

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สืบเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา “อิทธิพลการแผ่รังสีของผนังอาคารที่มีผลต่อสภาวะน่าสบายของผู้อยู่อาศัย” ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีจึงมีที่มาจากตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาสู่การออกแบบระเบียบวิธีวิจัยที่ครอบคลุมตัวแปรอย่างครบถ้วน

ในการศึกษาได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ขั้นตอนประกอบด้วย :

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ เป็นขั้นตอนที่ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

- การนำความร้อน
- การพาความร้อน
- การแผ่รังสีความร้อน

2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแผ่รังสีความร้อน เป็นขั้นตอนที่ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

- คุณสมบัติพื้นผิววัสดุ
- คุณสมบัติเนื้อวัสดุ

2.3 สภาวะน่าสบาย

- อัตราการเผาผลาญพลังงาน
- เสื้อผ้าที่สวมใส่
- ความดันไอน้ำในอากาศ
- ความเร็วลม
- อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโดยรอบ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นขั้นตอนศึกษางานวิจัยที่กระทำมาก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระเบียบวิธีวิจัย

- “การคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิว โดยรอบจาก Plane Radiant Temperature โดย Krosgaard
- “ดัชนีสภาวะน่าสบาย Predicted Mean Vote (PMV) และ Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)” โดย P.O.Fanger
- วิทยานิพนธ์ “ผลกระทบของสีผนัง และมวลสารภายในต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร” โดย นายพรสวรรค์ พิริยะศรัทธา

## 2.1 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง โดย :

- การนำความร้อน (Thermal Conduction)
- การพาความร้อน (Thermal Convection)
- การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

### 2.1.1 การนำความร้อน (Thermal Conduction)

เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อน พลังงานจะถูกส่งผ่านเมื่อวัสดุมีความต่อเนื่องกัน โดยอาศัยการเคลื่อนไหวยาระหว่างกลุ่มชั้นอะตอมในวัสดุ การนำความร้อนสามารถควบคุมได้ง่าย โดย :

- การเลือกใช้วัสดุไม่นำความร้อน
- การนำมวลสารต่ำมาก็ควางเส้นทางการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

### 2.1.2 การพาความร้อน (Thermal Convection)

เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อน พลังงานจะถูกส่งผ่านเมื่อวัสดุมีความต่อเนื่องกับของไหล โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของๆไหล ซึ่งโมเลกุลจะนำความร้อนไปพร้อมกับตัวมันด้วย การพาความร้อนสามารถควบคุมได้โดย :

- การเลือกใช้ฉนวน จำพวกไฟเบอร์

### 2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน(Thermal Radiation)

เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อน เมื่อมีความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิโดยไม่อาศัยตัวกลาง โดยมีการถ่ายเทพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านที่ว่างในแนวเส้นตรง ซึ่งแตกต่างกับการนำและการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนสามารถควบคุมได้โดย :

- การเปลี่ยนคุณสมบัติของพื้นผิว โดยการใช้ Radiant Barriers Coating เคลือบพื้นผิววัสดุ เพื่อ เปลี่ยนคุณสมบัติการกระจายรังสีความร้อน (Emissivity)

(Radiant Barriers คือ พื้นผิวที่มีค่า Emissivity ต่ำโดยวางในแนวการแผ่รังสีความร้อนเพื่อทำหน้าที่กั้นการส่งผ่านความร้อน)

การแผ่รังสีความร้อน เกี่ยวข้องกับรังสี 2 ประเภท คือ

- รังสีคลื่นสั้น หรือ รังสีดวงอาทิตย์ (Shortwave Radiation or Solar Radiation )
- รังสีคลื่นยาว ( Longwave Radiation )

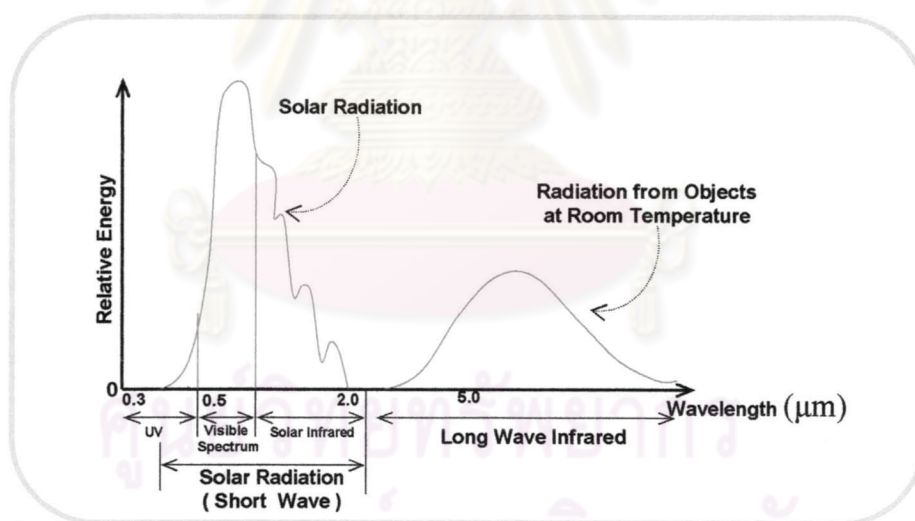
### รังสีคลื่นสั้น หรือ รังสีดวงอาทิตย์ (Shortwave Radiation or Solar Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนจะแผ่ออกจากสสารที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ ดังนั้นทุกสิ่งที่อยู่รอบตัวเราจึงมีการแผ่ (และการดูดซับ) รังสีเสมอ ซึ่งแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ที่แผ่รังสีให้แก่วัตถุบนพื้นโลก และทำให้พื้นผิวโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น คือ ดวงอาทิตย์ โดยพื้นผิวดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงถึง 10,000 องศาฟาเรนไฮต์ ด้วยเหตุนี้รังสีที่แผ่ออกมาจึงอยู่ในรูปของ รังสีคลื่นสั้น ประกอบด้วย

- อัลตราไวโอเลต (Ultra Violet; UV.) 0.01-0.40  $\mu\text{m}$
- แสงสว่าง (Visible Light) 0.40-0.76  $\mu\text{m}$
- อินฟราเรด (Shortwave infrared) 0.76-100  $\mu\text{m}$

### รังสีคลื่นยาว (Longwave Radiation)

รังสีคลื่นยาว เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปการแผ่รังสีระหว่างวัตถุบนพื้นโลก ปริมาณพลังงานที่เกิดขึ้นจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติพื้นผิววัสดุนั้นๆ เช่น ต้นไม้ หิน มนุษย์ เป็นต้นซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานเหล่านี้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ คิดสัดส่วนเป็น 1/160,000 เท่า ดังนั้นพลังงานที่น้อยกว่าจึงทำให้ช่วงความยาวคลื่นของรังสีคลื่นยาว แตกต่างกับรังสีคลื่นสั้น



ภาพที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันระหว่างรังสีคลื่นสั้น และ รังสีคลื่นยาว

ที่มา Lechner and Norbert. 1991 : 16

## 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแผ่รังสีความร้อน

พฤติกรรมของการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุเกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายตัวแปร สามารถแบ่งออกเป็น

2.2.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นผิววัสดุ

2.2.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเนื้อวัสดุ

### 2.2.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติพื้นผิววัสดุ

เมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของพื้นผิวผนังภายนอกอาคาร ประกอบด้วย

- ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Absorbitivity ;  $\alpha$  )
- ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน ( Thermal Emissivity ;  $\epsilon$  )
- อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Absorbitivity ) กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน ( Thermal Emissivity ) ;  $\alpha/\epsilon$

### ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Absorbitivity ; $\alpha$ )

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ (Shortwave Radiation) ตกกระทบวัสดุทึบแสง บางส่วนของพลังงานที่ตกกระทบจะถูกดูดซับ ส่วนที่เหลือจะถูกสะท้อนออก ซึ่งค่าการดูดซับรังสีของวัสดุมีได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิววัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งกำเนิด(The Temperature of Source ) ที่แผ่รังสีมายังพื้นผิวนั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิววัสดุ(Solar Absorbitivity ;  $\alpha$  ) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{\text{รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed Radiation)}}{\text{รังสีที่ตกกระทบ (Incident Radiation)}}$$

การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์เป็นกระบวนการที่เกิดทางเดียว (One way Processes) เนื่องจากไม่มีพื้นผิววัสดุใดที่มีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวดวงอาทิตย์ ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีของพื้นผิววัสดุบนโลกจึงอยู่ในรูปรังสีคลื่นยาว เพราะมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะแผ่ออกมาในรูปรังสีคลื่นสั้น ซึ่งความสามารถในการแผ่รังสีคลื่นยาวจากพื้นผิววัสดุที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังพื้นผิววัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะขึ้นอยู่กับ “ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนของวัสดุ ( Thermal Emissivity ) ส่วนรังสีที่เหลือจากการดูดซับจะถูกสะท้อนออก( Reflected ) โดยความสามารถของวัสดุทึบแสงในการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์จะกล่าวในรูป ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของวัสดุ (Reflectance : $\rho$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\rho = 1 - \alpha \quad ; \text{หมายเหตุ สมการนี้ใช้สำหรับวัสดุทึบแสง}$$

โดย

$\rho$    ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของวัสดุ

$\alpha$    ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของวัสดุ

### ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน ( Thermal Emissivity; $\epsilon$ )

เมื่อพื้นผิววัสดุดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในวัสดุ พื้นผิววัสดุจะแสดงพฤติกรรมการแผ่รังสีออกจากตัววัสดุซึ่งมีอุณหภูมิสูง ไปยังวัสดุอื่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความสามารถในการแผ่รังสีคลื่นยาวของวัสดุ จะกล่าวในรูป “ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนของวัสดุ (Thermal Emissivity; $\epsilon$ ) ” ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณการแผ่รังสีจากพื้นผิววัสดุ กับปริมาณการแผ่รังสีจากวัตถุดำในอุดมคติ (Black Body) คำนวณได้จาก

$$\epsilon = \frac{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากพื้นผิววัสดุ (Radiation from material)}}{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากวัตถุดำในอุดมคติ (Radiation from Black body)}}$$

โดย

$\epsilon$    ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนของวัสดุ

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนของวัสดุ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนของวัสดุเข้าใกล้ 1 แสดงว่าพื้นผิวนั้นมีประสิทธิภาพน้อยในการต้านทานการถ่ายเทความร้อนในรูปการแผ่รังสี

ตัวอย่าง : อีฐมอลูมีค่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อนประมาณ 0.90 หมายความว่า เมื่ออีฐมอลูถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวสิ่งแวดล้อมโดยรอบ อีฐมอลูจะถ่ายเทความร้อน 90%ของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในรูปการแผ่รังสีความร้อน พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกถ่ายเทความร้อนในรูปการนำ หรือ การพาความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนอยู่ในรูป

$$\alpha + \epsilon = 1$$

อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Absorbivity) กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน (Thermal Emissivity) ;  $\alpha/\epsilon$

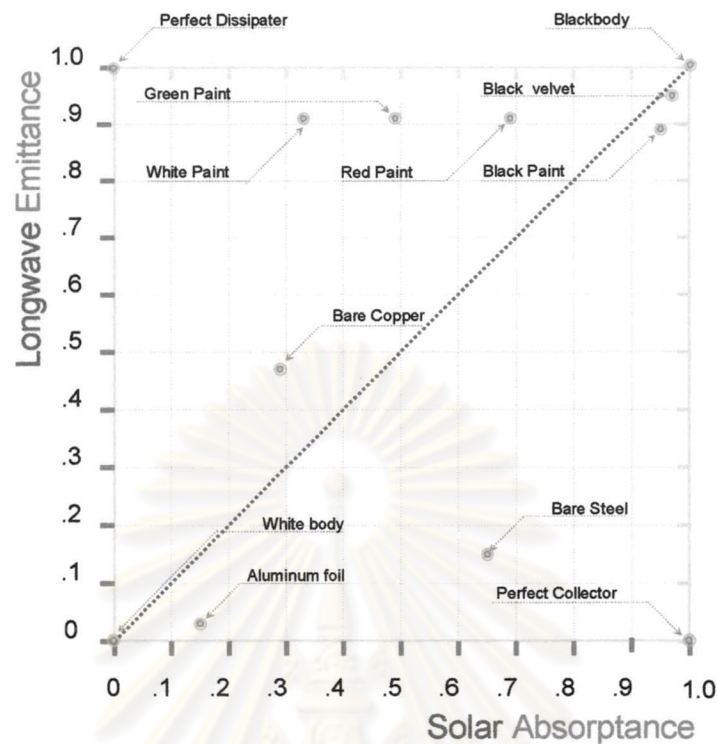
อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน ( $\alpha/\epsilon$ ) เป็นค่าบ่งชี้ถึงพฤติกรรมแผ่รังสีของพื้นผิววัสดุ คำนวณได้จาก

$$\alpha/\epsilon = \frac{\text{ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์}}{\text{ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายรังสีความร้อน}}$$

- $\alpha/\epsilon$  เท่ากับ 1 เป็นค่าวัตถุดำ (Black body) ในอุดมคติที่มีค่าการดูดกลืนรังสีเท่ากับค่าการกระจายความร้อน แต่วัตถุดำในอุดมคติไม่มีจริง ดังนั้นการพิจารณาค่า  $\alpha/\epsilon$  จึงพิจารณา 2 กรณีที่เกิดขึ้นจริง
- $\alpha/\epsilon$  มากกว่า 1 เป็นค่าที่แสดงว่าพื้นผิววัสดุมีการดูดกลืนรังสีมากกว่าการคายความร้อน
- $\alpha/\epsilon$  น้อยกว่า 1 เป็นค่าที่แสดงว่าพื้นผิววัสดุมีการคายความร้อนมากกว่าการดูดกลืนรังสี

Surface	Solar Absorbance ( $\alpha$ )	Longwave Emittance ( $\epsilon$ )	$\alpha/\epsilon$ Ratio
White Enamel on Iron	0.15-0.45	0.90	0.28-0.50
Green Paint	0.50	0.90	0.56
Red oil Base Paint	0.74	0.90	0.82
Black Paint	0.94-0.98	0.88	1.07-1.11
Black Velvet	0.98	0.96	1.02
Aluminum Foil	0.15	0.05	3.00
Bare Copper Plate	0.20-0.40	0.40-0.65	0.50-0.62
Bare Steel Plate	0.65	0.13	5.00

ตารางที่ 2-1 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติพื้นผิววัสดุบางชนิด



ภาพที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

จากภาพที่ 2-2 อธิบายได้ว่า

ค่า  $\alpha/\epsilon$  ของพื้นผิววัสดุที่เข้าใกล้ปลายเส้นประมุมขวาบนของกราฟ มีลักษณะใกล้เคียงวัสดุค่าในอุดมคติที่มีค่าการดูดกลืนรังสี เท่ากับค่าการกระจายความร้อน ( $\alpha/\epsilon = 1$ )

