บทที่ 2

การสำรวจแนวความคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบอาคารในปัจจุบันจึงคำนึงถึงการประหยัดพลังงานมากขึ้นกว่าในอดีตที่ผ่านมา สืบเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 ความสำนึกของผู้คนในสังคม สภาพเศรษฐกิจที่ตกต่ำในปัจจุบัน ฯลฯ ในอาคารสามารถแบ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบต่าง ๆ ได้ดังนี้ คือ ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ฯลฯ จากการศึกษาได้ผลสรุปว่าระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดคือ 50% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ภายในอาคาร ระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ารองลงมาคือ ระบบแสงสว่างซึ่งใช้ 25% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด อีก 25% จะเป็นการนำไปใช้งานของระบบอื่น ๆ เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น (Lawence Berkley Laboratory, 1985) ดังตารางต่อไปนี้

ประเภทอาคาร	ระบบทำความเย็น	ระบบแสงสว่าง	ระบบอื่น ๆ
สำนักงาน (Office)	50.0%	25.0%	25.0%
โรงแรม (Hotel)	61.0%	15.3%	23.7%
ศูนย์การค้า (Mall)	60.0%	25.0%	15.0%
สถานพยาบาล (Hospital)	77.5%	14.7%	7.8%

ตาราง 2.1 แสดงอัตราส่วนของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละระบบใช้ในแต่ละประเภทอาคาร
ที่มา : Lawence Berkley Laboratory, USAID's Report, 1985.

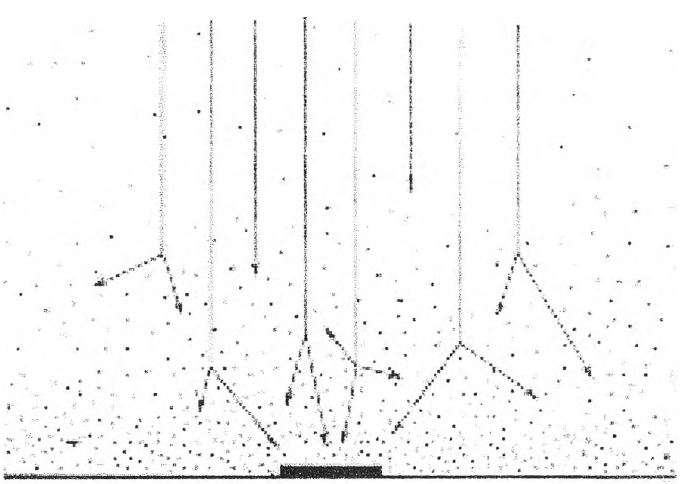
ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารคือพลังงานความร้อนที่เข้ามาพร้อมแสง เพราะจะกลายเป็นภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศในอาคาร (Cooling Load) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงที่ส่องผ่านเข้ามาทางผนังโปร่งแสง แต่ถ้าเราออกแบบในลักษณะที่ไม่ให้ความสำคัญในด้านการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ภายในอาคาร ภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศจะขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในอาคาร เช่น จากระบบไฟฟ้าแสงประดิษฐ์ ฯลฯ รวมทั้งยังเป็นสาเหตุของการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากของอาคารอีกด้วย ดังนั้นถ้าเราสามารถเพิ่มระดับความส่องสว่างของแสงธรรมชาติให้เพียงพอต่อการใช้งาน โดยมีปริมาณพลังงาน

ความร้อนเข้ามาในอาคารน้อยที่สุด เราจะสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่จะสูญเสียไปกับระบบปรับอากาศ และระบบไฟฟ้าแสงประดิษฐ์ ซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 75% ของการใช้ทั้งอาคารลงได้

2.1 รังสีที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

รังสีที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541: 35) คือ

1. รังสีคลื่นสั้นที่แผ่ลงมาโดยตรง (Direct Radiation)
2. รังสีคลื่นสั้นที่แผ่กระจายเนื่องจากผ่านชั้นบรรยากาศ (Diffuse Radiation) คือรังสีที่เกิดขึ้นจากการผ่านชั้นบรรยากาศ และถูกทำให้กระจัดกระจายเนื่องจากฝุ่นละอองและโมเลกุลของอากาศ ระยะทางที่รังสีดวงอาทิตย์เดินทางผ่านจะส่งผลกระทบต่อประเภทของรังสีคือ ถ้าระยะทางเพิ่มมากขึ้น รังสีส่วนใหญ่ที่ผ่านลงมาจะเป็นรังสีชนิดนี้
3. รังสีคลื่นสั้นที่สะท้อนจากสภาพแวดล้อมและบริเวณใกล้เคียง ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิว (Reflectivity) สี ลักษณะผิว และทิศทางของสภาพแวดล้อมข้างเคียง จะส่งผลต่อปริมาณของแสงและความร้อนที่สะท้อนไปยังผนังและหลังคา
4. รังสีคลื่นยาวที่สะท้อนกลับออกมาจากพื้นและวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศโดยรอบ
5. รังสีคลื่นยาวที่เกิดจากการสูญเสียความร้อนของวัตถุให้แก่ท้องฟ้าในตอนกลางคืน (Night Sky Radiation)



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดแสง Diffuse Radiation

ที่มา : Lechner, Norbert, Heating, Cooling, Lighting : Design Methods for Architects (USA : John Wiley & Sons, Inc., 1991), p. 96.

จากรังสีทั้ง 5 ประเภท สามารถแยกประเภทของรังสีออกเป็น 2 ประเภท (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541: 133) คือ

1. รังสีคลื่นสั้น (Short Wave) คือรังสีความร้อนที่มีอยู่ในแสงสว่าง เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ รังสีชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ เป็นรังสีที่สามารถมองเห็นได้เฉพาะบางช่วงของความยาวคลื่น (Wave Length) คือ 380-780 นาโนเมตร มีอุณหภูมิสูง สามารถทะลุผ่านกระจกได้เป็นอย่างดี รวมทั้งสามารถสะท้อนได้ดีสำหรับวัสดุที่มีผิวมันและสีอ่อน วัตถุสีดำสามารถดูดซับรังสีประเภทนี้ได้ดี รังสีคลื่นสั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทย่อย (David & Brain, 1993: 39) คือ

   1.1 รังสีอุลตร้าไวโอเล็ต (Ultra Violet) หรือรังสี UV

   มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 290-380 นาโนเมตร สามารถทำให้สีของวัตถุที่ถูกรังสีชนิดนี้จางลงอย่างรวดเร็ว รวมทั้งทำให้เกิดการไหม้และเป็นมะเร็งที่ผิวหนังได้อีกด้วย

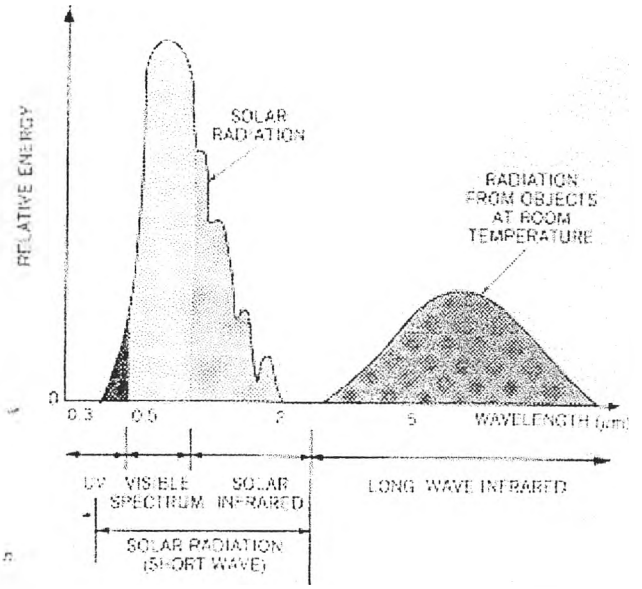
   1.2 รังสีแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็น (Visible Light)

   มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380-780 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้สามารถมองเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ ในตอนกลางวันดวงตาของมนุษย์ไวต่อแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร (ช่วงแสงสีเหลือง) แต่ในตอนกลางคืนจะไวต่อแสงที่ความยาวคลื่น 507 นาโนเมตร (ช่วงแสงสีเขียว)

   1.3 รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Short Wave Infrared)

   มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 780-3000 นาโนเมตร

2. รังสีคลื่นยาว (Long Wave) คือรังสีที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีคลื่นสั้นกระทบกับวัตถุทึบแสง หรือส่งผ่านวัตถุไป รังสีคลื่นสั้นจะเปลี่ยนเป็นรังสีคลื่นยาว โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 3000 นาโนเมตรขึ้นไป มีผลทำให้วัตถุนั้น ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการถ่ายเทแบบการนำความร้อน (Conduction) รังสีชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ เป็นรังสีที่ไม่สามารถมองเห็น สะท้อนได้ดีสำหรับวัสดุที่มีผิวมัน



รูปที่ 2.2 แสดงช่วงความยาวคลื่น

ที่มา : Lechner, Norbert, Heating. Cooling. Lighting : Design Methods for Architects (USA : John Wiley & Sons, Inc., 1991), p. 16.

2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งแตกต่างกันที่ตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายเทดังนี้ (ตระการ ก้าวกสิกรรม, 2537: 9-14)

1. การนำความร้อน (Conduction)

คือการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลที่สัมผัสกัน อาจเป็นโมเลกุลที่อยู่ในสสารเดียวกัน หรือระหว่างสสาร 2 ชนิด การนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเกิดการสั่นสะเทือน และถ่ายเทพลังงานไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ สิ่งที่มีผลต่อการนำความร้อนมีดังนี้

- สสารที่เป็นตัวนำความร้อน
- ความหนาแน่นของตัวนำความร้อน (Density)
- ความชื้นที่มีอยู่ในสสาร (Moisture Content)
- ระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ

2. การพาความร้อน (Convection)

คือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งเรียกโดยรวมว่าของไหล เมื่อของไหลถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยแรงธรรมชาติ หรือแรงจากเครื่องจักรกล ซึ่งโมเลกุลที่หนักและมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะตกลงสู่ที่ต่ำ ส่วนโมเลกุลที่เบาและมีอุณหภูมิสูงกว่าจะลอยตัวสูงขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้จะทำให้เกิดการไหลเวียนของความร้อน

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

คือการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง โดยรังสีจะเดินทางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า รังสีความร้อนสามารถถูกสกัดกั้นได้โดยการใช้วัสดุที่มีผิวมันเงา วัสดุต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติการดูดซับและสะท้อนรังสีแตกต่างกัน เมื่อวัสดุหนึ่งมีค่าการดูดซับมาก จะมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ

วัสดุโดยทั่วไปมีคุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนดังนี้ (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541: 134)

1. ความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อน (Absorbtivity)

คือคุณสมบัติที่ผิวและเนื้อของวัสดุกักเก็บความร้อนไว้

2. ความสามารถในการสะท้อนรังสีความร้อน (Reflectivity)

คือคุณสมบัติที่ผิวของวัสดุสามารถสะท้อนรังสีความร้อนกลับออกไปได้ เมื่อมีรังสีมากระทบกับวัสดุ

3. ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (Transmisivity)

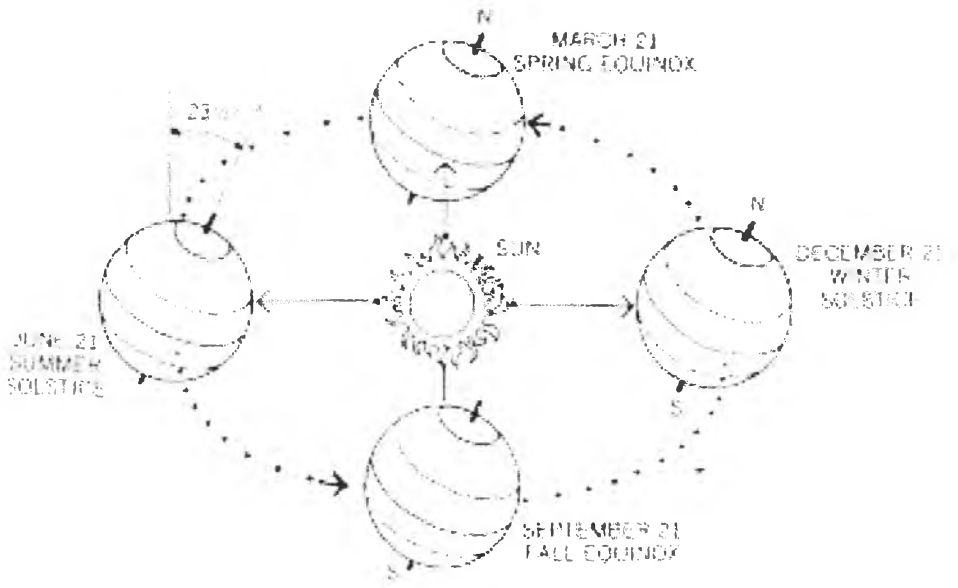
คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถกักเก็บความร้อนไว้ แล้วแผ่รังสีกลับออกมาจากเนื้อวัสดุ หรือเรียกว่าRe-Radiation

4. ความสามารถในการส่งผ่านรังสีความร้อน (Transmisivity)

คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถถ่ายเทความร้อนผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้

2.3 อิทธิพลของทิศกับการถ่ายเทความร้อน

โลกหมุนรอบตัวเอง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกลางวันและกลางคืน รวมทั้งโลกได้หมุนรอบดวงอาทิตย์ไปพร้อม ๆ กันด้วย แกนโลกเอียง $23^{\circ}27'$ จึงทำให้ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นจากบนพื้นผิวโลก ณ ประเทศไทย เคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตกโดยอ้อมใต้ และจากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณแสงธรรมชาติที่มาจากทิศตะวันออก ทิศตะวันตก และทิศใต้ มากกว่าทิศเหนือ โดยเฉพาะแสงที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

ที่มา : Lechner, Norbert, Heating, Cooling, Lighting : Design Methods for Architects (USA : John Wiley & Sons, Inc., 1991), p. 16.

สำหรับแสงจากดวงอาทิตย์แบบกระจาย ทิศเหนือจะได้รับแสงชนิดนี้มากกว่าทิศอื่น ๆ ซึ่งแสงแบบนี้จะมีปริมาณความร้อนน้อยกว่าแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง ดังนั้นการวางช่องแสงในทิศเหนือหรือไม่ได้รับแสงแดดโดยตรงจะทำให้มีปริมาณการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคาร น้อยกว่าทิศอื่น

2.4 เปลือกอาคาร (Building Envelope) กับการถ่ายเทความร้อน

เปลือกอาคารประกอบด้วย หน้าต่าง ประตู ผนัง พื้น และหลังคา ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมโดยตรง ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างภายในและภายนอกอาคาร รวมทั้งเป็นตัวนำในการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารได้เป็นอย่างดี ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเปลือกอาคารมีดังนี้

1. ทิศที่ตั้งที่เปลือกอาคารในแต่ละด้านหันรับแสงอาทิตย์
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) ของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาใช้เป็นเปลือกอาคาร
3. ขนาดพื้นที่ของเปลือกอาคารและรูปร่างของอาคาร (Shape)
4. ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอก (Temperature Difference)

เปลือกอาคารยังสามารถแบ่งประเภทได้อีกลักษณะหนึ่งคือ แบ่งเป็นเปลือกอาคารประเภททึบแสง (Opaque) และเปลือกอาคารประเภทโปร่งแสง (Void) เปลือกอาคารทั้ง 2 ประเภทนี้ มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านเข้ามาในอาคารแตกต่างกันคือ

1. <u>เปลือกอาคารประเภททึบแสง (Opaque)</u>

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารประเภทนี้ จะถ่ายเทเข้ามาแบบการนำความร้อน (Conduction) เท่านั้น ซึ่งมีสมการสำหรับการคำนวณหาค่าดังนี้

$Q = U * A * (T_i - T_o)$ (ASHRAE, 1989: 27.15)

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา (Btu/h.)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) (Btu/h.*ft^2*^{O}F)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

Ti = อุณหภูมิที่สูงกว่า (^{O}F)

To = อุณหภูมิที่ต่ำกว่า (^{O}F)

หรือ

Q = U*A*CLTD (ASHRAE, 1989: 26.32)

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนผ่านเข้ามา (Btu/h.)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) (Btu/h.*ft^2*^{O}F)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

CLTD = ภาระความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า (Cooling Load Temperature Difference) (^{O}F)

การเลือกใช้ ($T_i - T_o$) หรือ CLTD มีเหตุผลดังนี้

เลือกใช้ ($T_i - T_o$) เมื่อ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในอาคารคงที่ (Steady State Condition)

เลือกใช้ CLTD เมื่อ ต้องการปรับให้ค่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากตามความเป็นจริงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมินั้นไม่คงที่ ซึ่งค่า CLTD เป็นค่าที่ดัดแปลงมาจาก ($T_i - T_o$) แต่ปรับให้เข้ากับอิทธิพลจากภายนอก เช่น เวลา วัน เดือน ตำแหน่งละติจูด (Latitude) มวลสารของเปลือกอาคาร สี ฯลฯ

2. <u>เปลือกอาคารประเภทโปร่งแสง (Void)</u>

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารประเภทนี้ จะมีการถ่ายเทเข้ามาในอาคาร 2 แบบคือ แบบการนำความร้อน และแบบการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งมีสมการสำหรับคำนวณหาค่าดังนี้

<u>แบบการนำความร้อน</u>

มีสมการที่ใช้คำนวณอยู่ 2 สมการดังนี้

$Q = U * A * (T_i - T_o)$ (ASHRAE, 1989: 27.15)

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา (Btu/h.)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) (Btu/h.*ft^2*^oF)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

Ti = อุณหภูมิที่สูงกว่า (^oF)

To = อุณหภูมิที่ต่ำกว่า (^oF)

หรือ

Q = U*A*CLTD (ASHRAE, 1989: 26.32)

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนผ่านเข้ามา (Btu/h.)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) (Btu/h.*ft^2*^oF)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

CLTD = ภาระความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า (Cooling Load Temperature Difference) (^oF)

<u>แบบการแผ่รังสีความร้อน</u>

มีสมการที่ใช้คำนวณดังนี้

Q = A * SC * SHGF * CLF (ASHRAE, 1989: 26.33)

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา (Btu/h.)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

SC = ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจก (Shading Coefficient)

SHGF = Maximum Solar Heat Gain Factor for Specific Orientation of Surface, Latitude, and Month.

CLF = Cooling Load Factor with No Interior Shading

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารประเภทโปร่งแสง เช่น กระจก ฯลฯ เข้ามาภายในอาคารทั้งหมดในเวลาหนึ่ง ๆ คือ ผลรวมของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทแบบการนำความร้อน และแบบการแผ่รังสีความร้อน

$$Q = [U * A * CLTD] + [A * SC * SHGF * CLF]$$

2.5 การหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time Lag)

โดยทั่วไปวัสดุที่มีมวลสารมากจะสามารถหน่วงเหนี่ยวความร้อนไว้ได้ในระยะเวลาที่นานกว่าวัสดุที่มีมวลสารน้อย แต่ความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนนี้ ยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น ๆ อีก เช่น ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามาทางช่องแสงมากน้อยเพียงใด เนื่องจากความร้อนที่ผ่านเข้ามาในอาคารนั้น จะถูกสะสมอยู่ในมวลสารภายในก่อน เมื่อมวลสารภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศภายในโดยรอบหรือสะสมจนถึงขีดความสามารถในการกักเก็บความร้อนแล้ว ปริมาณความร้อนที่เหลือจึงถ่ายเทมายังอากาศภายในอาคารต่อไป

2.6 Sol-Air Temperature

คืออุณหภูมิอากาศภายนอกที่อยู่ติดกับผิววัสดุเมื่อไม่ได้รับอิทธิพลจากแสงแดดและการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน ที่มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยจำลองขึ้นมาให้**มีค่าเทียบเท่ากับ**สภาวะที่ได้รับอิทธิพลจากแสงแดดและการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกับท้องฟ้าที่มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร สมการที่ใช้สำหรับคำนวณค่า Sol-Air Temperature คือ (ASHRAE, 1989: 26.4)

$$\text{Sol-Air Temperature } (t_e) = t_o + \alpha I_t / h_o - \varepsilon \delta R / h_o$$

เมื่อ t_e = Sol-Air Temperature

t_o = อุณหภูมิอากาศภายนอก

α = สัมประสิทธิ์การดูดความร้อนของผิววัสดุ (ไม่มีหน่วย)

I_t = รังสีความร้อนที่ตกกระทบทั้งหมด (Total Solar Radiation Incident on the Surface) มีหน่วยเป็น Btu / h * ft^2

h_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวซึ่งรวมทั้ง Long Wave Radiation และ Convection มีหน่วยเป็น Btu / h * ft^2 * ^oF

δR = อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของผิววัสดุกับสภาพแวดล้อมและท้องฟ้า มีหน่วยเป็น Btu / h * ft^2

ε = สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนออกจากผิว (ไม่มีหน่วย)

การทดลองที่จำลองขึ้นเพื่อให้มีผลกระทบและปริมาณการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง จึงจำเป็นต้องทำการทดลองในสภาพแวดล้อมภายนอก