บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่มีผลและเกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่องนี้ ซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวกับ คุณสมบัติของอากาศ ความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว ว่าจะแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปรใด อย่างไร และ ลักษณะการถ่ายเทความร้อน ตัวแปรอะไรมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในลักษณะใด ซึ่งจำเป็นต่อการศึกษาวิจัยนี้

2.1 ความร้อน (Heat)

ความร้อน เป็น รูปแบบหนึ่งของพลังงาน ความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (Lechner, 1991) ได้แก่ ความร้อนสัมผัส, ความร้อนแฝง และ รังสีความร้อน

2.1.1 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

เกิดขึ้นในระดับของโมเลกุล (Degree of Molecule) ถูกกระตุ้นโดยพลังงาน ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น หรือการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (Random Motion) ซึ่งการกระตุ้นเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การได้รับรังสีความร้อน แรงเสียดทานระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น ปฏิกิริยาเคมี หรือเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของวัตถุที่ร้อนกว่า เมื่ออุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยน ความร้อนที่มีอยู่ในวัตถุก็จะเปลี่ยนตาม คือเมื่อความร้อนในวัตถุเพิ่มขึ้น การสั่นของโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น การวัดอุณหภูมิเป็นการวัดความแรงของการสั่น (Intensity of Random Motion) ของโมเลกุลของวัตถุเท่านั้น ไม่ใช่เป็นการวัดปริมาณความร้อนที่มีในวัตถุนั้น ปริมาณความร้อนในวัตถุ จะขึ้นอยู่กับ ความจุความร้อน (Specific Heat) ของวัตถุ และ อุณหภูมิของวัตถุ

2.1.2 ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ (Latent Heat)

พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในวัตถุเพื่อให้วัตถุนั้นเปลี่ยนสถานะ ซึ่งค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้เปลี่ยนสถานะของวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น น้ำ ถ้าต้องการให้น้ำแข็งอุณหภูมิ 32°F (0°C) เปลี่ยนสถานะกลายเป็น ของเหลวที่อุณหภูมิ 32°F(0°C) จะต้องใส่พลังงานความร้อนเข้าไป 144 Btu ต่อน้ำ 1 lb และ ถ้าต้องการเปลี่ยนสถานะจากน้ำอุณหภูมิ 212°F(100°C) เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 212°F(100°C) จะต้องใส่พลังงานความร้อนเข้าไป 1000 Btu ต่อน้ำ 1 lb เป็นคุณสมบัติของวัสดุวัดได้เป็น ค่าพลังงานต่อมวล ซึ่งถ้าเป็นอากาศก็คือ ค่าพลังงานต่อมวลของอากาศแห้ง (Btu / lb of Dry Air) ความร้อนแฝงในอากาศ คือความร้อนที่ต้องใส่เข้าไปเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (น้ำ) กลายเป็นไอ (น้ำ)

ผลรวมของความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส เรียกว่า เอนทัลปี (Enthalpy) มีหน่วยเป็น Btu / lb of Dry Air ซึ่งอากาศทั่วๆไป ในสภาพแวดล้อม จะมีทั้งอากาศและไอน้ำ คือจะมีทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง สามารถหาค่าได้โดยดูจากแผนภูมิที่ 2.1 แผนภูมิไซโครเมตริก เส้นแสดงเอนทัลปีจะขนานกับเส้น อุณหภูมิกระเปาะเปียก หรือจากการคำนวณดังนี้

กำหนดให้

ให้อากาศภายใน เป็น 75°F DB 50%RH(0.0093 lbs of Moisture / lb of Dry Air)

อากาศภายนอก เป็น 90°F DB 54%RH(0.0162 lbs of Moisture / lb of Dry Air)

วิธีหาค่าเอนทัลปี

Item	Indoor Condition		Outdoor Condition	
Latent Heat, Vapor	0.0093*1061[a]	= 9.90	0.0162*1061[a]	= 17.25
Sensible Heat, Vapor	0.0093*0.444*75	= 0.31	0.0162*0.444*90	= 0.65
Sensible Heat, Air (1 lb)	1*0.241*75	= 18.10	1*0.241*90	= 21.70
Enthalphy (Total Heat)		28.30		39.60

[a] Latent heat of vaporization, Btu/lb (approximate)

ตารางที่ 2.1 แสดงการคำนวณหาค่าเอนทัลปีจากค่าอุณหภูมิและความชื้นจำเพาะ

ที่มา : Stein and Reynold. Mechanical and Electrical Equipment for Building. Eight Edition, 1992: 133

หรืออาจหาค่าได้จากสมการ

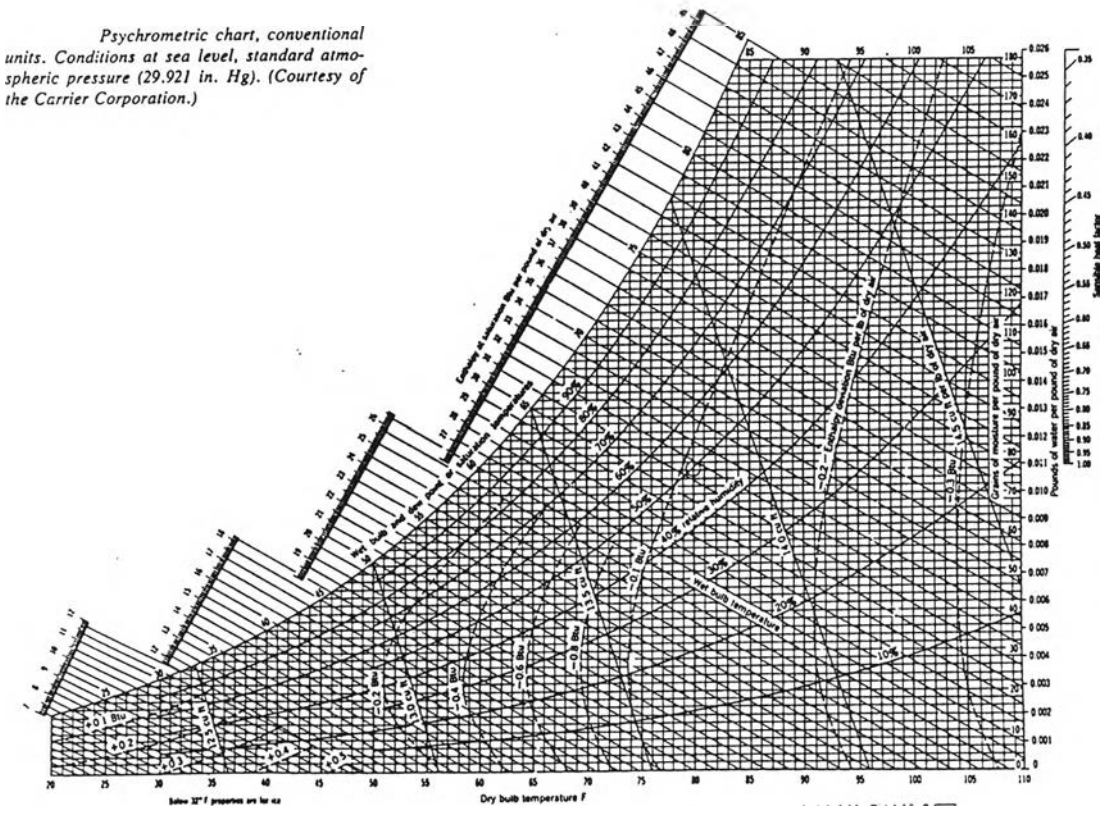
$$h = U * PV \qquad \text{(ASHRAE, 1989: 1.2)}$$

โดยที่ h คือ ค่าเอนทัลปี (Btu/lb of Dry Air)

U คือ ค่าพลังงานภายใน (Btu)

V คือ ค่าปริมาตรจำเพาะ (lb/cu ft.)

P คือ ค่าความดัน



แผนภูมิที่ 2.1 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)

ที่มา : Stein and Reynold. Mechanical and Electrical Equipment for Building. Eight Edition, 1992: 130

2.1.3 รังสีความร้อน (Radiant Heat)

รังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่เรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) รังสีความร้อนนี้สามารถเดินทางผ่านอากาศ หรือสูญญากาศได้ การเดินทางของรังสีความร้อนเรียกว่า การแผ่รังสี (Radiation)

2.2 คุณสมบัติของวัสดุทึบแสง (Opaque) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

วัสดุทึบแสงมีคุณสมบัติที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

1. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity : Cp) คือค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น1หน่วย ต่อ1หน่วยมวล(Mass)มีหน่วยเป็น Btu/lb °F
2. Volumetric Specific Heat คล้ายกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ แต่เป็นต่อ 1หน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น Btu/cu ft °F
3. ความหนาแน่น (Density) คืออัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร มีหน่วยเป็น lb/cu ft
4. ค่าความจุความร้อน (Thermal Capacity) คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยของวัตถุ มีหน่วยเป็น Btu/°F (มาจาก lb* Btu/lb °F) จะมีผลต่อเวลาในการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time Lag)
5. ค่าการนำความร้อนจำเพาะ (Thermal Conductivity : k) คือ อัตราการไหลผ่านของความร้อนผ่าน 1 หน่วยพื้นที่ ต่อความหนา 1 หน่วย ต่อ1 หน่วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของทั้ง 2 ด้านมีหน่วยเป็น Btu inch / sq.ft. h. °F หรือ Btu /ft. h. °F
6. ค่าการต้านทานความร้อนจำเพาะ (Thermal Resistivity : r) เป็นส่วนกลับของค่าการนำความร้อน
7. ค่าความต้านทานความร้อนของวัตถุ (Thermal Resistance : R) ซึ่งมีหน่วยเป็น Sq.ft. h. F / Btu

   โดย $R = b * r$; b คือความหนาของวัตถุ

   หรือ $R = b / k$
8. ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal Conductance : C) เป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนของวัตถุ มีหน่วยเป็น Btu / sq.ft. h. F

   $C = 1 / R$
9. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) เป็นค่าคงที่ที่นำมาคูณเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของ ผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนของตัววัสดุแต่ละชั้น และของฟิล์มอากาศภายนอก และ ภายใน ซึ่งค่าความต้านท้านของฟิล์มอากาศนี้เป็นค่าที่แสดงถึงอิทธิพลของการ พาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวของวัสดุที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อม

   $U\text{-Value} = 1/\Sigma R$

   โดย $\Sigma R = R_{Air\ out} + R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots + R_{Air\ in}$

   ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่ผิววัสดุ คือ ถ้าความเร็วลมสูง ค่าความต้านทานความร้อนก็จะต่ำ ดังตารางที่ 2.6

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน โดยมีสถานะเดียว (Single Phase Heat Transfer) มี 3 ลักษณะ ได้แก่ (ASHRAE, 1989) ได้แก่

1. การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)
2. การนำความร้อน (Thermal Conduction)
3. การพาความร้อน (Thermal Convection)

2.3.1 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีตัวกลาง และไม่เกิดจากแรงโน้มถ่วง (Gravity) เป็นการเดินทางโดยตรงของพลังงานผ่านที่ว่างในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ที่ถูกปล่อยโดยอะตอม (Atom) และโมเลกุล (Molecule) การถ่ายเทความร้อนลักษณะนี้ถูกหน่วงเหนี่ยวโดยลักษณะของวัสดุ ระหว่างขอบนอก (Region) เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุ ก็จะเกิด การสะท้อน (Reflectance : ρ) การส่งผ่านวัตถุ (Transmittance : τ) และการ ดูดซึมเข้าวัตถุ (Absorptance : α) โดยค่า ทั้ง 3 รวมกันจะเท่ากับ 1

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

ถ้าเป็นวัตถุทึบแสง ค่าการส่งผ่าน (τ) = 0 และ $\rho + \alpha = 1$

ถ้าเป็นวัตถุผิวดำ (Black Surface) $\alpha = 1$; $\rho , \tau = 0$

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิววัตถุ เมื่อมีการแผ่รังสี มี 4 ลักษณะ (Lechner, 1991)ได้แก่

1. ค่าการสะท้อนรังสีของวัตถุ (Reflectance; ρ) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรังสีที่สะท้อนออกจากวัตถุ ต่อ พลังงานรังสีที่วัตถุนั้นได้รับ
2. ค่าการส่งผ่านรังสีของวัตถุ (Transmittance; τ) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรังสีที่ส่งผ่านวัตถุไปอีกด้าน ต่อ พลังงานรังสีที่วัตถุนั้นได้รับซึ่งวัสดุทึบแสงจะไม่มีคุณสมบัติตัวนี้
3. ค่าการดูดกลืนรังสีของวัตถุ (Absorptance; α) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานรังสีที่วัตถุดูดกลืนรังสีความร้อนไปสะสมไว้ในวัตถุ ต่อ พลังงานรังสีที่วัตถุนั้นได้รับ เมื่อวัตถุได้ดูดกลืนรังสีความร้อนเข้าไป จะทำให้โมเลกุลของวัตถุนั้นเกิดการกระตุ้นให้มีการสั่นแรงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนสัมผัสของวัตถุนั้นสูงขึ้น
4. ค่าการกระจายรังสีความร้อนจากผิววัตถุ (Emittance; ε) คือ เมื่อวัสดุดูดกลืนรังสีความร้อนแล้ว จะมีการกระจายรังสีความร้อนนั้นคืนกลับออกมา

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 4 นี้ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับวัตถุอย่างเดียว แต่ ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสีที่มากระทบวัตถุนั้น ตัวอย่างเช่น กระจก ถ้าได้รับรังสีคลื่นสั้น (รังสีดวงอาทิตย์)จะส่งผ่านรังสีได้เกือบจะทั้งหมด แต่ถ้าได้รับรังสีคลื่นยาว (รังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด) จะเกิดการสะท้อนรังสี, การดูดกลืน

รังสี และ แผ่รังสีกลับคืน (Reradiate) ในทุกทิศทาง จาก ลักษณะของกระจกเช่นนี้ทำให้รังสีคลื่นยาวที่ผ่านเข้าไปในอาคารทางกระจก จะไม่สามารถออกมาได้ ทำให้ภายในอาคารร้อนขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของกระจก และ พลาสติกทั่วไป ยกเว้น พลาสติกประเภทโพลีเอทเทอรีน (Polyethylene) ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้

การแผ่รังสีความร้อน อาจเป็นการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไปยังวัตถุ หรือเป็นการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุที่มีพลังงานความร้อนมากกว่า ไปยังวัตถุที่มีความร้อนน้อยกว่า ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (Emittance : ε) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและสีของผิววัตถุ Kirchholf's Law (ARHRAE, 1989: 3.12) ได้กล่าวถึง Emittance และ Asorptance ของผิววัตถุทึบแสง ว่า จากการพิจารณาด้วยหลักของ Thermadynamic ทุกพื้นผิวที่ได้รับการแผ่รังสี โดยไม่คำนึงถึงมุมหรือเป็นผิวที่เป็นตัวกระจาย

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

ถ้าเป็นผิวสีเทา หรือได้รับรังสีจากวัตถุผิวดำ ที่มีอุณหภูมิเท่ากัน

$$\varepsilon = \alpha$$

แต่ผิววัตถุส่วนใหญ่ไม่เป็นสีเทา ผิววัสดุที่พบเห็นทั่วไปจะมีคุณสมบัติของการคายรังสีความร้อน และค่าการดูดซับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ดังตารางที่ 2.2

Class	Surface	Total Normal Emittance[a]		Absorptance for Solar Radiation
		At 50 to 100°F	At 1000°F	
1	A small hole in a large box, sphere, furnace, or enclose	0.97 to 0.99	0.97 to 0.99	0.97 to 0.99
2	Black nonmetallic surface such as asphalt, carbon, slate, paint, paper	0.90 to 0.98	0.90 to 0.98	0.85 to 0.98
3	Red brick and tile, concrete and stone, rusty steel and iron, dark paints (red, brown, green, etc.)	0.85 to 0.95	0.75 to 0.90	0.65 to 0.80
4	Yellow and buff, brick and stone, firebrick, fire clay	0.85 to 0.95	0.70 to 0.85	0.50 to 0.70
5	White or light cream brick, tile, paint or paper, plaster, whitewash	0.85 to 0.95	0.60 to 0.75	0.30 to 0.50
6	Window glass	0.90	-	b
7	Bright aluminum paint; gilt or bronze paint	0.40 to 0.60	-	0.30 to 0.50
8	Dull brass, copper, or aluminum; galvanized steel; polished iron	0.20 to 0.30	0.30 to 0.50	0.40 to 0.65
9	Polished brass, copper, monel metal	0.02 to 0.05	0.05 to 0.15	0.30 to 0.50
10	Highly polished aluminum, tin plate, nickel, chromium	0.02 to 0.04	0.05 to 0.10	0.10 to 0.40
11	Selective surfaces			
	Stainless steel wire mesh	0.23 to 0.28	-	0.63 to 0.86
	White paint surface	0.92	-	0.23 to 0.49
	Copper treated with solution of $NaClO_2$ and NaOH	0.13	-	0.87
	Copper, nickel, and aluminum plate with CuO coating	0.09 to 0.21	-	0.08 to 0.93

[a] Hemispherical and normal emittance are not equal in many cases. The hemispherical emittance may be as much as 30% greater for polished reflectors to 7% lower for nonconductors.

[b] Absorbs 4 to 40% depending upon its transmittance.

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า การคายรังสีความร้อน และ ค่าดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ของผิววัสดุบางชนิด

ที่มา : ASHRAE Handbook Fundamental, 1989: 3.8

การแผ่รังสีพลังงานความร้อนของวัตถุดำ (Black Body) คือตัวแผ่รังสีที่สมบูรณ์แบบ มีค่าดังสมการ

$$E_b = \delta * T^4 \qquad \text{(ARHRAE, 1989: 3.7)}$$

โดยที่ E_b คือ ค่าพลังงานที่วัตถุดำคายออกมา

δ คือ ค่าคงที่ Stefan – Boltzmann = $0.1714 * 10^{-8}$ Btu/sq.ft. h. R^4

T^4 คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ($^\circ$R) ; T($^\circ$R) = t($^\circ$F) + 459.67

จากค่าคุณสมบัติของผิววัตถุ กับการแผ่รังสี มีผลต่ออุณหภูมิที่ผิววัตถุที่ภายนอก หรือ Sol-Air Temperature ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Te = To + I*\alpha / ho - \varepsilon*\Delta R / ho \qquad \text{(ASHRAE,1989: 26.4)}$$

โดยที่ Te คือ Sol-Air Temperature ($^\circ$F)

To คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^\circ$F)

I คือ รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบทั้งหมด (Btu/h sq.ft.)

α คือ ค่าการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของผิววัตถุ

ho คือ ค่า สปส. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีคลื่นยาวและการพาความร้อนที่ผิวด้านนอกวัตถุ (Btu/h sq.ft. $^\circ$F)

ΔR คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของผิววัสดุกับสภาพแวดล้อมและท้องฟ้า (Btu/h sq.ft.)

ε คือ ค่าการกระจายความร้อนจากผิววัตถุ

สำหรับวัตถุที่ผิวขนาดกับพื้นโลก จะได้รับรังสีคลื่นยาวจากท้องฟ้าเท่านั้น ซึ่งค่า ΔR จะเท่ากับ 20 Btu/h. sq.ft. ดังนั้น ถ้าค่า ε =1 และ h = 3.0 แล้วอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเนื่องจากรังสีคลื่นยาว หรือค่า $-(\varepsilon*\Delta R / ho)$ จากสมการ จะเท่ากับ -7°F (Bliss, 1961 cited in ASHRAE, 1989: 26.4)

ส่วนวัตถุที่ผิวตั้งฉากกับพื้นโลก จะได้รับรังสีคลื่นยาวจากพื้นดิน, อาคารข้างเคียง และ จากท้องฟ้าทำให้ยากที่จะหาค่า ΔR เมื่อรังสีดวงอาทิตย์มีความเข้มสูง อุณหภูมิที่ผิวภายนอกของวัตถุก็จะสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ดังนั้น รังสีคลื่นยาวจะใช้ค่าที่ท้องฟ้ามีการแผ่รังสีต่ำ (Sky Low Emittance) ซึ่งเราจะให้ค่า $\Delta R = 0$ สำหรับผิววัตถุที่ตั้งฉากกับพื้นโลก

2.3.2 **การนำความร้อน** (Thermal Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง เมื่อโมเลกุลที่มีการสั่นไม่เท่ากัน 2 วัตถุ (มีอุณหภูมิไม่เท่ากัน) ซึ่งอาจเป็นสสารชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกัน มาสัมผัสกันโดยตรง (Contact) คือวัตถุทั้งสองต้องอยู่ใกล้กันจนโมเลกุลสามารถชนกันได้ โมเลกุลที่มีการสั่นมากกว่าจะถ่ายเทไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นน้อยกว่า สำหรับในอากาศนั้นโมเลกุลของอากาศอยู่ห่างกัน ดังนั้นอากาศจึงไม่ใช้ตัวนำความร้อนที่ดี และถ้าเป็นสูญญากาศ จะไม่สามารถเกิดการนำความร้อนได้เลย ในอาคารการนำความร้อนจะถ่ายเทผ่านผนัง อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จากสมการ

$$q = U^{*}A^{*}\Delta T \qquad \text{(ASHRAE,1989: 3.3)}$$

โดยที่ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน หน่วยเป็น (Btu/Hr)

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

A คือ พื้นที่ของวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อน (sq ft)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหลที่อยู่ภายในและภายนอก หน่วยเป็น (^{o}F)

2.3.3 **การพาความร้อน** (Thermal Convection)

การพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของไหล (Fluid) ได้แก่ ก๊าซ และของเหลว เมื่อของไหลถูกทำให้ร้อน ของไหลที่มีความร้อนนั้นก็จะถูกทำให้เคลื่อนที่

"คำว่า Convection มีรากศัพท์มาจากสำนวนในภาษาลาติน หมายถึง "พกพา" ส่วนในสาขาฟิสิกส์ และวิศวกรรมศาสตร์ นั้นจะมีบรรยายถึงการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของของเหลวหรือก๊าซ การพาความร้อนจะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าปราศจากการเคลื่อนไหวของอากาศ แต่การเคลื่อนไหวของอากาศอาจเกิดขึ้นได้โดยปราศจากการถ่ายเทความร้อน การพาความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบปิด" (ไพบูลย์ รักษาสุทธิพันธ์., 2537)

การพาความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศ จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติ คือ เมื่อของไหลถูกที่ให้ร้อนขึ้น ของไหลจะเคลื่อนที่ ผ่านบริเวณที่ร้อนกว่า หรือเย็นกว่า ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อน หรือการถ่ายเทความร้อนโดยการพาด้วยเครื่องจักร เช่นการใช้พัดลม

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อน ที่มีอากาศเป็นตัวกลาง จะสามารถคำนวณหาค่าความร้อนได้ดังสมการ

ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

$$q_{Sensible} = 1.08 * cfm. * \Delta T$$

ความร้อนแฝง (Latent Heat)

$$q_{Latent} = 4840 * cfm. * \Delta W$$

ความร้อนรวม (Total Heat)

$$q_{Total} = 4.5 * cfm. * \Delta h$$

โดยที่ q คือ ปริมาณความร้อน หน่วยเป็น Btu/h.

cfm. คือ อัตราการถ่ายเทอากาศ หน่วยเป็น cfm.

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอก หน่วยเป็น $^{\circ}$ F

ΔW คือ ผลต่างของความชื้นจำเพาะระหว่างภายในและภายนอก หน่วยเป็น Pounds of Moisture per Pound of Dry Air

Δh คือ ผลต่างของ Enthalpy ระหว่างภายในและภายนอก หน่วยเป็น BTU / Pound of Dry Air

1.08 คือ 60 min/h * 0.075 lb_m/cu.ft. of Air Density * 0.24 Btu/lb $^{\circ}$F of Specific Heat of Air

การพาความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้อากาศเคลื่อนที่ (Thermal Force) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะที่มีการถ่ายเทอากาศ และไม่มี ซึ่งในสภาวะที่มีการถ่ายเทอากาศจะเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) หรือการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection) ส่วนในสภาวะที่ไม่มีการถ่ายเทอากาศ จะเรียกว่า "Thermosiphoning หรือ Gravity Flow คือ อากาศร้อนซึ่งเบากว่าอากาศเย็นจะลอยสูงขึ้น ในขณะที่อากาศเย็นซึ่งหนักกว่าและมีลักษณะการไหลคล้ายน้ำก็จะ ไหลลงไปแทนที่ด้านล่าง และสร้างเป็นชั้น (Layer) ของอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในห้องที่มีอากาศร้อน อากาศที่ร้อนจะสะสมอยู่ใกล้ๆ เพดานห้องและที่ระดับใกล้ๆพื้นห้อง จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า การแบ่งชั้นอากาศตามอุณหภูมิ (Stratification)

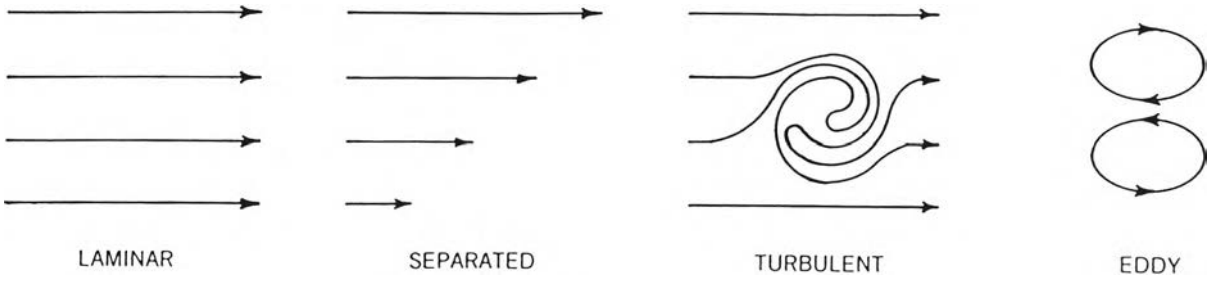
หลักพื้นฐานที่เกี่ยวกับการไหลของอากาศ (Lechner, 1991) มีดังนี้

1. ปัจจัยที่ทำให้เกิดการไหลของอากาศตามธรรมชาติ คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของจุด 2 จุด และ/หรือ ความแตกต่างระหว่างความดันอากาศของจุด 2 จุด

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ประเภทของการไหลของอากาศแบ่งตามลักษณะการไหล ได้ 4 ประเภท คือ
   - การไหลแบบตรงๆ กระแสสม่ำเสมอ (Laminar)
   - การไหลแบบตรงๆ แต่กระแสไม่สม่ำเสมอ (Separated)
   - การไหลแบบกระแสอลวน (Turbulent)
   - การไหลแบบกระแสวน (Eddy Current)

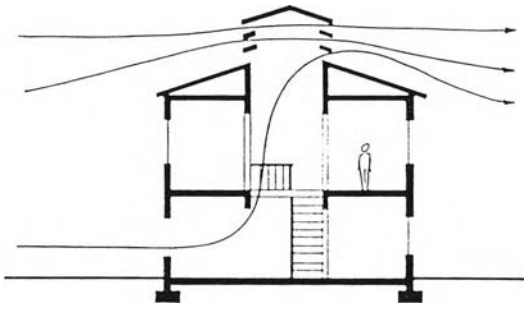
   ลักษณะต่างๆ ดูได้จากรูปภาพที่ 2.1



รูปภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะการไหลของอากาศประเภทต่างๆ
ที่มา : Lechner. Heating Cooling Lighting..1991: 184

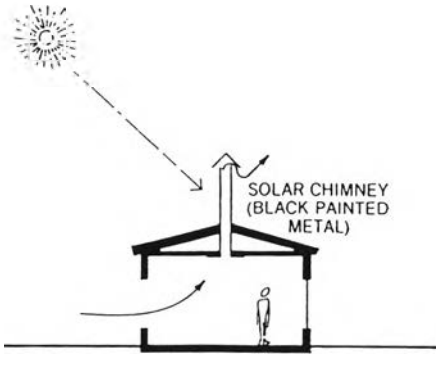
3. แรงเฉื่อยของอากาศ (Inertia) อากาศมีลักษณะเป็นมวล การเคลื่อนที่ตามปกติ จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางใหม่ อากาศจะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง จะไม่เคลื่อนที่ในลักษณะที่หักเป็นมุม
4. ลักษณะของอากาศ (Conservation of Air) อากาศไม่มีการถูกสร้าง หรือถูกทำลายโดยอาคารหรือสิ่งก่อสร้างได้ คือ อากาศที่เข้า จะเท่ากับ อากาศที่ออก
5. บริเวณพื้นที่ที่มีความดันสูง หรือต่ำ เมื่อมีลมมาปะทะอาคาร จะทำให้มีแรงกดมากระทำที่ผนังอาคาร และบริเวณนั้นจะมีความดันเป็นบวก (Positive Pressure) และในแนวผนังที่อยู่ด้านหลังของด้านที่ลมมาปะทะ ก็จะเกิดแรงดูด (Suction) และบริเวณนั้นความดันจะเป็นลบ (Negative Pressure) ส่วนด้านข้างก็จะเกิดความดันเป็นลบ และในส่วนที่ไม่มีความดันเป็นบวกหรือลบ อากาศก็ไม่นิ่งแต่จะเกิดกระแสลมอลวนและกระแสลมวน

6. Stack Effect ทำให้เกิดการดึงลมออกจากอาคารโดยใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นการดึงลมออกความต่างของอุณหภูมิภายในที่ช่องเปิดด้านล่างและช่องเปิดด้านบน จะต้องมากกว่า ความต่างของอุณหภูมิภายนอกที่ช่องเปิดด้านล่างและช่องเปิดด้านบน ถ้าต้องการให้การดึงลมออกด้วยวิธีนี้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องมีช่องเปิดที่ใหญ่มากเท่าที่จะเป็นไปได้ และ มีระยะห่างในแนวดิ่งให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อากาศจะไหลจากช่องเปิดด้านล่างไปช่องเปิดด้านบนอย่าอิสระ ถ้าไม่มีสิ่งกีดขวางทางที่อากาศไหล ดังรูปภาพที่ 2.2



รูปภาพที่ 2.2 แสดงการดึงลมออกจากอาคารที่หลังคา โดยใช้ Stack Effect
ที่มา : Lechner. Heating Cooling Lighting.,1991: 186

Solar Chimney เป็น Stack Effect อย่างหนึ่ง แต่เพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิภายในที่ช่องเปิดด้านล่างและช่องเปิดด้านบน ในมากขึ้นโดยการทำเป็นปล่องขึ้นไป และทำให้ปล่องนั้นร้อนที่สุด ทำให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ดังรูปภาพที่ 2.3



รูปภาพที่ 2.3 แสดงการดึงลมออกจากอาคารที่หลังคาโดยใช้ Solar Chimney
ที่มา : Lechner. Heating Cooling Lighting.,1991: 186

อัตราการไหลของอากาศจากด้านล่างไปด้านบนของการเกิด Stack Effect สามารถหาได้จากสมการ

$$Q = CA\,[h(ti-to)/ti]^{1/2}$$ (Stein, Reynold. Mechanical and Electrical Equipment for Building. Eight Edition 1992: 127)

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (cfm)

C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของช่องเปิดตามจริง

= 313 เมื่อค่าประสิทธิภาพเป็น 65%

= 240 เมื่อค่าประสิทธิภาพเป็น 50%

A คือ พื้นที่ช่องเปิดที่ลมออก ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าช่องลมเข้า (sq.ft.)

h คือ ความสูงจากช่องลมเข้า ถึงช่องลมออก (ft.)

ti คือ อุณหภูมิภายใน ที่สูงกว่า หน่วยเป็น (°F)

to คือ อุณหภูมิภายนอก ที่ต่ำกว่า หน่วยเป็น (°F)

2.4 การระบายอากาศ (Ventilation)

"การระบายอากาศ มีรากศัพท์มาจากคำว่า ventus ในภาษาลาติน ซึ่งหมายถึง การเคลื่อนที่ของอากาศ" (ไพบูลย์ รักษาสุทธิพันธ์., 2537) การระบายอากาศมีหน้าที่ดังนี้

1. ระบายอากาศเพื่อสุขภาพ (Health Ventilation)
2. ระบายอากาศเพื่อสภาวะน่าสบาย (Comfort Ventilation)
3. ระบายอากาศเพื่อทำความเย็นแก่ตัวอาคาร (Structure Cooling Ventilation)

2.4.1 ระบายอากาศเพื่อสุขภาพ (Health Ventilation)

เป็นการแลกเปลี่ยนอากาศ ซึ่งจำเป็นต่อสุขภาพ ลดการป่วยจากการติดต่อกันทางอากาศ เชื้อโรค และก๊าซพิษไม่เกิดการสะสม เพราะมีการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างภายในและภายนอก ซึ่งในอาคารแต่ละประเภทการใช้งานก็ต้องการอัตราการถ่ายเทอากาศแตกต่างกัน

Building Type (excluding kitchens, baths)	Recommended Ventilation Rates Per Occupant (cfm.)
Residential	7 - 10
Office Building	15 - 25
Hotels	15 – 20
Department Stores	10 - 15
Transportation Facilities	20 - 25
Auditoriums	10 – 20

ตาราง 2.3 แสดงความต้องการ การถ่ายเทของอากาศในอาคารแต่ละประเภท

ที่มา : Energy in Design Techniques,. AIA , 1981

2.4.2 **ระบายอากาศเพื่อสภาวะน่าสบาย** (Comfort Ventilation)

คือ ใช้การถ่ายเทอากาศเพื่อทำให้อยู่ในสภาวะน่าสบายด้านอุณหภูมิ คือ ใช้ความเร็วลมทำให้รู้สึกสบายและเย็นลงกว่าอุณหภูมิอากาศ ความเร็วลมที่ผ่านร่างกายช่วงกลางวัน ควรออกแบบให้ลมผ่านมากที่สุด แต่การใช้ Cross Ventilation ในตอนกลางวัน ไม่ทำให้อุณหภูมิลดลง

ความเร็วลม ทำให้มนุษย์รู้สึกว่าเย็นลง เมื่อมีความเร็วลม ดังตาราง 2.4

ความเร็วลมที่ทำให้รู้สึกสบาย ณ อุณหภูมิและความชื้น ที่กำหนด จะมีสมการดังนี้

WSc = 30[DBT-81 + 1.5(RH-60)/10] (Cowan.,1991)

โดย WSc คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็น fpm.

DBT คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์

ซึ่งค่าความเร็วลมที่ได้จากสมการนี้ จะต้องไม่เกิน 300 fpm

ความเร็วลม	ความเป็นไปได้ของความรู้สึก อุณหภูมิลดลง (ระหว่าง 80-90^{0}F) ตัวเลขที่มาก สนองกับบริเวณที่มีความชื้นสูงขึ้น	ผลที่อาจเกิดขึ้น
0-50 fpm.	ไม่มีความเปลี่ยนแปลงในความรู้สึกน่าสบาย	ไม่สามารถสังเกตได้
50-100 fpm.	ต่ำลง 2-3^{0}F	สบาย
100-200 fpm.	ต่ำลง 4-5^{0}F	โดยทั่วไปรู้สึกสบายแต่รับรู้ว่ามีการเคลื่อนไหวของอากาศ
200-300 fpm.	ต่ำลง 5-7^{0}F	รู้สึกมีลมพัดเล็ก น้อยจนถึงรู้สึกถูกรบกวนได้
สูงกว่า 300 fpm.	ต่ำลงมากกว่า 5-7^{0}F	ต้องการแก้ไขที่ถูกต้อง ถ้าจะให้การทำงานมีประสิทธิภาพและถูกสุขลักษณะ

ตาราง 2.4 ตารางแสดงความเร็วลมภายในอาคารกับสภาวะน่าสบาย

ที่มา Stein, Reynold. Mechanical and Electrical Equipment for Building. Eight Edition

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างร่างกายกับสภาพแวดล้อม เมื่ออากาศรอบๆตัวเราเคลื่อนไหวผ่านร่างกาย ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของร่างกายกับอากาศที่อยู่บริเวณผิวกาย ซึ่ง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างร่างกายกับสภาพแวดล้อม จะขึ้นอยู่กับความเร็วลม และกิจกรรมดังตาราง 2.5

Equation	Limits	Condition	Remark/Sources
$h_c = 0.061\ V^{0.6}$	$40 < V < 800$	Seat with moving air	Mitchell (1974)
$h_c = 0.55$	$0 < V < 40$		
$h_c = 0.475 + 0.044\ V^{0.67}$	$30 < V < 300$	Reclining with moving air	Colin and Houdas (1967)
$h_c = 0.90$	$0 < V < 30$		
$h_c = 0.92\ V^{0.53}$	$100 < V < 400$	Walk in still air	V is walking speed. Nishi and Gagge (1970)
$h_c = (M - 0.85)^{0.39}$	$1.1 < V < 3.0$	Active in still air	Gagge *et al.* (1976)
$h_c = 0.146\ V^{0.39}$	$100 < V < 400$	Walk on treadmill in still air	V is treadmill speed. Nishi and Gagge (1970)
$h_c = 0.068\ V^{0.69}$	$30 < V < 300$	Standing person in moving air	Developed from data presented by Seppenan et al. (1972)
$h_c = 0.70$	$0 < V < 30$		

h_c = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Btu / h. sq.ft. oF)

V = ค่าความเร็วลม (fpm)

M = met unit ; 1 met = 18.43 Btu / h. sq.ft.

ตาราง 2.5 แสดงสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างร่างกายกับสภาพแวดล้อม

ที่มา : ASHRAE Handbook Fundamental, 1989:

2.4.3 ระบายอากาศเพื่อทำความเย็นแก่ตัวอาคาร (Structure Cooling Ventilation)

เป็น การใช้การพาความร้อนซึ่งตัวกลางเป็นอากาศ เพื่อดึงความร้อนที่สะสมในวัสดุ ให้เย็นลง มักใช้กับประเทศในเขตร้อนแห้ง

Conduction – Convection เป็นปัจจัยสำคัญในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน คือ อัตราการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวของวัสดุ กับอากาศที่ผิวสัมผัส ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ แต่เมื่ออากาศที่ผิววัสดุนั้นถูกทำให้ร้อนขึ้น ก็จะเกิดการพาความร้อนเสมอเมื่ออากาศมีการเคลื่อนไหว มีอัตราการเปลี่ยนอากาศซึ่งจะมีผลกับอัตราการนำความร้อน

อากาศที่เคลื่อนที่ จะมีประสิทธิภาพในการรับหรือปล่อยความร้อนได้ดีกว่า อากาศนิ่ง ในการเปรียบเทียบการรับหรือปล่อยความร้อนของอากาศสามารถดูได้จากค่า "Wind Chill Index"

ค่า Wind Chill Index หาได้จากสมการ

$$WCI = (10.45 + 10 (V)^{1/2} - V) (33-T_a)$$ (Donald Watson & Kenneth Labs,1983)

โดยที่ WCI คือ Wind Chill Index (kcal/sqm. Hr)

V คือ ความเร็วลม (m/sec)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}C$)

ค่า อุณหภูมิที่เกิดจาก Wind Chill (T_{WCI})หาได้จากสมการ

$$T_{WCI} = -0.04544(WCI) + 33$$

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance (ε)					
		Non-Reflective ε=0.90		Reflective ε=0.20		ε=0.05	
		hi	R	hi	R	hi	R
Still Air							
Horizontal	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping 45°	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping 45°	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
Moving Air	Any Position	ho	R	ho	R	ho	R
15 mph.(Winter)	Any	6.00	0.17	-	-	-	-
7.5mph. (Summer)	Any	4.00	0.25	-	-	-	-

ตารางที่ 2.6 แสดงค่า Surface Conductances (Btu/h.sq ft. F) and Resistances (F. sq ft. h/Btu) for Air

ที่มา : ASHRAE Fundamental Handbook 1989: 22.2

จากตาราง 2.6 จะเห็นได้ว่า

ผิววัสดุที่มีค่าการกระจายรังสีความร้อน **สูง** ค่าความต้านทานความร้อนจะ **น้อย**

ผิววัสดุที่มีค่าการกระจายรังสีความร้อน **ต่ำ** ค่าความต้านทานความร้อนจะ **มาก**

และ เมื่อมีความเร็วลมที่ผิว ค่าความต้านทานความร้อนจะ **ต่ำกว่า** อากาศนิ่ง

หมายความว่า ในวัสดุที่มีค่าการกระจายรังสีความร้อน**สูง** (วัสดุที่ไม่สะท้อน) อุณหภูมิที่ผิววัสดุ**จะสูง** ทำให้เกิดการพาความร้อนที่ผิววัสดุนั้น ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ **ต่ำ** ประสิทธิภาพการนำความร้อนก็จะสูง คือ **สามารถนำความร้อนได้ดี**

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวเนื่อง

อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกับความสูง ในอาคารที่เปิดโล่ง นั้น ในส่วนด้านล่างของอาคารจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่า ส่วนด้านบนของอาคาร ได้มีการทดลองวัดค่าอุณหภูมิในโรงเก็บเครื่องบิน ได้ผลการทดลองว่า

ในระดับความสูงจากพื้น - 2 เมตร(7ฟุต) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 0.8 – 2.6 $^{\circ}$C/m (0.4-1.4°F)

ในระดับความสูง 2 เมตรขึ้นไป อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 0.5 $^{\circ}$C/m (0.3°F)

(MacDonold, Durrant,1989)

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของความร้อนในโถง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิภายนอก, ตำแหน่งความสูงของจุดต่างๆ ภายในโถง, ค่ารังสีแสงอาทิตย์, ขนาดช่องเปิดระบายอากาศและความหนาแน่นของมวลสารที่เป็นวัสดุภายในโถง และการเจาะช่องเปิดเพื่อระบายอากาศ ในแนวดิ่งในโถงสูง จะสามารถลดอุณหภูมิได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าไม่มีการปรับอากาศ อุณหภูมิภายในจะสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกในช่วงเวลาปกติ ยกเว้นในตอนกลางคืนและเช้าตรู่ (ไพบูลย์ สุทธิพันธ์., 2537)

สำหรับการศึกษาเรื่องอุณหภูมิและการแบ่งชั้นของความร้อน ในระบบปรับอากาศ รวมไปถึงอัตราการระบายความร้อน Sassi , Mohamed mohamed ได้ทำการศึกษาในปี 1992 พบว่า เป็นไปได้ยาก ที่จะคาดการณ์ถึงการแบ่งชั้นของความร้อนในระบบปรับอากาศในอาคารที่มีเพดานสูง ซึ่งก็มี ทฤษฎีการประหยัดพลังงานและหาคุณลักษณะต่างๆ ของชั้นความร้อนในโถง แต่ก็ยังยากแก่การสรุป เพราะมีตัวแปรหลากหลายเกินไป ต้องใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ เข้ามาช่วย ซึ่งพอจะมีสรุปได้บ้างจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งก็เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ทราบเพียงลักษณะของอุณหภูมิภายในเท่านั้น" (ไพบูลย์ รักษาสุทธิพันธ์ , 2537)

และได้มีการศึกษาถึงการนำคุณสมบัติของการแบ่งชั้นความร้อนในอากาศมาประยุกต์ในในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ที่มีเพดานสูง มาระบายความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักรภายในอาคาร อันจะช่วยลดภาระการปรับอากาศ ได้ทำการทดลอง3 ส่วนโดยในส่วนแรกทำการทดลองใน Chamber ย่อขนาด 1: 3และทดลองจ่ายลม และ ดึงลมกลับในตำแหน่งต่างๆ เพื่อสร้างให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิด้านล่างและด้านบนของชั้นอากาศมากที่สุด ในส่วนที่ 2 ได้ทำการทดลองในห้องสูง 18 ฟุต พบว่า การจ่ายลมให้เกิดเป็นม่านอากาศ (Curtain Air) ในแนวนอน จะช่วยลดพลังงานได้ถึง 30-50% จากการใช้เทคนิคของชั้นอากาศแบบธรรมดา และในส่วนที่ 3 ได้ทดลองใช้การทดความเย็นโยใช้การแผ่รังสี (Radiant Cooling Panel) โดยทดลองใน Chamber พบว่ามี คุณลักษณะ (Performance) ดีกว่าแบบจ่ายและดึงลมกลับ 8% (Oliveri, Joseph Bernard., 1988)