ค่า  $\alpha/\epsilon$  ของพื้นผิววัสดุที่เข้าใกล้ปลายเส้นประมุมซ้ายบนของกราฟ เป็นวัสดุที่มีค่าการกระจายความร้อนสูงสุด (Perfect Dissipater)

ค่า  $\alpha/\epsilon$  ของพื้นผิววัสดุที่เข้าใกล้ปลายเส้นประมุมขวาล่างของกราฟ เป็นวัสดุที่มีค่าการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ที่ดี เหมาะสมสำหรับการใช้งานกักเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (Perfect Collector)

ตารางที่ 2-2 แสดงคุณสมบัติค่าการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ของวัสดุ

Solar radiative properties of materials

ที่มา

Yunus A. cengel. Heat transfer :A Practical Approach. International edition.1998: 969

Description/Composition	Solar Absorptivity , $\alpha_s$	Emissivity at 300K , $\epsilon$	Ratio $\alpha_s$ / $\epsilon$	Solar Transmissivity , $\tau_s$
Aluminum				
Polished	0.09	0.03	3.0	
Anodized	0.14	0.84	0.17	
Quartz-overcoated	0.11	0.37	0.30	
Foil	0.15	0.05	3.0	
Brick , red (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concrete	0.60	0.88	0.68	
Galvanized Sheet Metal				
Clean, new	0.65	0.13	5.0	
Oxidized , weathered	0.80	0.28	2.9	
Glass, 3-2 mm thickness				0.79
Float or Tempered				0.88
Low iron oxide type				
Marble, slightly off-white	0.40	0.88	0.45	
Metal, Plated				
Black sulfide	0.92	0.10	9.2	
Black Cobalt Oxide	0.93	0.30	3.1	
Black Nickel Oxide	0.92	0.08	11.0	
Black Chrome	0.87	0.09	9.7	
Mylar, 0.13-mm thickness				0.87
Paints				
Black(persons)	0.98	0.98	1.0	
White, acrylic	0.26	0.90	0.29	
White, zinc Oxide	0.16	0.93	0.17	
Paper, white	0.27	0.83	0.32	
Plexiglas, 3.2-mm thickness				0.90
Porcelain tiles, white				
(Reflective glazed surface)	0.26	0.85	0.30	
Roofing tile, bright red				
Dry surface	0.65	0.85	0.76	
Wet surface	0.88	0.91	0.96	
Sand, dry				
Off-white	0.52	0.82	0.63	
Dull red	0.73	0.86	0.82	
Snow				
Fine Particles, fresh	0.13	0.82	0.16	
Ice granules	0.33	0.89	0.37	
Steel				
Mirror-finish	0.41	0.05	8.2	
Heavily rusted	0.89	0.92	0.96	
Stone (light Pink)	0.65	0.87	0.74	
Wood	0.59	0.90	0.66	



ตารางที่ 2-3 แสดงคุณสมบัติค่าการกระจายความร้อนของพื้นผิววัสดุ

Emissivities of Surface

ที่มา

Yunus A. cengel. Heat transfer :A Practical Approach. International edition.1998: 967

โลหะ ( Metals )

Material	Temperature(K)	Emissivity( $\epsilon$ )	Material	Temperature(K)	Emissivity( $\epsilon$ )
Aluminum			Magnesium, Polished	300-500	0.07-0.13
Polished	300-900	0.04-0.06	Mercury	300-400	0.09-0.12
Commercial Sheet	400	0.09	Molybdenum		
Heavily Oxidized	400-800	0.20-0.33	Polished	300-2000	0.05-0.21
Anodized	300	0.80	Oxidized	600-800	0.80-0.82
Bismuth , Bright	350	0.34	Nickel		
Brass			Polished	500-1200	0.07-0.17
Highly Polished	500-650	0.03-0.04	Oxidized	450-1000	0.37-0.57
Polished	350	0.09	Platinum, Polished	500-1500	0.06-0.18
Dull Plated	300-600	0.22	Silver, Polished	300-1000	0.02-0.07
Oxidized	450-800	0.60	Stainless Steel		
Chromium, Polished	300-1400	0.08-0.40	Polished	300-1000	0.17-0.30
Copper			Lightly Oxidized	600-1000	0.30-0.40
Highly Polished	300	0.02	Highly Oxidized	600-1000	0.70-0.80
Polished	300-500	0.04-0.05	Steel		
Commercial Sheet	300	0.15	Polished Sheet	300-500	0.08-0.14
Oxidized	600-1000	0.50-0.80	Commercial Sheet	500-1200	0.20-0.32
Black oxidized	300	0.78	Heavily Oxidized	300	0.81
Gold			Tin, Polished	300	0.05
Highly Polished	300-1000	0.03-0.06	Tungsten		
Bright foil	300	0.07	Polished	300-2500	0.03-0.29
Iron			Filament	3500	0.39
Highly Polished	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Case Iron	300	0.44	Polished	300-800	0.02-0.05
Wrought Iron	300-500	0.28	Oxidized	300	0.25
Rusted	300	0.61			
Oxidized	500-900	0.64-0.78			
Lead					
Polished	300-500	0.06-0.08			
Unoxidized, Rough	300	0.43			
Oxidized	300	0.63			

ตารางที่ 2-4 แสดงคุณสมบัติค่าการกระจายความร้อนของพื้นผิววัสดุ

Emissivities of Surface

ที่มา

Yunus A. cengel. Heat transfer :A Practical Approach. International edition.1998: 967

อโลหะ ( NonMetals )

Material	Temperature(K)	Emissivity( $\epsilon$ )	Material	Temperature(K)	Emissivity( $\epsilon$ )
Alumina	800-1400	0.65-0.45	Paper, White	300	0.90
Aluminum Oxide	600-1500	0.69-0.41	Plaster, White	300	0.93
Asbestos	300	0.96	Porcelain, Glazed	300	0.92
Asphalt Pavement	300	0.85-0.93	Quartz, Rough, Fused	300	0.93
Brick			Rubber		
Common	300	0.93-0.96	Hard	300	0.93
Fireclay	1200	0.75	Soft	300	0.86
Carbon Filament	2000	0.53	Sand	300	0.90
Cloth	300	0.75-0.90	Silicon Carbide	600-1500	0.87-0.85
Concrete	300	0.88-0.94	Skin, Human	300	0.95
Glass			Snow	273	0.80-0.90
Window	300	0.90-0.95	Soil, Earth	300	0.93-0.96
Pyrex	300-1200	0.82-0.62	Soot	300-500	0.95
Pyroceram	300-1500	0.85-0.57	Teflon	300-500	0.85-0.92
Ice	273	0.95-0.99	Water, Deep	273-373	0.95-0.96
Magnesium Oxide	400-800	0.69-0.55	Wood		
Masonry	300	0.80	Beech	300	0.94
Paints			Oak	300	0.90
Aluminum	300	0.40-0.50			
Black, lacquer, Shiny	300	0.88			
Oil, all Color	300	0.92-0.96			
Red Primer	300	0.93			
White Acrylic	300	0.90			
White Enamel	300	0.90			

จากค่าทั้ง 3 ที่กล่าวมานี้ เป็นคุณสมบัติของพื้นผิววัสดุ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับเนื้อวัสดุ ดังนั้นวัสดุชนิดเดียวกันที่เคลือบ (Coating) พื้นผิวภายนอกแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติการดูดซับรังสีคลื่นสั้น, การกระจายความร้อน และอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนรังสีกับการกระจายความร้อนแตกต่างกัน

### การคำนวณปริมาณการแผ่รังสีของพื้นผิววัสดุ

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิววัสดุ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะสะสม และทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่วัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบๆ วัสดุจึงแผ่รังสีไปยังพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีของพื้นผิววัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{Emit}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4$$

โดย

$Q_{\text{emit}}$	ปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมาจากพื้นผิววัสดุ	Btu
$\epsilon$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของพื้นผิววัสดุ	
$\sigma$	Stefen Boltzmann Constant $0.1714 \cdot 10^{-8}$	Btu/h.ft <sup>2</sup> .F <sup>4</sup>
$A$	พื้นที่ผิววัสดุ	ft <sup>2</sup>
$T_s$	อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ	F

### จากสมการเมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องพบว่า

- $\epsilon$  ถ้าวัสดุมีการเคลือบพื้นผิวให้มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำ ปริมาณความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิววัสดุจะลดน้อยลง ซึ่งจะมีผลต่อความรู้สึกร้อนหนาวของผู้ใช้ภายในอาคาร รวมถึงช่วยลดภาระการทำความเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ

### อุณหภูมิผิววัสดุเมื่อได้รับรังสีดวงอาทิตย์ ( Sol-Air Temperature )

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร คือ ดวงอาทิตย์ เนื่องจากเมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิววัสดุ ทำให้อุณหภูมิพื้นผิววัสดุสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ดังนั้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิววัสดุภายนอกอาคาร และอุณหภูมิพื้นผิววัสดุภายในอาคารจะมีค่าสูงขึ้น ปริมาณการถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในอาคาร ( ภาระการทำความเย็น ) จึงเพิ่มขึ้น ตามสมการ  $Q = C \cdot A \cdot \Delta T$

อุณหภูมิพื้นผิววัสดุเมื่อได้รับรังสีดวงอาทิตย์ คำนวณได้จากสมการ

$$T_{\text{sol-air}} = T_{\text{air}} + \frac{I\alpha}{h_o} - \frac{\epsilon\delta R}{h_o}$$

โดย

$T_{\text{sol-air}}$	อุณหภูมิเสมือนพื้นผิววัสดุ ( Sol-air temperature )	F
$T_{\text{air}}$	อุณหภูมิอากาศภายนอก	F
$I$	ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์	Btu/hr.sq.F.
$\alpha$	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีดวงอาทิตย์	
$h_o$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนของพื้นผิวภายนอก	Btu/h.sq.ft.F.
$\epsilon$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของพื้นผิววัสดุภายนอก	
$\delta R$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของพื้นผิววัสดุกับสภาพแวดล้อม และท้องฟ้า	Btu/h.sq.ft.

จากสมการเมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องพบว่า

$T_{\text{air}}$	อุณหภูมิอากาศ เป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา
$I$	ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิว เป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิผิววัสดุ ดังนั้นการบังเงาให้แก้ววัสดุ จะทำให้อุณหภูมิผิววัสดุลดลง รวมถึงทิศทางที่แตกต่างกัน ก็ทำให้ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวแตกต่างกัน
$\alpha$	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิววัสดุ ดังนั้นเมื่อมีการเคลือบพื้นผิววัสดุแตกต่างกัน จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิววัสดุแตกต่างกัน
$\epsilon \delta R$	สำหรับพื้นผิววัสดุที่ตั้งฉากกับพื้นโลก ( เช่น ผนัง ) จะได้รับรังสีคลื่นยาวจากพื้นดิน อาคารข้างเคียง และท้องฟ้าทำให้ยากในการคำนวณหาค่า $\delta R$ ดังนั้นรังสีคลื่นยาวจะใช้ค่าที่ท้องฟ้ามีการแผ่รังสีค่า $\delta R=0$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเนื้อวัสดุ

เมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเนื้อวัสดุผนังอาคารชนิดที่บแสดงประกอบด้วย

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)
- ค่าความจุความร้อนของวัสดุ ( Heat Capacity)

### ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่มีพื้นที่ 1 ตารางฟุต เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ 1 องศาฟาเรนไฮต์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U = \frac{1}{(\Sigma R)}$$

โดย

U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	Btu/h.ft <sup>2</sup> .F
ΣR	ผลรวมค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ	h.ft <sup>2</sup> .F / Btu

การพิจารณาปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุจากของไหลหนึ่งไปสู่อีกของไหลหนึ่ง (เช่น จากอากาศภายนอกสู่อากาศภายในอาคาร) ในสภาวะ Steady-Stead ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

โดย

Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	Btu/h.
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	Btu/h.ft <sup>2</sup> .F
A	พื้นที่ผิววัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อน	ft <sup>2</sup>
ΔT	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอก และอากาศภายใน	F

จากสมการเมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องพบว่า

U ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำจะทำให้ปริมาณความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารลดน้อยลงด้วย

### ค่าความจุความร้อนของวัสดุ ( Heat Capacity)

การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร พลังงานความร้อนที่พื้นผิวผนังได้รับ ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุมีค่าความจุความร้อน ดังนั้นวัสดุที่แตกต่างกันค่าความจุความร้อนจึงแตกต่างกันด้วย

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( Specific heat ) คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุหนัก 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา

การคำนวณหาค่าความจุความร้อน ( Heat Capacity) ของวัสดุ เพื่อทราบปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาทุก 1 หน่วยปริมาตร คำนวณได้จากสมการ

$$C = p \cdot c \quad ; \quad p = m/v$$

โดย

C	ค่าความจุความร้อนของวัสดุ	Btu/ft <sup>3</sup> .F
p	ความหนาแน่นของวัสดุ	lb/ft <sup>3</sup>
c	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ	Btu/ lb.F
m	มวลของวัสดุ	lb
v	ปริมาตรของวัสดุ	ft <sup>3</sup>

การคำนวณหาปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุ คำนวณได้จากสมการ

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

โดย

Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	Btu
m	มวลของวัสดุ	lb
c	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ	Btu/ lb.F
$\Delta T$	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ต้องการ	F

จากสมการเมื่อพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องพบว่า

m, c มวลสาร และค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน

## 2.3 สภาวะน่าสบาย (Thermal Comfort )

B.Stein (1982) ให้คำจำกัดความ “ภาวะน่าสบายทางด้านอุณหภูมิ ( Thermal comfort )” คือ สภาวะที่เรา (มนุษย์) ไม่รู้สึกว่าจะตนเองสูญเสียความร้อน หรือได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อม เป็นสภาวะที่มีความสมดุลทางด้านอุณหภูมิ หรือระหว่างร่างกายกับสภาพแวดล้อม

ซึ่ง P.O. Fanger (1967) พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความรู้สึกสบายของมนุษย์ในสภาวะที่ร่างกายปกติมี 6 ปัจจัย โดยประกอบด้วยปัจจัยทางด้านบุคคล 2 ปัจจัย และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม 4 ตัวแปร ดังนี้

- อัตราการเผาผลาญพลังงานร่างกาย ( Metabolism rate)
- เสื้อผ้าที่สวมใส่ (Cloth-Value )
- ความชื้นสัมพัทธ์ ( Relative Humidity) / ความดันไอน้ำในอากาศ(Vapor Pressure)
- ความเร็วลม (Air Velocity)
- อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบ (Mean Radiant Temperature; MRT)
- อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

### 2.3.1 อัตราการเผาผลาญพลังงานร่างกาย ( Metabolism rate)

การเผาผลาญพลังงานของร่างกายจะมาก หรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรม มีหน่วยเป็น Met โดย  $1 \text{ Met} = 50 \text{ Kcal.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  การเผาผลาญพลังงานก่อให้เกิดความร้อนภายในร่างกาย ร่างกาย จะกระทำการถ่ายเทพลังงานความร้อนออกจากร่างกายในรูปแบบต่างๆ เช่น การแผ่รังสีความร้อน, การระเหยของเหงื่อ เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในร่างกายให้เหมาะสม(ประมาณ 37-38 องศาเซลเซียส )

ตารางที่ 2-5 แสดงอัตราการเผาผลาญพลังงาน (Metabolic Rate) ที่เกิดขึ้น ณ.ระดับกิจกรรมต่างๆ

Activity	Metabolic rate $M/A_{DU}$ Kcal /hr.m <sup>2</sup>	Mechanical Efficiency $\eta$	Relative velocity M/s
<b>Resting</b>			
Sleeping	35	0	0
Reclining	40	0	0
Seated, quiet	50	0	0
Stand, relaxed	60	0	0
<b>Walking On the level km/hr</b>			
3.2	100	0	0.9
4.0	120	0	1.1
4.8	130	0	1.3
5.6	160	0	1.6
<b>Heavy work</b>			
Pushing Wheelbarrow ( 57 kg at 4.5 km/hr)	125	0.2	1.4
Handling 50 kg bags	200	0.2	0.5
Pick & shovel work	200-240	0.1-0.2	0.5
Digging trenches	300	0.2	0.5
<b>Domestic work</b>			
House cleaning	100-170	0-0.1	0.1-0.3
Cooking	80-100	0	
Washing dishes, standing	80	0	0-0.2
Washing by hand and ironing	100-180	0-0.1	0-0.2
Shaving, washing and dressing	85	0	0-0.2
<b>Office Work wpm</b>			
Typing(electrical) 30	45	0	0.05
40	50	0	0.05
T7yping (mechanical) 30	55	0	0.05
40	60	0	0.05
Draughtsman	60	0	0-0.1

ที่มา : ประยุกต์มาจากตารางที่ 1. Metabolic Rate at Different Typical Activities  
P.O. Fanger. Thermal Comfort : Analysis and Applications in Environmental Engineering,  
(New York : McGraw-Hill,1970), p.24-26



### 2.3.2 เสื้อผ้าที่สวมใส่ (Cloth-Value)

นอกจากอัตราการเผาผลาญพลังงานแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความสบายของผู้อาศัย คือ เสื้อผ้าที่สวมใส่

กระบวนการนำความร้อนผ่านเสื้อผ้าเป็นกระบวนการซับซ้อน โดยค่าการนำความร้อนผ่านวัสดุที่เป็นของแข็ง สามารถเปลี่ยนไปตามความเปียกของเสื้อผ้า คุณสมบัติในด้านกัมมันตรังสีของเนื้อผ้า และความสามารถในการส่งผ่านอากาศของเนื้อผ้า ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเป็นคุณสมบัติของชุดแต่งกาย ที่รวมค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมด จากผิวหนังสู่ภายนอกของเสื้อผ้า แต่ไม่รวมค่าความต้านทานความร้อนภายนอก โดย  $1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าความต้านทานความร้อนของเครื่องแต่งกาย

Clothing Ensemble	Icl clo	fcl
Nude	0	1.0
Shorts	0.1	1.0
Typical Tropical Clothing Ensemble :		
Shorts, open-neck shirt with short sleeves, light socks and sandals	0.3-0.4	1.05
Apollo Constant Ware Garment ( astronauts) :		
Light cotton undergarment with short sleeves and ankle length legs, cotton socks	0.35	1.05
Light Summer Clothing :		
Long light -weight-trousers, open neck shirt with short sleeves	0.5	1.1
Light Working Ensemble :		
Athletic shorts, woolen socks, cotton work shirt (open-neck), and work trousers, shirt tail out	0.6	1.1
U.S. Army " Fatigues", man's :		
Light-weight underwear, cotton shirt and trousers, cushion sole socks and combat boots	0.7	1.1
Combat Tropical Uniform :		
Same general components as U.S. Army fatigues but with shirt and trousers with cloth, wind resistant, poplin	0.8	1.1
Typical Business Suit	1.0	1.15
Typical Business Suit + Cotton Coat	1.5	1.15
Light Outdoor Sportswear :		
Cotton shirt, trousers, T-shirt, short, socks, shoes and single ply poplin (cotton and dacron) jacket	0.9	1.15
Heavy Traditional European Business Suit :		
Cotton underwear with long legs and sleeves, shirt, woollen socks, shoes, suit including trousers, jacket and vest.	1.5	1.15-1.2
U.S. Army Standard Cold-wet Uniform :		
Cotton-wool undershirt and drawers, wool and nylon flannel shirt, wind resistant, water repellent trousers and field coat, cloth mohair and wool coat liner and wool socks	1.5-2.0	1.3-1.4
Heavy Wool Pile Ensemble :		
(Polar weather suit)	3-4	1.3-1.5

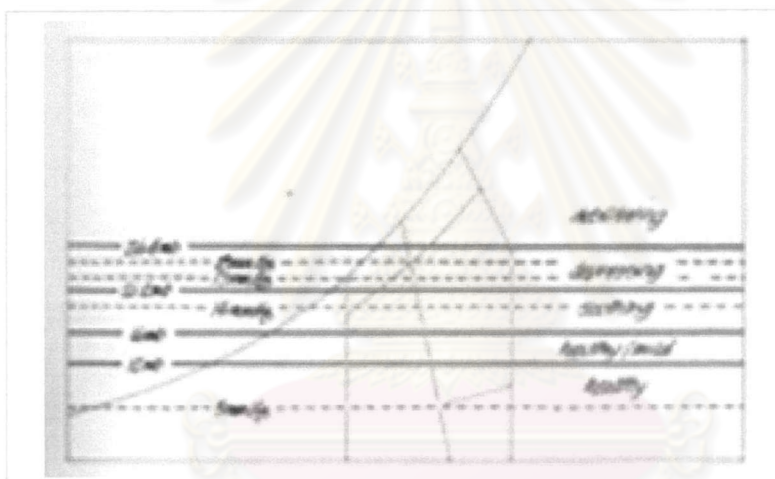
ที่มา : P.O. Fanger. Thermal Comfort : Analysis and Applications in Environmental Engineering, (New York : McGraw-Hill,1970), p.33

จากการศึกษาของ Goldman (1978) เกี่ยวกับระดับกิจกรรม และเสื้อผ้าพบว่า :

- สำหรับระดับกิจกรรม **Light Office Work 100-200 Kcal.** และบุคคลสวมใส่เสื้อผ้าที่มีค่าความต้านทาน 0.6 Clo-Value บุคคลจะคงอยู่ในสภาวะน่าสบายได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดค่า Clo-Value 0.1 โดยการลด หรือเพิ่ม อุณหภูมิอากาศ (GBT = DBT)  $1^{\circ}\text{F}$
- สำหรับระดับกิจกรรม **Higher Worker Level.** และบุคคลสวมใส่เสื้อผ้าที่มีค่าความต้านทาน 0.6 Clo-Value บุคคลจะคงอยู่ในสภาวะน่าสบายได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดค่า Clo-Value 0.1 โดยการลด หรือเพิ่ม อุณหภูมิอากาศ (GBT = DBT)  $2^{\circ}\text{F}$

### 2.3.3 ความดันไอน้ำในอากาศ (Vapor Pressure)

จากการศึกษาของ Le Roy Lansberg (1972) เกี่ยวกับอิทธิพลความดันไอน้ำในอากาศที่มีผลต่อภาวะน่าสบาย พบว่าความดันไอน้ำในอากาศมีผลต่อสุขภาพ และร่างกายของบุคคล โดย :



ภาพที่ 2-3 แสดงอิทธิพลของความดันไอน้ำในอากาศ ซึ่งมีผลต่อความรู้สึกของบุคคล

ที่มา : Donald Watson, FAIA, and Kenneth Labs.

Climatic Design : Energy-Efficient Building Principles and Practice. 1983, p.27

จากภาพที่ 2-3 พบว่า

คนจะรู้สึกสดชื่นมีชีวิตชีวา ( <b>Healthy</b> )	ที่ระดับความดันไอน้ำ	<b>12-16</b>	millibar.
คนจะรู้สึกสงบ ( <b>Soothing</b> )	ที่ระดับความดันไอน้ำ	<b>12-21.2</b>	millibar.
คนจะรู้สึกซึมเศร้า ( <b>Depression</b> )	ที่ระดับความดันไอน้ำ	<b>21.2-26.4</b>	millibar.
คนจะรู้สึกอ่อนเพลีย ( <b>Debilitating</b> )	ที่ระดับความดันไอน้ำ	มากกว่า <b>26.4</b>	millibar.

ขอบเขตภาวะไม่สบาย อยู่ ณ.ค่าความดันไอน้ำที่มีค่าต่ำกว่า 5 millibar. เนื่องจากปริมาณความดันไอน้ำมีค่าต่ำมาก จะทำให้เลือดออกทางจมูกได้เนื่องจากอากาศแห้งมาก และค่าความดันไอน้ำที่มีค่าสูงกว่า 17 หรือ 18 millibar. จะทำให้บุคคลรู้สึกหายใจไม่ออกเนื่องจากปริมาณไอน้ำในอากาศมีมาก

### 2.3.4 ความเร็วลม ( Wind Velocity )

การเคลื่อนไหวของอากาศมีอิทธิพลต่อความสมดุลความร้อนของร่างกาย และนำพาความร้อนที่เกิดขึ้นออกจากร่างกาย โดย :

- มีผลต่ออัตราการส่งผ่านความร้อนด้วยการนำ และการพาความร้อนระหว่างผิวหนังกับอากาศ การเพิ่มความเร็วลม เป็นการเพิ่มอัตราการส่งผ่านความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศ (Dry Bulb Temperature) ว่าสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิผิวหนัง (  $T_{skin} \sim 90-95^{\circ}F$  ) ความร้อนจะถูกนำออกไป โดยอาศัยการนำความร้อน และการพาความร้อน เมื่ออุณหภูมิอากาศต่ำกว่า  $90^{\circ}F$  และความร้อนจะเข้าสู่ร่างกาย โดยการนำความร้อนและการพาเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิอากาศใกล้เคียง หรือเหนือกว่าอุณหภูมิผิวหนัง (  $T_{skin}$  )
- มีผลต่ออัตราความเย็นของร่างกาย ผ่านการระเหยกลายเป็นไอของความชื้นที่ผิวหนัง อัตราการระเหยกลายเป็นไอขึ้นอยู่กับความเร็วอากาศ และความดันไอน้ำในอากาศ (Vapor Pressure) ซึ่งการเพิ่มความเร็วลม เป็นการเพิ่มปฏิกิริยาการทำความเย็น โดยการระเหยกลายเป็นไอ ( ในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิสูง และความดันไอน้ำสูง การระเหยจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย )

กระแสลมที่พัดผ่านผิวร่างกาย โดยมีความเร็วเพิ่มขึ้น มนุษย์จะรู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง ความรู้สึกเย็นลงกว่าอุณหภูมิอากาศ สืบเนื่องจากการระบายความร้อนออกจากผิวกายแปรผันตามความเร็วของกระแสลม นั่นคือ เมื่อกระแสลมมีความเร็วสูงขึ้นร่างกายจะระบายความร้อนออกจากผิวกายได้เร็วขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้จริง กับความรู้สึกเมื่อมีกระแสลมพัดผ่านผิวกาย (ในที่นี้ เรียกว่าความรู้สึกเย็นลง) มีความสัมพันธ์ดังสมการ :

$$\text{ความรู้สึกเย็นลง}(^{\circ}C) = 0.381v + 0.016rh^3$$

โดย	V	ความเร็วลม	km/hr.
	rh	ความชื้นสัมพัทธ์	%

จากการศึกษาของ Vector Olgyay พบว่าระดับความเร็วลม สัมพันธ์กับความรู้สึกบุคคล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Indoor Air Velocity และ Comfort

ความเร็วลม	ความรู้สึกในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	ผลที่อาจเกิดขึ้น
0-50 fpm	ไม่มีความเปลี่ยนแปลงในความรู้สึกนำสบาย	ไม่สามารถสังเกตได้
50-100 fpm	ต่ำกว่า 2-3°F	สบาย
100-200 fpm	ต่ำกว่า 4-5°F	โดยทั่วไปรู้สึกสบาย แต่รับรู้ว่ามีลมพัดไหวของอากาศ
200-300 fpm	ต่ำกว่า 5-7°F	รู้สึกมีลมพัดเล็กน้อย จนถึงรู้สึกถูกรบกวน
สูงกว่า 300 fpm	ต่ำมากกว่า 5-7°F	ต้องมีการแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน+ถูกสุขลักษณะ

ที่มา :Stein, Reynolds, MaGuiness. *Mechanical and Electrical Equipment for Buildings* Edition 7 (New York : John Wiley & Sons).1986, p.38

### 2.3.5 อุณหภูมิเฉลี่ยของการแผ่รังสีพื้นผิวโดยรอบ (Mean Radiant Temperature; MRT)

การแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างร่างกายกับสิ่งแวดล้อม ขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิวของร่างกายกับสิ่งแวดล้อมนั้น แต่ในความเป็นจริงยังมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่

- อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)
- ความเร็วลม (Wind Velocity)
- เสื้อผ้าที่สวมใส่ (Cloth Value)

ดังนั้นปัจจัยต่างๆจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความร้อนให้เกิดความสมดุล ซึ่งจาก Fanger's Chart ได้กำหนดเงื่อนไขในการศึกษาความสมดุลความร้อน โดยควบคุมตัวแปรต่างๆดังนี้

- ระดับกิจกรรม : ผู้ใหญ่วัยกลางคนนั่งสบาย
- ระดับเสื้อผ้า : 0.5 Clo-Value
- ความเร็วลม : น้อยกว่า 20 fpm หรือน้อยกว่า 0.1 m/s

ภายใต้เงื่อนไขข้างต้น ความเร็วลม 20 fpm (0.1 m/s) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิอากาศจาก 78 ถึง 88 F<sub>(ET)</sub> อุณหภูมิ MRT จะมีค่า 68 F<sub>(ET)</sub> เพื่อรักษาความรู้สึกให้เท่ากับภาวะนำสบาย แต่ในกรณีที่ความเร็วลมอยู่ที่ 40 fpm (0.2m/s) และเพิ่มอุณหภูมิอากาศอีก 10 °F ดังนั้นอุณหภูมิอากาศ จาก 80 °F เป็น 90 °F ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิ MRT 14 °F ดังนั้นอุณหภูมิ MRT จาก 80 °F เป็น 66 °F ดังนั้นภายใต้ภาวะอากาศที่ใกล้เคียงอากาศนี้ ถ้าอุณหภูมิ MRT ลดลง 1 ถึง 1.4 °F จะต้องเพิ่มอุณหภูมิอากาศ 1 °F

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 2.4.1 การคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบจาก Plane Radiant Temperature โดย Krosgaard
- 2.4.2 ดัชนีสถานะน่าสบาย Predicted Mean Vote (PMV) และ Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)” โดย P.O.Fanger
- 2.4.3 วิทยานิพนธ์ “ผลกระทบของสีผนัง และมวลสารภายในต่อการถ่าย ความร้อนเข้าสู่อาคาร” โดย นายพรสวัสดิ์ พิริยะศรัทธา

### 2.4.1 การคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบจาก Plane Radiant Temperature

การคำนวณอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยพื้นผิวโดยรอบ (MRT) ด้วยวิธี Plane Radiant Temperature ( $t_{pr}$ ) ถูกนำเสนอโดย Krosgaard ในปีค.ศ. 1949 ซึ่งประกอบด้วย 6 ทิศทาง ได้แก่ ขึ้น, ลง, ซ้าย, ขวา, หน้า, หลัง

สำหรับผู้ใช้อาคารที่อยู่ในลักษณะทำยื่นค่า MRT สามารถหาได้จากสมการ :

$$\bar{t}_r = \frac{\{0.08[t_{pr}(\text{up}) + t_{pr}(\text{down})] + 0.23[t_{pr}(\text{right}) + t_{pr}(\text{left})] + 0.35[t_{pr}(\text{front}) + t_{pr}(\text{back})]\}}{2 * (0.08+0.23+0.35)}$$

สำหรับผู้ใช้อาคารที่อยู่ในลักษณะทำนั้ง ค่า MRT สามารถหาได้จากสมการ :

$$\bar{t}_r = \frac{\{0.18[t_{pr}(\text{up}) + t_{pr}(\text{down})] + 0.22[t_{pr}(\text{right}) + t_{pr}(\text{left})] + 0.30[t_{pr}(\text{front}) + t_{pr}(\text{back})]\}}{2 * (0.18+0.22+0.30)}$$

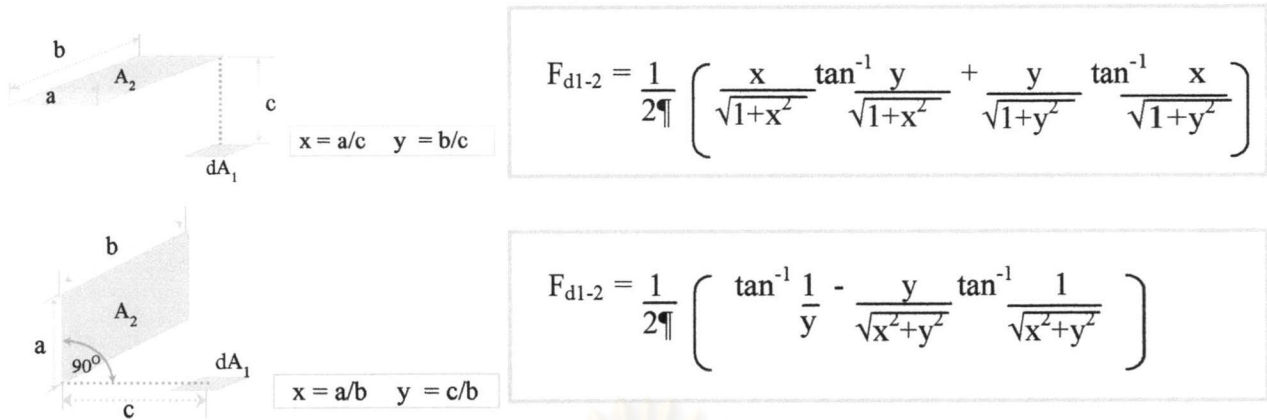
ค่า Area Factor สามารถคำนวณได้จากสมการที่แสดงในภาพที่ 2-3

การคำนวณหาค่า The Mean Radiant Temperature ( $t_r$ ) ได้จากสมการ :

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N}$$

โดย

$T_r$	อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบ	K
$T_N$	อุณหภูมิพื้นผิวของพื้นผิว N	K
$F_{p-N}$	Angle Factor ระหว่างผู้ใช้อาคารกับพื้นผิว N	



ภาพที่ 2-4 แสดงการคำนวณหาค่า Area Factor

**2.4.2 ดัชนีสถานะน่าสบาย Predicted Mean Vote (PMV) และ Predicted Percentage Dissatisfy (PPD)” โดย P.O.Fanger**

P.O.Fanger เป็นผู้ริเริ่มการพัฒนาดัชนีที่คาดการณ์ภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ โดยสามารถคำนวณได้จากความจริง ซึ่งมีการคิดค้นดัชนีที่เชื่อมโยงไปสู่สมการความสบาย 2 ดัชนี คือ

- Predicted Mean Vote (PMV)
- Predicted Percentage Dissatisfy (PPD)

P.O.Fanger มีแนวความคิดว่า ความรู้สึกทางอุณหภูมิของมนุษย์ขึ้นอยู่กับสถานะของร่างกาย มากกว่าผลจากสิ่งแวดล้อม สมการความสบายของ P.O.Fanger แสดงความสัมพันธ์ทางด้านอุณหภูมิ ระหว่างร่างกายมนุษย์กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการสังเกตในการทดลอง พบว่า “อุณหภูมิผิวของร่างกาย และการสูญเสียความร้อนจากการระเหย ภาวะน่าสบาย เป็นสัดส่วนโดยตรง กับอัตราการเผาผลาญพลังงานของร่างกาย”

เงื่อนไขประการสำคัญของภาวะน่าสบาย คือ ความพึงพอใจในสมดุลพลังงานของร่างกายมนุษย์ เช่น ความพอใจในเงื่อนไข S=0 เมื่อพิจารณาปัจจัยส่วนบุคคล และสภาพแวดล้อม ภาวะสมดุลทางร่างกายจะเกิดขึ้นเมื่อ

$F ( M, W, I_{cl}, t_{mrt}, t_{sk}, E_{sw} ) = 0$	①
$E_{sw} = 0.42 [(M-w)/A_{DU} - 58.15] (W)$	②
$t_{sk} = 35.7 - 0.0275(M-W)A_{DU} (°C)$	③

แต่เงื่อนไขส่วนบุคคล และสภาพแวดล้อมที่สอดคล้องดังสมการที่ (1)-(3) สำหรับกลุ่มคนเป็นไปได้ยาก ส่วนใหญ่อัตราการไหลของเหงื่อ และอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวของแต่ละบุคคลจะมีค่า

ใกล้เคียงกันแต่ไม่เท่ากันทั้งหมด ซึ่งในกรณีเช่นนี้ข้อสงสัยที่เกิดขึ้น คือ ความไม่สบายที่คนส่วนใหญ่จะรู้สึกนั้นจะเป็นอย่างไร

เพื่อตอบปัญหานี้ P.O.Fanger ได้เสนอ Comfort Index เรียกว่า “ Predicted Mean Vote (PMV)” ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้ทำนายค่ากลางของการลงคะแนนของกลุ่มคนขนาดใหญ่ โดยใช้มาตราส่วนความรู้สึกทางอุณหภูมิแบบ 7 จุด (Seven Point Thermal Sensation Scale) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & ( 0.352e^{-0.042(M/ADU)} + 0.032 ) [ (M/ADU)(1-\eta) - \\ & 0.35 [ 43 - 0.061 (M/ADU)( 1-\eta) - p_a ] - \\ & 0.42 [ (M/ADU)( 1-\eta) - 50 ] - 0.0023 (M/ADU)( 44-p_a) - \\ & 0.0014 (M/ADU)( 34-t_a) - \\ & 3.4 \cdot 10^{-8} f_{cl} [ (t_{cl}+273)^4 - (t_{mrt}+273)^4 ] - f_{cl} h_c (t_{cl}-t_a) ] \end{aligned}$$

ซึ่งดัชนี PMV สามารถประยุกต์ใช้ในการประมาณการได้เช่นกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพียงเล็กน้อย โดยมีเงื่อนไขของเวลาที่มีการถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยในแต่ละตัวแปร

#### Predicted Mean Vote (PMV)

เป็นการแสดงถึงความแตกต่างของอัตราการเผาผลาญพลังงานขณะนั้น กับสิ่งที่ร่างกายต้องการเพื่อรักษา “ความรู้สึกสบาย” โดยการคำนวณสมดุลทางด้านอุณหภูมิ หรือ เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงระดับความสบายของสถานที่นั้นๆ ว่ามีความเหมาะสมอยู่ในระดับที่ต้องการ หรือไม่ โดย PMV Scale มีทั้งหมด 7 จุดจาก -3 (หนาว) ถึง 3 (ร้อน) ซึ่งค่าที่ 0 (ศูนย์) แสดงถึงความเหมาะสมทางด้านความรู้สึกสบาย ( Thermal Neutral sensation )

แม้ว่าค่าดัชนี Predicted Mean Vote (PMV) มีค่าเป็น 0 (ศูนย์) แต่ยังคงมีคนที่รู้สึกไม่สบาย ณ ระดับอุณหภูมินั้นๆ เนื่องจากแต่ละบุคคลมีระดับสภาวะนำสบายแตกต่างกันเล็กน้อย แม้ว่าจะใส่เสื้อผ้า และกระทำกิจกรรมระดับเดียวกัน ซึ่งการคาดการณ์จำนวนบุคคลที่รู้สึกไม่สบายในสภาพแวดล้อมนั้นหาได้จาก Predicted Percentage Dissatisfy (PPD-index) ซึ่งใน PMV-index คนที่ออกเสียงในระดับ -3,-2,+2,+3 จะรู้สึกไม่สบาย

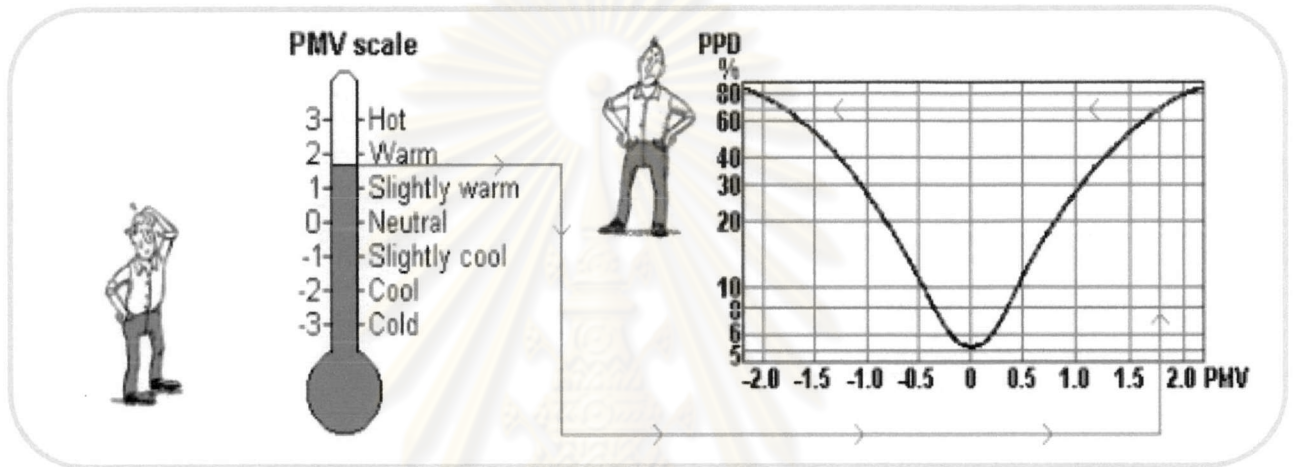
$$\text{PPD} = 100 - [95 \text{ EXP } \{-(0.0335 \text{ PMV}^4 + 0.2179 \text{ PMV}^2)\}]$$

### ความสัมพันธ์ระหว่าง PMV และ PPD

ความสัมพันธ์ของค่า PMV และ PPD ได้จากการVote ของคนจำนวน 1,296 คน ที่อยู่ในห้องทดลองเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยในการทดสอบนี้กำหนด :

- อุณหภูมิอากาศ (Ambient Temperature)
- ค่าความต้านทานเสื้อผ้า (Cloth-Value) 0.6 clo-value
- กิจกรรมที่เกิดขึ้น (Metabolic Rate) กิจกรรมนั่ง

โดยมีการเก็บข้อมูลทางด้านความรู้สึกทุกๆครึ่งชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้จากการเก็บข้อมูล และนำมาวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PMV และ PPD

#### 2.4.3 วิทยานิพนธ์ “ผลกระทบของสีผนัง และมวลสารภายในต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร”

โดย นายพรสวัสดิ์ พิริยะศรัทธา

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อ พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนัง ศึกษาผลกระทบของมวลสารภายในที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังสีเข้ม และอ่อน

ขั้นตอนการวิจัย กระทำการวิจัยโดยการทดลอง วัสดุทดสอบประกอบด้วย :

ผนังมวลสารมาก ผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 4 นิ้ว และ 8 นิ้ว

ผนังมวลสารน้อย ผนังโฟม โพลีสไตรีนหนา 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว

สีทาภายนอกอาคาร สีดำ เป็นตัวแทนสีเข้ม และสีขาวเป็นตัวแทนสีอ่อน

ดำเนินการทดลอง

โดยหันวัสดุทดสอบไปทางทิศใต้เพื่อให้ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากรังสีดวงอาทิตย์ยาวนานที่สุด



### ผลการวิจัย

พบว่าสีเข้ม และสีอ่อนของผนังจะมีอิทธิพลลดน้อยลงเมื่อใช้ผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ โดยผนังที่มีสีเข้ม และสีอ่อนจะมีอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมงใกล้เคียงกัน สำหรับผนังที่มีมวลสารน้อยจะมีค่าอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ยแตกต่างกันประมาณ 1 องศาเซลเซียส และผนังที่มีมวลสารมากจะมีค่าอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ยแตกต่างกันประมาณ 5 องศาเซลเซียส

ผนังที่มีมวลสารมากจะช่วยลดความรุนแรงของการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าผนังมวลสารน้อย ประมาณ 3 องศาเซลเซียส

มวลสารภายในช่วยลดอุณหภูมิอากาศภายในได้ โดยในช่วงกลางวันสามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในสำหรับผนังสีเข้ม ประมาณ 8 องศาเซลเซียส และ 5 องศาเซลเซียสสำหรับผนังสีอ่อน ในช่วงกลางคืนผนังที่มีมวลสารมากส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในสูงขึ้นประมาณ 5 องศาเซลเซียสสำหรับผนังสีเข้ม และ ประมาณ 4 องศาเซลเซียสสำหรับผนังสีอ่อน



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย