายผลเพื่อคำนวณระบบหน้าต่างกระจกได้ทั้งแบบกระจกชั้นเดียว สองชั้น หรือแม้กระทั่งสามชั้น พบว่าให้ค่าความถูกต้องเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานรายปี

Sekhar และ คณะ (1998) ศึกษาหน้าต่างอัจฉริยะ (Smart window) ลักษณะเป็นกระจกสองชั้น ประกอบด้วยกระจกใสหนา 6 มม. ช่องว่างอากาศ 12 มม. และกระจกหนา 6 มม. ด้านหนึ่งเป็นกระจกสะท้อนความร้อนและอีกด้านหนึ่งเป็นกระจกเคลือบสารเปล่งรังสีต่ำ (Low-e) มีประสิทธิภาพทางพลังงานสูง ยอมให้แสงธรรมชาติผ่านได้มากเนื่องด้วยค่าการสะท้อนต่ำ จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรม DOE-2.1E จำลองการใช้กับอาคารในประเทศสิงคโปร์ พื้นที่ใช้สอยอาคาร 12,500 ตร.ม. พื้นที่ผนัง 6,100 ตร.ม. และพื้นที่โปร่งแสง 4,575 ตร.ม. โดยเปรียบเทียบภาระการทำความเย็น การใช้พลังงานและพลังงานที่ประหยัดได้ พบว่าหน้าต่าง Smart window สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างได้ถึง 70 – 80% ซึ่งมีศักยภาพสูงกว่าเทคนิคการออกแบบและจัดการกระจกหน้าต่างแบบอื่นที่ประหยัดได้ 50 – 70% ของพลังงานแสงสว่าง และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อขนาดตักกับเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5.09 อัตราผลตอบแทน 9.15 % และระยะเวลาคืนทุน 4 ปี และมีส่วนในการลดปริมาณ CO₂ SO₂ และ NO_x ประมาณ 20%

Larssonและคณะ (1999) ทำการทดสอบรวมทั้งคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนส่งผ่านหน้าต่างฉนวนกันความร้อนที่มีรูปแบบเป็นกระจกสามชั้น ตัวกระจกเป็นแบบเคลือบสารให้เปล่งแสงต่ำ (low emissivity) ภายในช่องว่างระหว่างกระจกบรรจุแก๊ส



เฉื่อยคริปตอน ผลการทดสอบพบว่าหน้าต่างกระจกสามชั้นนี้ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนเข้ามายังภายในห้องมีผลให้อุณหภูมิผิวด้านในของกระจกสูงทำให้มีค่าความต้านทานความร้อนสูง อย่างไรก็ตามพบว่าบริเวณผิวกระจกที่มีอุณหภูมิต่ำบริเวณมุมขอบด้านล่างและด้านบน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของกรอบกระจกหน้าต่างซึ่งทำจากอลูมิเนียมที่มีส่วนช่วยในการส่งผ่านความร้อนโดยทำหน้าที่เป็นสะพานความร้อน

Rosencrantz และคณะ (2005) ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านแสงอาทิตย์ และแสงสว่างธรรมชาติเข้าสู่ตัวอาคารในประเทศแถบสแกนดิเนเวียด้วยการใช้หน้าต่างประสิทธิภาพพลังงานสูงซึ่งผิวกระจกเคลือบด้วยสารปลดปล่อยรังสีความร้อนต่ำ (low-e) และเคลือบทับเพิ่มด้วยสารป้องกันการสะท้อน (anti-reflective, AR) ทั้งสองด้านของผิวกระจกในระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น ผลการคำนวณจากโปรแกรม ParaSol พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้น 15 % เปรียบเทียบกับระบบหน้าต่างที่มีกระจก low-e หนึ่งแผ่นกับหน้าต่างที่มีกระจกทั้งสองแผ่นเป็น low-e เคลือบ AR ผู้วิจัยกล่าวว่าไม่มีผลกระทบในเทอมของสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยรังสี นอกจากนั้นพบว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 7% ส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบทำความร้อนอาคารลดลง 4 % ต่อปี เนื่องจากการส่งผ่านแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกสองชั้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงสว่างจากธรรมชาติเป็นหลัก อาจพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอาคารสูงเกินไปเมื่อมีการใช้กระจก low - e ทั้งหมด

Chow และคณะ (2006) ศึกษาผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Energy Plus ของกระจกหน้าต่างห้ารูปแบบ คือ กระจกแบบดูแสงชั้นเดียว กระจกสองชั้นที่มีแผ่นแบบดูแสงด้านในอาคาร กระจกสองชั้นที่มีแผ่นแบบดูแสงด้านนอกอาคาร กระจกสองชั้นที่มีช่องว่างระบายอากาศระหว่างกลางเข้าสู่อาคารมีแผ่นกระจกแบบดูแสงอยู่

ด้านในอาคาร และกระจกสองชั้นที่มีช่องว่างระบายอากาศระหว่างกลางออกสู่ภายนอกอาคาร มีแผ่นกระจกแบบดูดแสงด้านนอกอาคาร ขนาดพื้นที่กระจก 3 m² หันหน้าไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เพื่อให้ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาก และระยะเวลาการใช้งานตั้งแต่ 9:00 ถึง 18:00 ด้วยสภาพภูมิอากาศประเทศฮ่องกง พบว่ากระจกสองชั้นแบบที่มีการระบายอากาศที่ช่องว่างระหว่างกลางของแผ่นกระจกออกสู่ภายนอกอาคารมีส่วนช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีที่สุดในภูมิอากาศแบบกึ่งเขตร้อน (subtropical) โดยสามารถลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารเทียบเท่า 66% ของกระจกหนึ่งชั้น และ 88% ของกระจกสองชั้นแบบมีแผ่นกระจกดูดแสงด้านนอกอาคาร ขณะที่แบบที่มีการระบายอากาศเข้าสู่ภายในอาคารเหมาะสมกับการใช้งานช่วงฤดูหนาวเท่านั้น

Manz (2006) และคณะ ออกแบบและคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามชั้นที่มีช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกสองช่อง ภายในช่องว่างเป็นสุญญากาศ โดยมีแท่งสแตนเลสชั้นระหว่างกระจกที่ด้านข้างเพื่อรองรับและกั้นแผ่นกระจกที่หนึ่งกับสอง และแผ่นที่สองกับสาม ผลการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนทางคอมพิวเตอร์พบว่าการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกมีค่าลดลงโดยมีค่าการส่งผ่านความร้อนที่กึ่งกลางแผ่นต่ำกว่า 0.2 W/m².K ผลสำเร็จนี้เนื่องจากการใช้แท่งสแตนเลสกั้นระหว่างแผ่นกระจก การใช้กระจกทำจากโซดา-ไลม์ (soda-lime) ชนิดไม่ได้ผ่านการอบความร้อนขนาด 6mm 4mm และ 6mm และใช้กระจกเคลือบสารโลหะแบบการแผ่รังสีความร้อนต่ำ (low - emittance coating) มีค่า $\epsilon = 0.03$ สำหรับผิวกระจกด้านในติดกับช่องว่างทั้งสี่หน้าคือด้านในกระจกแผ่นที่หนึ่ง ด้านในและด้านนอกกระจกแผ่นที่สองและด้านติดช่องว่างของกระจกแผ่นที่สาม โดยที่ด้านนอกกระจกแผ่นที่หนึ่งอยู่นอกอาคารและด้านในกระจกแผ่นที่สามอยู่ในอาคาร

Gugliermetti และ Bisegna (2007) ได้ศึกษาการใช้หน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่สามารถกลับด้านจากภายในออกสู่ภายนอกได้ มีจำหน่ายทั่วไปในอิตาลี นักวิจัยได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้หน้าต่างประกอบไปด้วยกระจกสองชนิดที่แตกต่างกัน คือ แผ่นหนึ่งเป็นกระจกดูตริงสีอาทิตย์ อีกแผ่นหนึ่งเป็นกระจกใส ระหว่างกลางของแผ่นทั้งสองบรรจุอากาศอยู่ภายใน ในช่วงฤดูร้อนได้กำหนดให้กระจกแผ่นแรกอยู่ด้านนอกอาคารเพื่อที่จะได้กำจัดความร้อนที่ตัวมันดูดไว้สู่ภายนอก ในช่วงฤดูหนาวกระจกแผ่นนี้จะถูกหันกลับเข้าสู่ด้านในเพื่อคงความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกใสเข้ามาให้คงอยู่ภายในอาคาร ลดภาระการทำความร้อนในฤดูร้อน และลดภาระการทำความร้อนในฤดูหนาว เทคนิคอื่นเช่นการใช้ม่านเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดสภาวะที่ร้อนเกินไปถูกนำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่าหน้าต่างที่ติดตั้งในทิศใต้โดยมีด้านหนึ่งเป็นกระจกดูตริงเคลือบด้วย low-e ให้ผลการประหยัดพลังงานที่ดีที่สุด ในรอบหนึ่งปีสามารถประหยัดพลังงานได้ 161 MJ ต่อพื้นที่สุทธิของหน้าต่างในเขตพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอบอุ่นแบบเมดิเตอร์เรเนียน

Freire และคณะ (2011) คำนวณการถ่ายเทพลังงานความร้อนและความชื้นจากสภาวะแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคารผ่านระบบหน้าต่างกระจก ในที่นี้พิจารณาเป็นองค์รวมทั้งตัวอาคารแตกต่างไปจากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีขอบเขตการพิจารณาเฉพาะระบบหน้าต่าง โดยหวังว่าผลการทำนายจะได้ภาพที่ชัดเจนและถูกต้องมากขึ้น เพื่อนำไปใช้ลดปริมาณการใช้พลังงานในอาคาร การทำนายอุณหภูมิที่ผิวกระจกและอากาศแต่ละโซนรวมถึงสมดุลพลังงานได้จากการคำนวณตามรูปแบบความต้านทานความร้อน (resistive model) ในวงจรความร้อน และแบบจำลองเชิงปริมาตรไฟไนต์ (Finite-volume model) ที่มีการกำหนดเป็นปริมาตรขนาดเล็กจำนวนมากเป็นจุดเชื่อมต่อการคำนวณ แบบจำลองแรกเป็นรูปแบบสมการและการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบที่สองอาศัยข้อมูลสัมประสิทธิ์การดูด

แสงและการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของกระจกจากตารางในโปรแกรมคำนวณ Window 5 (Finlayson และคณะ, 1995) ในการคำนวณได้กำหนดขนาดของห้อง กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 6.0 m x 8.0 m x 2.7 m มีพื้นที่กระจกทางทิศใต้ 6 m² มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.5 h (air change per hour) มีความร้อนที่ได้รับจากภายในห้อง 200 W กำหนดใช้จากระบบทำความร้อนเมื่ออุณหภูมิอากาศต่ำกว่า 20 °C และทำความเย็นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงกว่า 27 °C ผลการจำลองจากสองวิธีพบว่าการทำงานนำค่าอุณหภูมิในระบบให้ผลเหมือนกันในเงื่อนไขกระจกหน้าต่างชั้นเดียว แต่สำหรับกระจกสองชั้นแบบจำลองเชิงปริมาตรไฟไนต์ให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำกว่า ผู้วิจัยได้เน้นความสำคัญที่ไม่ควรละเลยคือการพิจารณาการดูดรังสีอาทิตย์ในระบบกระจก

สมศักดิ์ และคณะ (2546) พัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีการส่งผ่านพลังงานความร้อนของหน้าต่างกระจกใสและกระจกติดฟิล์ม พบว่าหน้าต่างกระจกสะท้อนแสงและหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีแผ่นกระจกสะท้อนแสงอยู่ด้านนอกมีค่าการส่งผ่านความร้อนต่ำที่สุด กระจก low-e ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ค่อนข้างต่ำกว่ากระจกติดฟิล์ม และกระจกใสชั้นเดียว

ติเกะ (2547) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการส่งผ่านแสงทางหน้าต่างกระจกอาคารหลายรูปแบบ ทำการทดสอบด้วยระบบแสงอาทิตย์เทียมแบบหลอดเดี่ยว กำหนดขนาดกล่องทดสอบทำจากโลหะ 2 ชั้น กว้าง 50 cm ยาว 40 cm สูง 30 cm ภายในบรรจุฉนวนใยแก้วระหว่างชั้น กระจกที่ถูกลทดสอบมีขนาดกว้าง 30 cm ยาว 30 cm หนา 6 mm 7 ชนิด ได้แก่กระจกใสชั้นเดียวติดฟิล์มต่างกัน 4 ชนิด คือ สีเงินเข้ม สีเทาเข้ม สีน้ำเงิน สีฟ้าใส และ กระจกสองชั้น 3 ชนิด คือ กระจกสองชั้น ด้านบนติดฟิล์มสีเงินเข้มด้านล่างใส กระจกสองชั้น ด้านบนใสด้านล่างติดฟิล์มสีเงินเข้ม และ กระจกสองชั้นลักษณะเดียวกันที่เจาะช่องระบายอากาศจากด้านในสู่

ด้านนอก หลอดไฟที่ใช้เป็นหลอด OSRAM รุ่น HQI-E250 W/NDL มีการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล และวัดความส่องสว่างด้วย Lux meter มีการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะคงที่ทางความร้อนเพื่อหาค่าการส่งผ่านความร้อนทางกระจกและช่วงการหน่วงของเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกแต่ละแบบ ผลการทดสอบสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกชนิดของกระจกประกอบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน

2.3.2 สารเปลี่ยนสถานะและการประยุกต์ใช้ในด้านอาคาร

การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะดำเนินอยู่สองทางโดยทางหนึ่งเริ่มจากสารในสถานะของแข็งรับความร้อนจากบริเวณแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และเป็นผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากถ่ายเทความร้อนให้กับสาร ทว่าดำเนินการตรงกันข้ามเมื่อสารในสถานะของเหลวส่งถ่ายความร้อนออกไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สารดังกล่าวก็จะคืนสถานะกลับเป็นของแข็งดั้งเดิม กระบวนการดังกล่าวทำให้สารเปลี่ยนสถานะถูกนำมาใช้ในการเก็บกักความร้อนและช่วยถ่วงเวลาการส่งผ่านความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ในอดีตมีการใช้งานเพื่อเป็นระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อมาใช้แพร่หลายในงานด้านอื่นด้วย สารเปลี่ยนสถานะมีมากมายหลายประเภทแตกต่างกันไปตามลักษณะและสมบัติกายภาพ การนำไปใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุโครงสร้างเปลือกอาคารดังเช่น ผนัง หรือ หลังคา ต่างได้รับการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมากในหลายประเทศถึงความมีประสิทธิผลในการทำงาน ทว่ายังไม่เป็นที่แพร่หลายนักในประเทศไทยที่ผลงานวิจัยด้านนี้มีไม่มากนัก เนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ชนิด สมบัติ และการประยุกต์ใช้ในด้านอาคาร

Pasupathy และคณะ (2008) รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านพัฒนาการของสารเปลี่ยนสถานะที่ถูกนำมาใช้งานกับอาคารที่พักอาศัย และอาคารพาณิชย์ ด้วยการติดตั้งร่วมกับ

ระบบพลังงาน จากการที่สารเปลี่ยนสถานะสามารถเก็บรักษาความร้อนและความเย็นในรูปแบบของความร้อนแฝงที่มีค่ามากกว่าความร้อนสัมผัสหลายเท่าตัวนั้น จึงมีส่วนลดการใช้พลังงานในอาคารของระบบทำความเย็นและทำความร้อนตามลำดับ การประยุกต์ใช้กับ ผนัง หลังคา และพื้นอาคาร โดยการนำไปบรรจุเป็นชั้นหนึ่งของผนังอาคารแบบหลายชั้นเพื่อรับความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาและชะลอการส่งผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร เป็นการเลื่อนเวลาออกไปทำให้ภาระทำความเย็นของอาคารชดเชยจากช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงไปยังช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าต่ำมีส่วนช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายทางพลังงานลง นอกจากนี้ยังลดผลกระทบความแปรผันจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกที่มีต่ออุณหภูมิภายในอาคาร การเลือกใช้ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะมีความสำคัญต่อผลสำเร็จของงานหรืออาจสร้างปัญหาขึ้นได้ หลักการพิจารณามีดังนี้

- สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ได้แก่ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต้องอยู่ในช่วงของการพิจารณาใช้งาน ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรสูง ความจุความร้อนและความหนาแน่นสูง สภาพการหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวไม่มีการแยกชั้นของสาร
- สมบัติโคเนติกส์ ได้แก่ มีอัตรานิวเคลียสเอชสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสภาวะซูเปอร์คูลิ่งขณะมีสถานะเป็นของเหลวซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ต้องลดอุณหภูมิของสารให้ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวทำให้สารสามารถกลับคืนสถานะของแข็งได้ มิฉะนั้นแล้วสารไม่สามารถกลับคืนสู่สถานะของแข็งและสูญเสียสภาพการเก็บรักษาความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝงอันมีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาความร้อน และควรมีอัตราการเติบโตของการเกิดคริสตัลหรือการเกิดขึ้นของการกลายเป็นของแข็งสูง เพื่อประโยชน์คือการกลับคืนสู่สภาวะพร้อมรับความร้อนสำหรับกักเก็บไว้ตามที่ต้องการ

- สมบัติทางเคมี ได้แก่ ความคงตัวทางเคมี วัฏจักรการคืนตัวในสภาพของแข็งและเหลว สมบูรณ์ ไม่มีการเสื่อมสภาพของสารเมื่อมีการทำงานไปหลายรอบของวัฏจักรการเปลี่ยนสถานะ ไม่กัดกร่อน ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่เป็นสารระเบิดได้ง่าย
- หลักทางเศรษฐศาสตร์ คือ ราคาต่ำ และสามารถหาได้ง่าย

สารเปลี่ยนสถานะจำแนกออกได้สามชนิด คือ

1. สารอินทรีย์ (Organic) ได้แก่ พาราฟิน (paraffin) และกรดไขมัน (fatty acids)
2. สารอนินทรีย์ (Inorganic) ได้แก่ สารประกอบเกลือ-น้ำ (salt hydrate)
3. สารผสมระหว่างสารทั้งสองชนิดข้างต้น (Eutectic)



ข้อดีอันดับแรกของสารอินทรีย์คือมีให้เลือกใช้งานได้หลายช่วงอุณหภูมิ ไม่แยกชั้นอันทำให้การเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวเป็นไปอย่างสมบูรณ์การดูดและการคายพลังงานจากสารมีประสิทธิภาพที่ดี มีความคงตัวทางสมบัติเคมี เป็นมิตรไม่กัดกร่อนต่อวัสดุโครงสร้างหลายชนิด ปลอดภัยไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ข้อเสียคือมีค่าการนำความร้อนต่ำเมื่ออยู่ในสถานะของแข็งทำให้ต้องการอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงในช่วงการทำให้กลับเป็นของแข็ง และปริมาตรความจุการเก็บรักษาในรูปความร้อนแฝงต่ำตรงกันข้ามกับสารอนินทรีย์ ข้อดีประการอื่นของสารอนินทรีย์คือ ราคาต่ำ จุดหลอมเหลวแคบ และไม่ติดไฟ แต่ข้อเสียสำคัญคือเกิดสภาวะซูเปอร์คูลิ่งทำให้มีการแยกชั้นของสารในสถานะของแข็งและของเหลวส่งผลกระทบต่อวงจรการเปลี่ยนสถานะและลดประสิทธิภาพในการรับและคายความร้อน

Mehling และ Cabeza (2008) แสดงข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับสมบัติทางเทคนิคของสารเปลี่ยนสถานะ ได้แก่ ความคงตัวทางเคมีของสารเพื่อการใช้งานได้ระยะเวลายาวนาน สำหรับบางกรณีที่สารได้รับอุณหภูมิสูงเกินไป หรือการแผ่รังสี เป็นต้น และการเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะควรมีความเหมาะสมกัน เพื่อไม่เกิดปัญหาการรั่วไหลของสาร

ที่อาจเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหการกัดกร่อน และความปลอดภัย เมื่อมีการใช้งานในระยะยาว นอกจากนั้นยังได้รวบรวมรายละเอียดทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางเทอร์โมไดนามิกส์ การถ่ายเทความร้อน รวมถึงการออกแบบระบบการกักเก็บความเย็นและความร้อนด้วยการใช้สารเปลี่ยนสถานะในการทำงานร่วม

Peippo และคณะ (1991) พิจารณานำสารเปลี่ยนสถานะใส่ลงไปในพื้นที่พลาสติกเพื่อใช้เป็นส่วนเก็บรักษาความร้อนในบ้านที่มีการไหลเวียนอากาศแบบไม่อาศัยงานกลขนาดพื้นที่ 120 m² ที่ไปด้วยฉนวนชั้นดี และมีพื้นที่กระจกกว้างในทิศใต้ของเมืองเมดิสัน รัฐวิสคอนซิน ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการศึกษาพบว่าบ้านหลังดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้มากถึง 3 GJ ต่อปี หรือ 15% ของค่าใช้จ่ายพลังงานรายปี โดยสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาความร้อนและทำงานเป็นวัฏจักรต่อวันได้คือสารที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิห้องเฉลี่ย 1-3 °C

Neeper (2000) ได้วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ความร้อนการถ่ายโอนพลังงานของผนังแผ่นยิปซัมที่มีสารเปลี่ยนสถานะประเภทกรดไขมันและซีดีพาราฟินฝังตัวอยู่ ด้วยวัตถุประสงค์การทำงานเป็นวัฏจักรของวันตามการแปรผันของอุณหภูมิห้องไม่ขึ้นอยู่กับการส่องแสงของดวงอาทิตย์ มีการผสมสารด้วยการปรับสัดส่วนสารเพื่อให้ได้อุณหภูมิการหลอมเหลวตามที่ต้องการ พบว่าสารเปลี่ยนสถานะที่ได้นี้มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับชนิดที่บรรจุในแคปซูล (encapsulated PCM) และใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของสภาวะความสบายในห้อง อย่างไรก็ตามความสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อสารเปลี่ยนสถานะเกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิเกินกว่าช่วงที่คาดการณ์ไว้

Feldman และ Banu (1991) ทดสอบแผ่นผนังยิปซัมที่ผลิตขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยผสมบิวทิลสเตียเรต (Butyl stearate) ประมาณ 21 - 22 % ลงไประหว่างชั้นตอนการผสม

ส่วนประกอบของแผ่นผนังยิปซั่มตามปกติ และสารกระตุ้นเชื้อจาง เบื้องต้นพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางกลของแผ่นผนังยิปซั่มสำหรับกักเก็บพลังงานความร้อนนี้มีค่าที่ดีเทียบเคียงกับแผ่นยิปซั่มมาตรฐาน หากทว่ามีความจุในการเก็บและปลดปล่อยพลังงานความร้อนได้มากกว่าถึงสิบเท่า

Ismail และ Henriquez (2001) เสนอแนวความคิดใหม่ในการนำสารเปลี่ยนสถานะมาไหลเวียนระหว่างกลางแทนที่อากาศที่มีการบรรจุอยู่ระหว่างแผ่นกระจกในหน้าต่างกระจกสองชั้นทั่วไป หลักการคือนำสารเปลี่ยนสถานะที่เป็นของเหลวผ่านปั๊มเพื่อป้อนเข้าไประหว่างชั้นกระจกที่รอบด้านปิดยกเว้นขอบบนให้อากาศไหลผ่านได้ จากนั้นรอให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากสารสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจนทำให้สารเปลี่ยนเป็นของแข็งเพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ป้องกันอุณหภูมิภายในลดลง ในทางอุดมคติของการออกแบบระบบนี้คือต้องมั่นใจว่าเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่การเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งของสารจะสมบูรณ์ อาจถือได้ว่าเป็นงานวิจัยลำดับแรกแรกของการพัฒนานำสารเปลี่ยนสถานะมาใช้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ในระบบหน้าต่างกระจก ในงานวิจัยดังกล่าวได้มีการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนแสงอาทิตย์ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับผลการทดสอบค่าการส่งผ่าน การดูแสง และการสะท้อนของกระจกแผ่นเดี่ยว กระจกสองชั้นมีอากาศคั่นกลางและแบบมีสารเปลี่ยนสถานะคั่นกลาง หากทว่าไม่ได้กล่าวถึงชนิดของสารที่ใช้ในการศึกษา ผลการคำนวณพบว่ามีประสิทธิผลดี นอกจากนั้นนักวิจัยกลุ่มนี้ยังได้นำเสนอผลการคำนวณและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงในงานวิจัยชิ้นอื่นที่เกี่ยวข้องกัน (Ismail และ Henriquez, 1997; Ismail และคณะ, 2008)

Khudhair และ Farid (2003) รายงานผลการรวบรวมเอกสารงานวิจัยทางด้านการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อเก็บรักษาความร้อนในอาคารสำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศ

หนาว โดยการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะระหว่างผิวทั้งสองด้านของผนัง ฝ้าเพดาน หรือพื้นห้อง เพื่อกักความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง เพิ่มภาวะความสบายให้กับผู้อาศัย ลดการแปรผันของอุณหภูมิห้อง สารเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrate และสารอินทรีย์ได้รับการพิจารณาว่ามีความเหมาะสมต่อการใช้งานในอาคาร เนื่องจากไม่เป็นพิษและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากในเรื่องของการเปลี่ยนสภาพระหว่างสถานะของแข็งและของเหลว อย่างไรก็ตามการใช้ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ พบว่ามีปัญหาในการคืนรูปและจำเป็นต้องผสมกับสารตัวอื่นเพื่อให้มีสภาพเป็นเจลจึงจะสามารถใช้ในทางปฏิบัติจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเติมสารอื่นเข้าไปอาจมีผลกระทบต่อพลังงานการเก็บสะสม รวมถึงสมบัติอื่นได้แก่อุณหภูมิการหลอมเหลว เป็นต้น

Weinlaeder และคณะ (2011) ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลผลการใช้งานแผ่นบานเกล็ดหน้าต่างบรรจุสารเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันแสงอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคารตั้งแต่ฤดูหนาวปี 2008 ถึงฤดูร้อน 2010 โดยมีส่วนช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดในสำนักงานลงได้ถึง 2 K เมื่อเปรียบเทียบกับห้องสำนักงานที่มีการติดตั้งบานเกล็ดหน้าต่างแบบเดิม จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar heat gain coefficient) มีค่าลดลงเช่นกันสำหรับระบบที่มีการเก็บสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง พบว่าระบบป้องกันแสงอาทิตย์เมื่อบานเกล็ดปิดสนิทมีค่า 0.25 และเมื่อเปิดทำมุม 45° มีค่า 0.3 ขณะที่ระบบไม่มีสารเปลี่ยนสถานะมีค่า 0.35 และ 0.41 ตามลำดับ

จากผลการสืบค้นงานวิจัยดังรายงานไว้ข้างต้น การลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธีด้วยการเลือกชนิดของกระจก การใช้กระจกสองชั้น หรือสามชั้น การเปลี่ยนแก๊สที่บรรจุระหว่างกระจก ต่างมีข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ แนวทางใหม่ถูกนำเสนอโดยนำสารเปลี่ยนสถานะที่สามารถกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนแฝงที่มีค่ามากกว่าความร้อนสัมผัสหลายเท่ามาใช้งานร่วมกับหน้าต่างกระจกสองชั้น

เพื่อลดความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่าง ทางทฤษฎีพบว่าจะได้ผลดีกว่าหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มี
อากาศเป็นฉนวนบรรจุนระหว่างแผ่นกระจกตั้งเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วไป หากทว่ายังขาด
ผลการทดสอบยืนยันการทำงานที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง