



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลากลางคืน (ตั้งแต่พระอาทิตย์ตก-พระอาทิตย์ขึ้น) จะเป็นเวลาที่สำคัญต่อการดึงน้ำในบรรยากาศทางธรรมชาติ การออกแบบและเลือกวัสดุหลังคาเพื่อใช้ประโยชน์จากน้ำค้างที่เกิดบนหลังคาและทำให้น้ำค้างไหลอย่างรวดเร็ว จะอาศัยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- หลักการคายรังสีความร้อน
- กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับท้องฟ้า
- คุณสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวหลังคา
- มวลสารของหลังคา
- มุมลาดเอียงของหลังคา
- สภาพท้องฟ้าและการคายรังสีของท้องฟ้า

### 2.1 การคายรังสีความร้อนกับการเกิดน้ำค้าง

#### 2.1.1 ความหมายของการคายรังสีความร้อน

การคายรังสีความร้อน (radiation heat transfer) เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุล (molecular vibrating energy) และถ่ายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<sup>1</sup>(electromagnetic wave) จากพื้นผิวหนึ่งไปสู่อีกพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ด้วยความเร็วแสง (speed of light: c) มีลักษณะสำคัญได้แก่

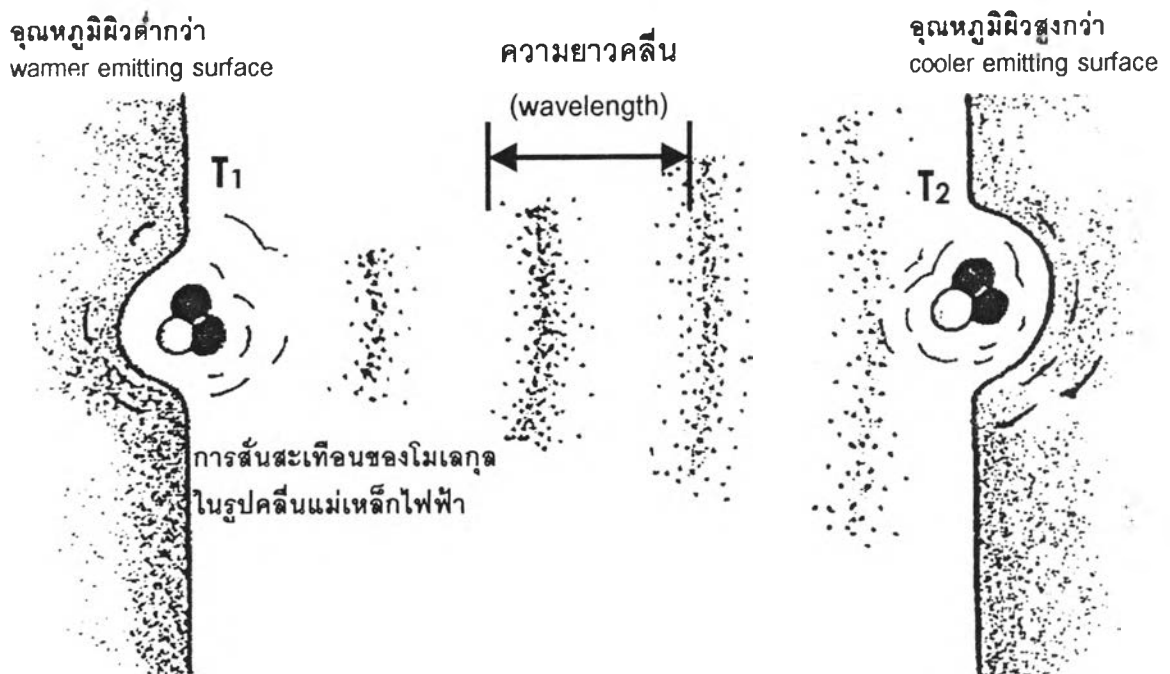
- ไม่ต้องอาศัยตัวกลางสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน (not require an intervening medium)
- ไม่มีทิศทางที่แน่นอน (independent of direction)

การคายรังสีจากวัตถุใดๆ สามารถอธิบายให้เห็นพฤติกรรมทางกายภาพโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ทำนายคุณสมบัติการคายรังสีของผิววัสดุได้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะปล่อยพลังงานออกทุก

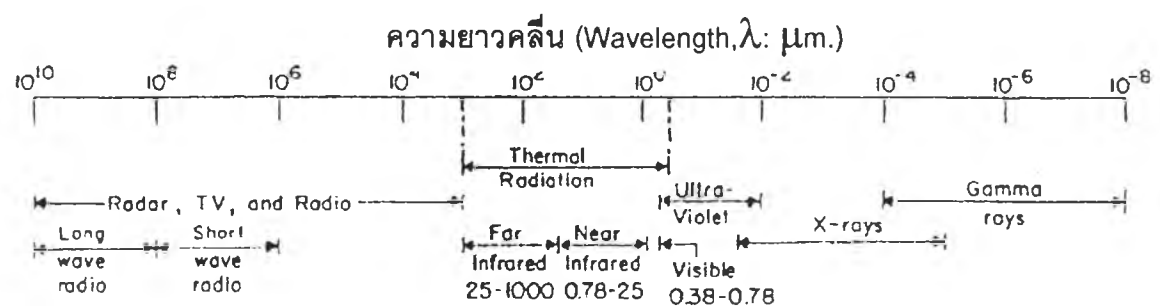
---

<sup>1</sup> ตามทฤษฎีของ Maxwell การคายรังสีสามารถพิจารณาถึงการสั่นสะเทือนของคลื่น (Wave Oscillating) อธิบายคุณลักษณะได้ด้วยควมยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และ ความถี่ (V) โดยที่  $c = \lambda V$  (อัตราของการคายรังสี ถ้าในสุญญากาศ  $c_0 = 2.9979 \cdot 10^8$  เมตรต่อวินาที

ความยาวคลื่น ( $\lambda = 0 - \infty$ ) โดยช่วงรังสีความร้อน (thermal radiation) เป็นช่วงหนึ่งในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1-100 ไมโครเมตรหรือไมครอน<sup>2</sup>



ภาพที่ 2-1 การถ่ายเทพลังงานโดยการคายรังสีระหว่างพื้นผิว 2 พื้นผิวที่มีอุณหภูมิผิวแตกต่างกัน เมื่อ  $T_1 > T_2$  โมเลกุลบนพื้นผิวจะมีการสั่นสะเทือนและเกิดการถ่ายเทพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ภาพปรับปรุงจาก Moore, 1993: 13)



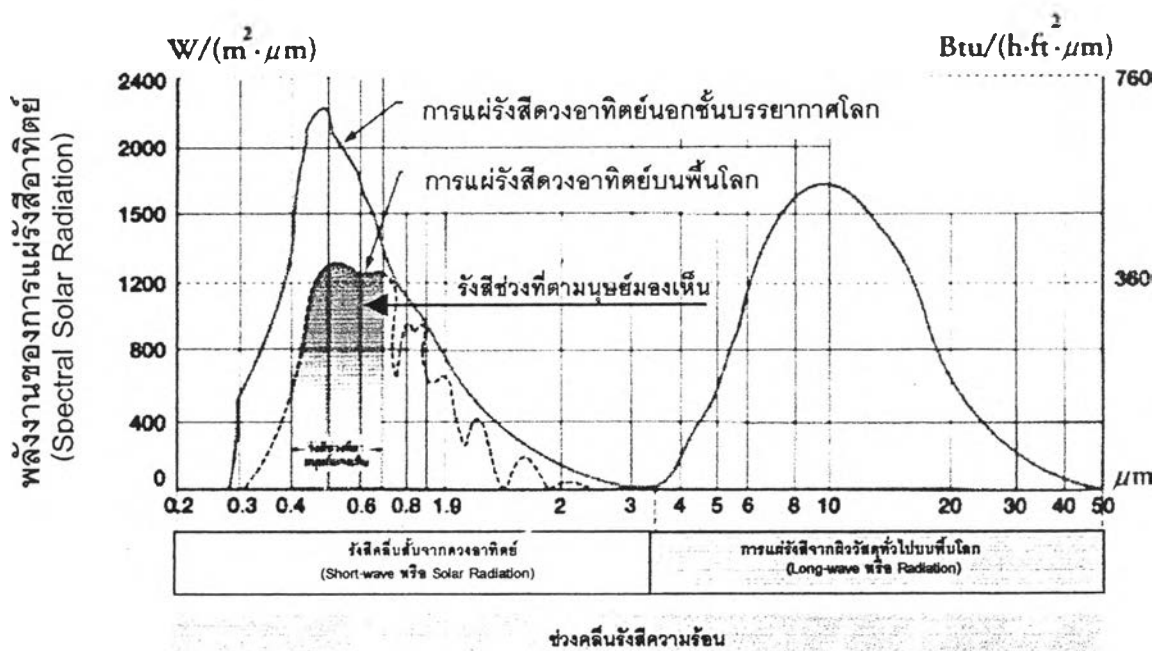
ภาพที่ 2-2 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (the electromagnetic wavelength spectrum) ภาพปรับปรุงจาก Kreith and Mark, 1962: 62

<sup>2</sup> หน่วยขนาดเล็กที่เรียกว่า "ไมครอน (Micron)" โดยที่ 1 ไมครอนหรือ 1  $\mu\text{m.} = 10^{-6}$  เมตร

## 2.1.2 ประเภทของรังสีความร้อน

ในแง่ของการออกแบบอาคารจะถือว่าผิววัสดุบนพื้นโลกมีอุณหภูมิสูงกว่า absolute zero ( $0^{\circ}\text{K}$ ,  $-460^{\circ}\text{F}$  หรือ  $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) ผิววัสดุสามารถถ่ายเทพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตลอดเวลา และสามารถแลกเปลี่ยนกันได้ไกลถึง 93 ล้านไมล์ ช่วงการคายรังสีความร้อนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ที่แตกต่างกันของความเข้มและความยาวคลื่น อันได้แก่

- รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือรังสีคลื่นสั้น (solar radiation หรือ short-wave radiation)
- รังสีความร้อนจากผิววัสดุบนพื้นโลกหรือรังสีคลื่นยาว (terrestrial radiation หรือ long-wave radiation)



ความยาวคลื่น (Wavelength,  $\lambda$ :  $\mu\text{m}$ .)

ภาพที่ 2-3 แสดงองค์ประกอบของช่วงความยาวคลื่นของการคายรังสีความร้อนที่ประกอบด้วย รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์และรังสีความร้อนจากผิววัสดุบนพื้นโลก (ภาพปรับปรุงจากการใช้กระจก, 2543: 10)

### 2.1.2.1 รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์

การคายรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3-3 $\mu\text{m}$ . ดังภาพที่ 2-3 รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ส่องยังโลกประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบของรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์

รังสีจากดวงอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น	สัดส่วนของพลังงานจากดวงอาทิตย์
1. รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV)	0.20 - 0.38 $\mu\text{m}$ .	9%
2. แสงที่มองเห็นได้ (Visible light)	0.38 - 0.78 $\mu\text{m}$	38%
3. รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near infrared ray; NIR)	0.78 - 3.0 $\mu\text{m}$ .	53%

### 2.1.2.2 การคายรังสีความร้อนจากผิววัตถุทั่วไปบนพื้นโลก

"Long-wave Radiation is radiation originating from sources at temperature near ordinary ambient temperature and thus substantially all at wavelengths greater than 3  $\mu\text{m}$ . Long-wave radiation is emitted by the atmosphere, by a collector, or by any other body at ordinary temperature." (Duffie and Beckman, 1991:47)

คำจำกัดความข้างต้นจะเห็นว่า เมื่อรังสีคลื่นสั้นกระทบลงบนผิววัตถุแล้วจะคายรังสีคลื่นยาวออกมาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 3  $\mu\text{m}$ . ขึ้นไปดังภาพที่ 3 เรียกอีกอย่างว่า "การคายรังสีรังสีคลื่นยาว (Long-wave Radiation หรือ Terrestrial Radiation)" โดยจะเกิดขึ้นทุกๆ ผิววัตถุบนโลกได้แก่ อาคาร, คน, ยานพาหนะ หรือแม้กระทั่งบรรยากาศ ทั้งนี้รังสีคลื่นยาวจะไม่สามารถทะลุผ่านกระจกใสได้และมีคุณสมบัติในการสะท้อนที่ดีกับวัสดุที่มีผิวเรียบและมันเงา (Gieger, 1965 อ้างใน ศุภกิจ ยิ้มสรรพล, 2540: 13)

### 2.1.3 การคายรังสีความร้อนของพื้นผิว

เมื่อวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous body) ได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ จะมีการดูดซับ (absorption:  $\alpha$ ) การสะท้อนกลับ (reflection:  $\rho$ ) และการส่งผ่าน (transmission:  $\tau$ ) รังสีพลังงานที่ความยาวคลื่น ผลรวมของรังสีเท่ากับ 1 ดังสมการ

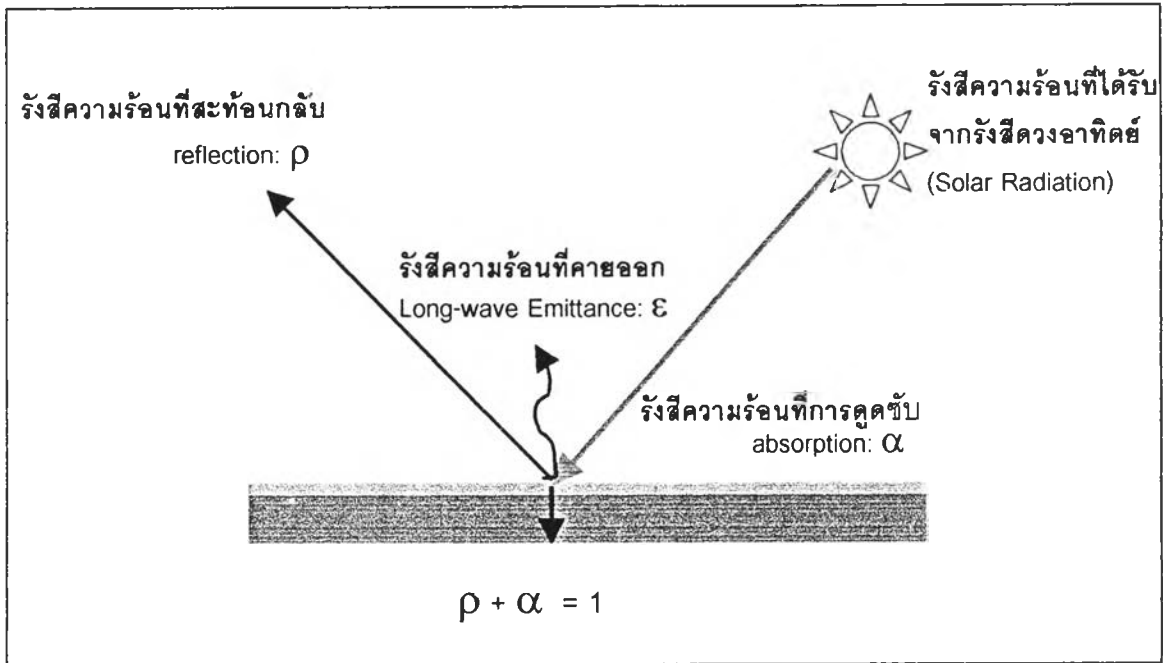
$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

ตัวอย่างเช่น เมื่อวัตถุทึบแสง<sup>3</sup> (opaque body) ได้รับรังสีความร้อนจนมีอุณหภูมิถึงจุดหนึ่ง โดยรังสีที่ถูกดูดซับ (solar absorptance) ส่วนหนึ่งจะแปลงเป็นพลังงานความร้อนและมีการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้น ความร้อนที่เติมเข้าไปจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นบางส่วนจะคายรังสีคลื่นยาว (long-wave emittance) ออกผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นผลจากการเปล่งรังสีที่ระดับความลึกใกล้ผิวเท่านั้น เรียกว่า "Surface phenomenon" เช่น ความลึกจากผิว 1  $\mu\text{m}$ . ได้แก่ โลหะ, ไม้, และ หิน (มนตรี อึ้งเจริญ, 2540) ฉะนั้นผลรวมรังสีความร้อนของวัตถุทึบแสงดังสมการ

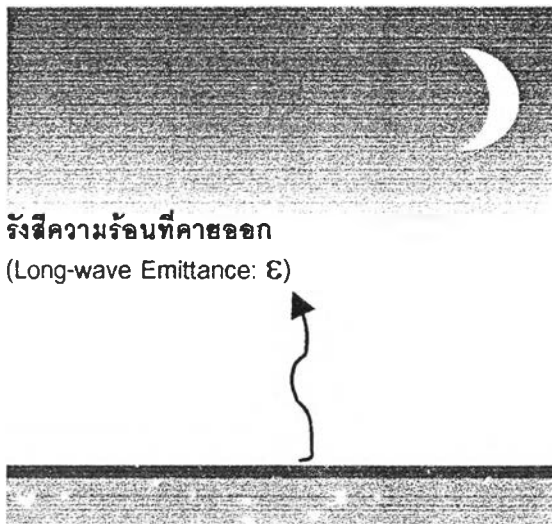
$$\rho + \alpha = 1$$

เมื่อโลกไม่ได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์แล้ว ความร้อนบนผิววัสดุบนพื้นโลกจะส่งพลังงานกลับยังท้องฟ้า เพื่อรักษาสมดุลทางอุณหภูมิของโลกและบรรยากาศ ฉะนั้นการคายรังสีคลื่นยาวที่ออกจากผิววัสดุบนโลกจึงมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการสูญเสียความร้อนของพื้นผิวกับท้องฟ้าในเวลากลางคืน ทั้งนี้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการคายรังสีความร้อนออกจากพื้นผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้มีผลทำให้อุณหภูมิมืดหลังคาลดต่ำลง จนถึงจุดน้ำค้าง (Dew Point) เกิดหยดน้ำเกาะอยู่บนพื้นผิวหลังคาได้ ดังภาพที่ 2-4

<sup>3</sup> วัตถุที่มีความสามารถดูดกลืนและสะท้อนกลับพลังงานจากการได้รับรังสีโดยไม่มีการส่งผ่าน (มนตรี อึ้งเจริญ, 2540; 7)



ภาพที่ 2-4 แสดงการดูดซับ การสะท้อนกลับ และการคายความร้อนออกบนพื้นผิวของวัตถุทึบแสง เมื่อได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์



ผิววัสดุบนพื้นโลกคายความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน



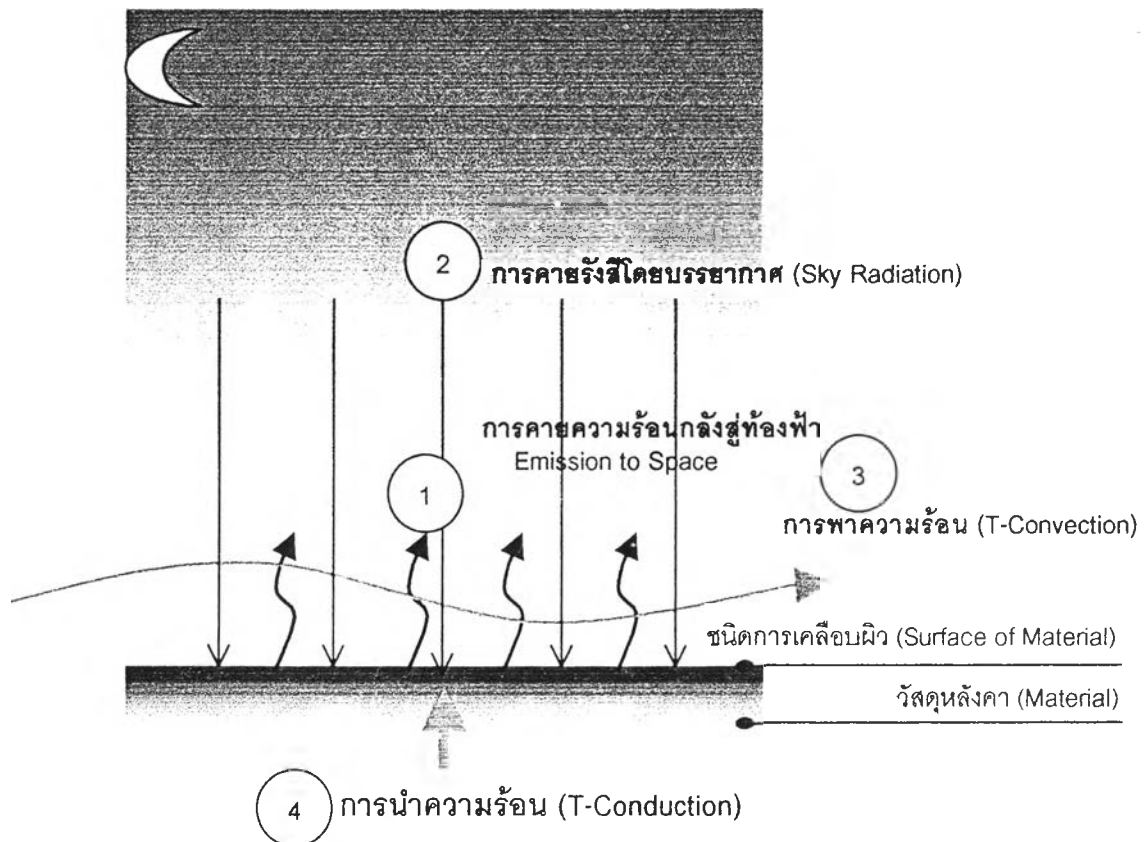
ผิววัสดุบนพื้นโลกคายความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน จนมีอุณหภูมิผิวลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

ภาพที่ 2-5 แสดงการคายรังสีความร้อนบนผิววัสดุบนพื้นโลกกลับสู่ท้องฟ้า

## 2.2. กระบวนการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าในตอนกลางคืน

การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าในตอนกลางคืนหรือที่เรียกว่า "radiative cooling" เป็นการคายความร้อนออกจากผิววัสดุบนพื้นโลกด้วยวิธีการทางธรรมชาติ (method of rejects heat) กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยการคายรังสีคลื่นยาวกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน ทำให้ผิววัสดุบนโลก เช่น ผิวอาคาร มีอุณหภูมิลดลง (to cool the building) กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อระบบการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิและความร้อน ได้แก่

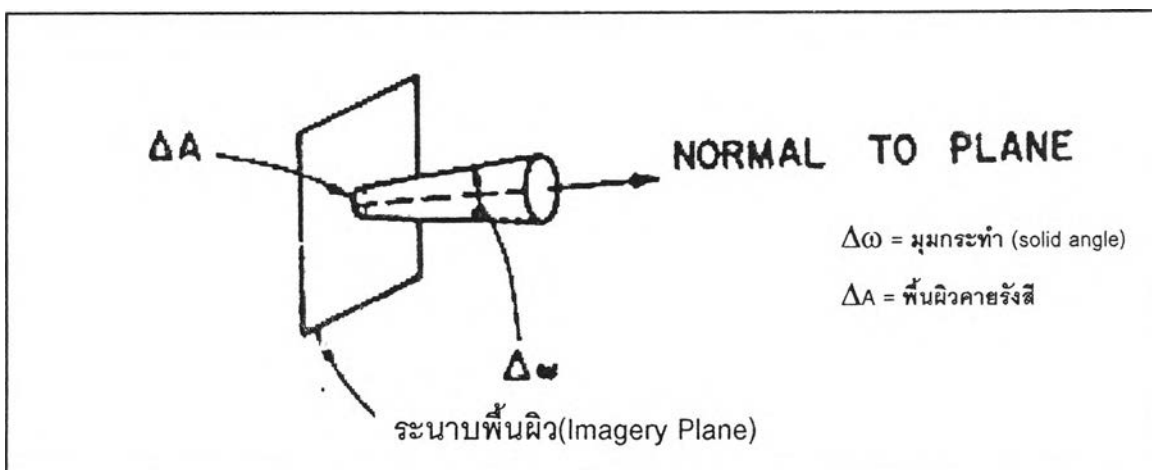
1. การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการคายรังสีคลื่นยาวของผิวหลังคา (material' s surface emissivity)
2. การคายรังสีโดยบรรยากาศ (sky radiation) และดูดซับของผิวหลังคา
3. การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการพา (heat convection) ระหว่างผิวหลังคา กับลมที่พัดผ่าน
4. การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการนำ (heat conduction) ระหว่างผิวหลังคาด้านบนและด้านล่าง



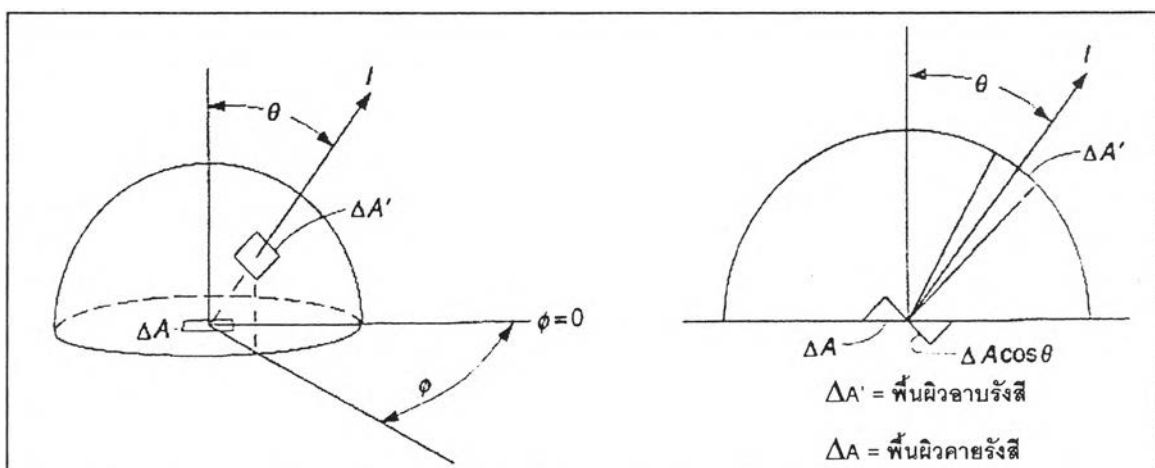
ภาพที่ 2 - 6 กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อการคายรังสีความร้อนในเวลากลางคืน (Radiative cooling)

### 2.2.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการคายรังสีคลื่นยาวของผิวหลังคา

รังสีคลื่นยาวที่ออกจากผิววัสดุมีลักษณะกระจายออกไป พลังงานจากการคายรังสีวัดด้วยปริมาณพลังงานที่คายออกจากระนาบพื้นผิว (Imaginary Plane) ต่อหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา ต่อหน่วยมุมกระทำ (Solid Angle) ของทิศทางตั้งฉากกับศูนย์กลางระนาบ ซึ่งเรียกว่า "ความเข้มของการคายรังสี (Radiation Intensity)" ดังภาพที่ 2-7 และปริมาณพลังงานที่คายออกจากระนาบพื้นผิว (Imaginary Plane) ต่อหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา ต่อหน่วยมุมกระทำ (Solid Angle) จากทุกทิศทางบนด้านใดด้านหนึ่งของระนาบ เรียกว่า "อัตราของการคายรังสี (Radiation Flux)" ทั้งสองคิดเป็นหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร ( $\text{watt/m}^2$ ) หรือ บีทียูต่อตารางฟุต ( $\text{Btu/ft}^2$ ) ดังภาพที่ 2-8

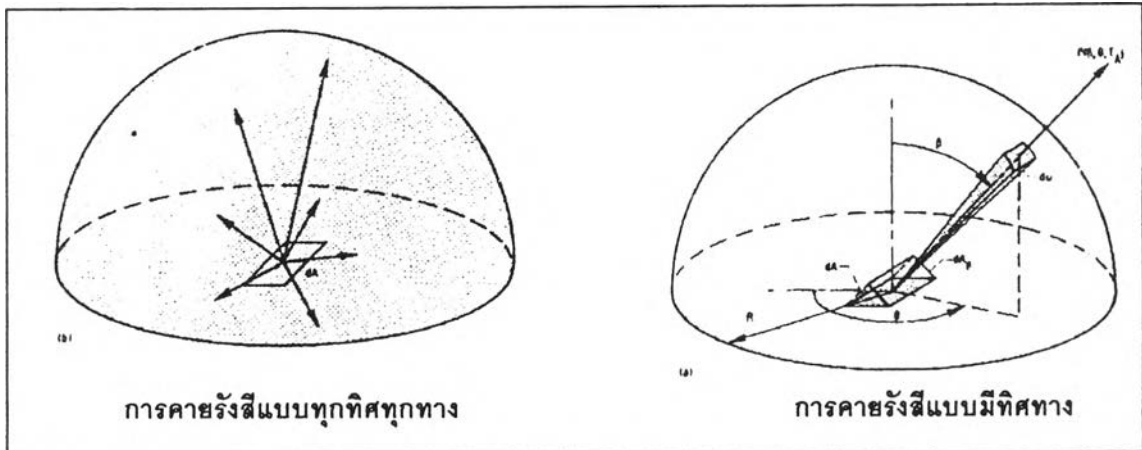


ภาพที่ 2 - 7 แสดงความเข้มของการคายรังสี (schematic of radiation intensity) ที่มา: Beckman, 1991: 154



ภาพที่ 2 - 8 แสดงอัตราของการคายรังสี (schematic of radiation flux) ที่มา: Beckman, 1991: 15





ภาพที่ 2 - 9 ลักษณะการคายรังสีออกจากวัตถุ (ที่มา: Siegel, 1972: 43)

การคายรังสีความร้อนจากวัตถุส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น ปริมาณพลังงานการคายรังสีจากวัตถุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็นองศาเคลวิน ยกกำลังสี่ สำหรับวัตถุที่การคายรังสีได้อย่างสมบูรณ์หรือที่เรียกว่า “วัตถุดำ” (Blackbody) ตามกฎของ Stefan – Boltzman แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัตถุนิดนี้ ดังนั้นพลังงานการคายรังสีจากวัตถุโดยทั่วไป (วัตถุจริง) จะมีค่าน้อยกว่าวัตถุดำเสมอที่อุณหภูมิเดียวกันดังสมการ

พลังงานการคายรังสีจากวัตถุดำ

$$E_{\text{Blackbody}} = \sigma T_r^4$$

(radiant energy of blackbody)

พลังงานการคายรังสีจากพื้นผิววัตถุจริง

$$E_{\text{emit}} = \epsilon \sigma T_r^4$$

(radiant energy of actual surface)

การคายความร้อนเกิดจากในลักษณะการกระจายตัวสม่ำเสมอออกไปทั่วทุกทิศทางรอบพื้นผิว จึงเกิดความสัมพันธ์ในทางเรขาคณิตศาสตร์ระบุว่าพื้นผิวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ดังนั้น พลังงานการคายรังสีระหว่างพื้นผิวทั่วไป (Beckman, 1991: 156)

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \epsilon_i \epsilon_j A_i F_{ij} \sigma (T_j^4 - T_i^4)$$

<sup>4</sup> ในสเกลเคลวิน ศูนย์สัมบูรณ์เป็นอุณหภูมิเชิงทฤษฎี คืออุณหภูมิทุกโมเลกุลจะหยุดเคลื่อนที่ โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ -273°C หรือ -460°F

<sup>5</sup> วัตถุดำ หรือ Blackbody (perfect emitted = 1) เป็นวัตถุดำคติเพื่อใช้เปรียบเทียบความสามารถคายรังสีของพื้นผิว ได้ทุกความยาวคลื่น ในอุณหภูมิเดียวกัน

สรุปได้ว่า พลังงานจากการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยคายรังสีระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีผลต่อการเกิดน้ำค้าง จะได้สัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวท้องฟ้ากับพื้นที่หลังคามีค่าเข้าใกล้ 0 ( $A / A_2 \rightarrow 0$ ) จากสมการข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์หาพลังงานจากการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างแผ่นหลังคา กับท้องฟ้าได้คือ

	$Q_{emit}$	=	$\epsilon_r \cdot \sigma \cdot F \cdot A \cdot (T_{หลังคา} - T_{ท้องฟ้า})^4$
โดยที่	$\sigma$	=	ค่าคงที่ Stefan-Boltzman
		=	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ k}^{-4}$ หรือ $0.17 \cdot 10^{-8} \text{ btu/ft}^2 \text{ hR}^4$
	$\epsilon_r$	=	ค่าการคายรังสีของพื้นผิววัสดุ
	A	=	พื้นที่ผิววัสดุ
	$T_{หลังคา} - T_{ท้องฟ้า}$	=	อุณหภูมิผิวระหว่าง 2 พื้นผิว (surface temperature) ในกรณีนี้คือ อุณหภูมิผิวหลังคา กับอุณหภูมิท้องฟ้า
	F	=	มุมที่เปิดสู่ท้องฟ้า (angle factor หรือ shape factor)
		=	$\frac{1}{2} (1 + \cos\beta)$

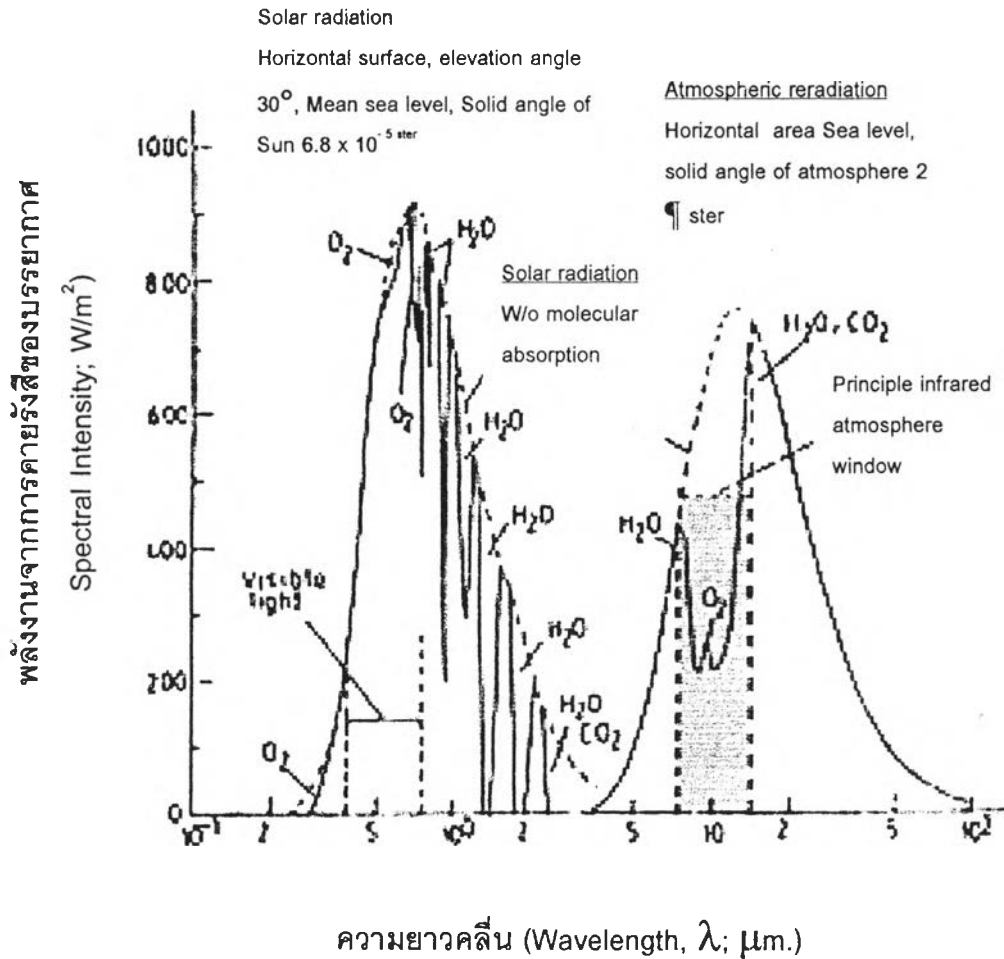
## 2.2.2 การคายรังสีโดยบรรยากาศ

บรรยากาศเป็นส่วนผสมของก๊าซต่างๆ ไอน้ำ และฝุ่นละออง เมื่อบรรยากาศได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือจากผิวโลก โมเลกุลของก๊าซและฝุ่นละอองต่างๆจะมีปฏิกิริยาต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยการส่องผ่าน การสะท้อนกลับ และการดูดกลืน ซึ่งมีผลทำให้บรรยากาศมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (non-uniform temperature) อีกทั้งบรรยากาศยังเป็นตัวการสำคัญต่อการดูดซับรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ ) และคายรังสีคลื่นยาว ( $\lambda \geq 3 \mu\text{m}$ ) ด้วย โดยมีทิศทางที่ไม่แน่นอน (non-spectral hemispherical) เช่น

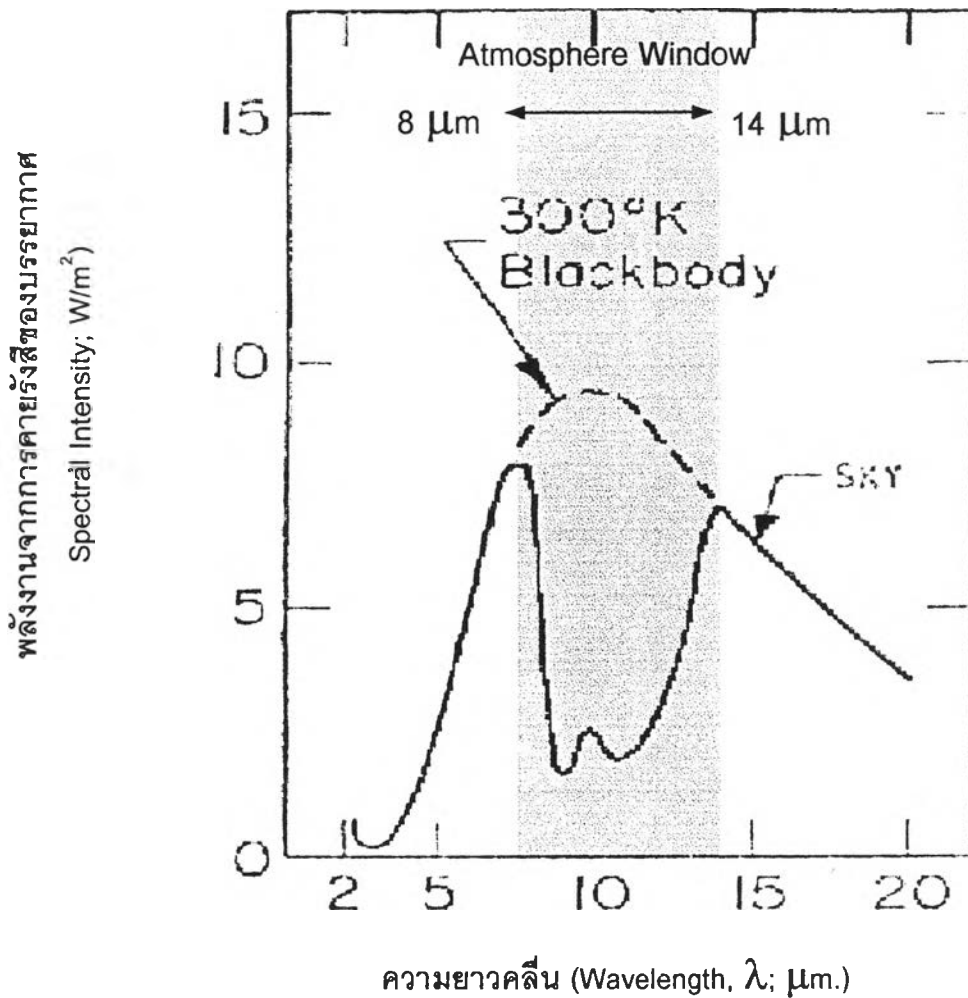
- ไอน้ำ จะคายและดูดซับรังสีความร้อนได้มากในช่วงความยาว 6.6 และ  $18 \mu\text{m}$ .
- ก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะคายและดูดซับรังสีความร้อนได้มากในความยาวคลื่น  $15 \mu\text{m}$ .

การคายรังสีของท้องฟ้าหรือบรรยากาศ (sky radiation) สำหรับวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสจะคายรังสีเสมือนกับ blackbody ที่อุณหภูมิอากาศหนึ่ง ท้องฟ้าสามารถดูดซับและคายรังสีความร้อนได้ทุกช่วงคลื่นความร้อน (infrared หรือ thermal radiation) ยกเว้นในช่วงความยาวคลื่น 8-14  $\mu\text{m}$ . จะมีปริมาณพลังงานจากการคายรังสีคลื่นยาวต่ำ (Kruskopf 1980: 4) เรียกช่วงความยาวคลื่นนี้ว่า

"atmospheric window" ความยาวคลื่นในช่วงนี้จะทำให้ผิวหลังคาสามารถแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับ  
อวกาศได้มากที่สุด ดังแผนภูมิที่ 2 - 1



แผนภูมิที่ 2-1 แสดงการดูดซับและคายรังสีความร้อนของบรรยากาศในช่วงรังสีความร้อน และเรียกช่วง  
ความยาวคลื่น 8-14  $\mu m.$  ว่า atmospheric window (Finger, et al, 1979 อ้างใน Bansal and Hauser, 1994: 23)

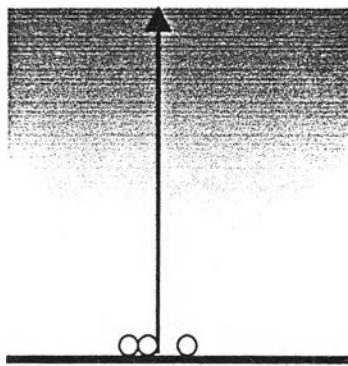


แผนภูมิที่ 2-2 พลังงานจากการคายรังสีคลื่นยาวของท้องฟ้าในเชิงสเปกตรัม สำหรับวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส (clear sky) โดยวัดในจุดที่ตรงกับศีรษะที่อุณหภูมิ 300°K (ภาพดัดแปลงจาก Kruskopf et al, 1980: 53)

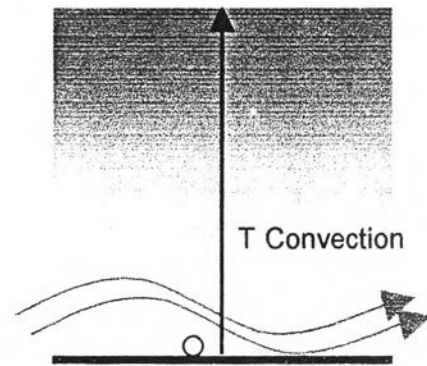
เมื่อมีไอน้ำในบรรยากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การคายรังสีโดยบรรยากาศลงสู่โลกเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากไอน้ำที่ก่อตัวเป็นเมฆในระดับต่ำจะคายรังสีคลื่นยาวตลอดความยาวคลื่น ถ้าท้องฟ้าที่ครึ้มฝนปรากฏการณ์นี้จะหายไป ดังนั้นเมฆและปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะเป็นตัวเพิ่มและลดการดูดซับรังสีความร้อน การคายรังสีความร้อนโดยบรรยากาศมายังโลกเรียกกันว่า "atmospheric back radiation" มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 3 – 8  $\mu\text{m}$ . และ 14  $\mu\text{m}$ . ขึ้นไป (Givoni, 1982:133-134) ฉะนั้น ไอน้ำในบรรยากาศเป็นสิ่งสำคัญที่สุดต่อการคายรังสีคลื่นยาวของโลกกลับสู่ท้องฟ้า แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยและมีการจับตัวอยู่ในระดับไม่เกิน 4-5 ไมล์ก็ตาม แต่เมื่อไอน้ำก่อตัวเป็นเมฆจะเป็นตัวสกัดกั้นรังสีความร้อนจากผิววัสดุบนโลกกลับสู่ท้องฟ้า (อุณหภูมิของเมฆสูงกว่าอุณหภูมิท้องฟ้า) ทำให้ผิววัสดุนั้นไม่สามารถแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าได้เต็มที่

### 2.2.3 การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิด้วยการพาความร้อนระหว่างผิวหลังคากับลมที่พัดผ่าน

ลมที่พัดผ่านเกิดจากการหมุนเวียนของบรรยากาศในแนวระนาบตามผิวโลก ลมมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของผิวหลังคากับท้องฟ้า ความเร็วลมเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้เกิดหรือไม่เกิดน้ำค้างก็ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าลมสงบ (ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) การกระจายความร้อนจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอากาศนี้จะเป็นเสมือนฉนวนความร้อน (ค่าความต้านทานความร้อน  $R = 0.62$ ) ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับท้องฟ้ามากกว่า ดังนั้น อากาศใกล้ผิวหลังคาเย็นลงจนถึงจุดน้ำค้างได้ ในขณะที่ถ้ามีลมแรงพัดผ่าน อากาศบริเวณพื้นโลกจะอยู่ไม่นานพอที่จะเย็นลงได้ และเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศมากกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนกับท้องฟ้า และเมื่อเกิดน้ำค้างบนผิวหลังคาแล้ว ลมที่พัดผ่านจะทำให้ น้ำค้างระเหยไป



ลมสงบ (Still air)  $R = 0.62$



ลมแรง (Moving air)  $R = 0.25$

ภาพที่ 2 - 10 เปรียบเทียบความเร็วลมที่พัดผ่านกับลมสงบ (อากาศนิ่ง) ต่อการปริมาณน้ำค้าง

ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิของผิววัสดุหลังคาสูงกว่าอากาศเกือบตลอดคืน ความเร็วลมจะช่วยแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิววัสดุหลังคาได้ ซึ่งในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การพา (convection coefficient) และอัตราความเร็วลมใกล้กับผิววัสดุหลังคา เป็นสัดส่วนความต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุหลังคา กับอากาศ ดังนั้น ต้องระวังอิทธิพลของลมร้อนนอกเสียจากว่าจะเป็นลมเย็น การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการพาสามารถคำนวณได้จากสมการ (Givoni, 1994: 92)

$$Q_{\text{convection}} = h_c (T_r - T_a)$$

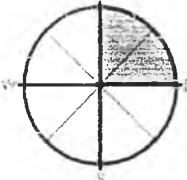
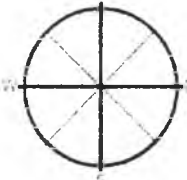
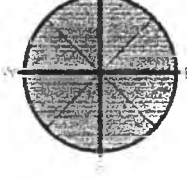
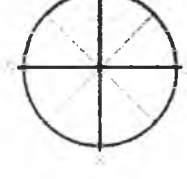
โดยที่:  $T_r$  คือ อุณหภูมิผิว

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ

$h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพา ในกรณีที่เปิดตู้ห้องฟ้า  $h_c = 0.6 + 0.35 \cdot (V)^{0.5}$

จากสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครช่วงปี 2538 สามารถแบ่งกลุ่มของลมและทิศทางของลมเป็น 4 กลุ่ม (สุนทร บุญญาธิการ, 2542: 41-55) เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาดังตั้ง 18.00 น. ถึง 6.00 น. สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงกลุ่มอิทธิพลของลมและอากาศในช่วงเวลากลางคืนของประเทศไทย

เดือน	ความเร็วลมที่พัดผ่านในช่วงเวลากลางคืน (18.00-6.00น.)	ทิศทางลมในช่วงเวลากลางคืน	
มกราคม – กุมภาพันธ์ (ฤดูหนาว)	2 - 7.5 กิโลเมตร/ชั่วโมง		พัดจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (กระแสลมร้อน) จากตะวันออกเฉียงเหนือ (กระแสลมหนาว)
มีนาคม – มิถุนายน (ฤดูร้อน)	2 - 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง		พัดจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (กระแสลมร้อน)
กรกฎาคม – ตุลาคม (ฤดูฝน)	1 - 4 กิโลเมตร/ชั่วโมง		พัดจากทุกทิศทุกทาง
พฤศจิกายน – ธันวาคม (ฤดูหนาว)	2 - 3 กิโลเมตร/ชั่วโมง		พัดจากทิศเหนือ ตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือ (กระแสลมหนาว)



กระแสลมหนาว



กระแสลมร้อน

จากตารางจะเห็นว่า ลักษณะลมในช่วงกลางคืนส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครอยู่ในเกณฑ์ที่เรียกว่า "ลมสงบ - ลมเจือยเบา" ซึ่งสามารถสังเกตได้ตามมาตรฐานลมโบฟอร์ต<sup>6</sup> (เจริญ เจริญรัชต์ภาคย์, 2536: 35-36) สรุปได้ตามตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 การสังเกตลักษณะลมในช่วงเวลากลางคืนตามมาตรฐานลมโบฟอร์ต

กำลังโบฟอร์ต	ความเร็วลม		ลักษณะลม	การสังเกตลม
	นอต	กม/ชม.		
0	น้อยกว่า 1	น้อยกว่า 2	ลมสงบ (calm)	ลมเงียบ ควันลอยขึ้นตรง
1	1-3	2-6	ลมเบา (light air)	ควันลอยตามลม แต่ศรีไม่หันไปทางทิศลม
2	4-6	7-11	ลมเจือยเบา (light breeze)	รู้สึกลมที่พัดผิวน้ำ ใบไม้กระดิก ครลมหันไปตามลม
3	7-10	12-19	ลมเจือย (gentle breeze)	ใบไม้และกิ่งไม้เล็กๆขยับเขยื้อน ธงปลิว
4	11-16	20-30	ลมเจือยปานกลาง (moderate breeze)	มีฝุ่นพัดตลบ กระจดาชปลิว กิ่งไม้เล็กเคลื่อนไหว

การศึกษาอิทธิพลของทิศทางลมและความเร็วลมที่พัดผ่านหลังคา โดยทดลองวัดปริมาณน้ำค้างตามการวางทิศทางที่ต่างกัน พบว่าทิศทางลมเป็นอีกอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดน้ำค้างบนผิวหลังคา ดังภาพที่ 2 - 11



ภาพที่ 2 - 11 สมมติฐานการเกิดปริมาณน้ำค้างจากแผ่นทดลองที่วางทิศทางแตกต่างกัน

<sup>6</sup> มาตรฐานสำหรับคาดคะเนความเร็วลมไว้ใช้เดินเรือ (Beaufort Wind Scale) แบ่งออกเป็น 13 ชั้นคือ ตั้งแต่ 0 - 12 พัฒนาระดับเมื่อ 2348 โดยพลเรือเอก เซอร์ ฟรานซิส โบฟอร์ค (เจริญ เจริญรัชต์ภาคย์, 2536: 35-36 )

## 2.2.4 การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิด้วยการนำความร้อนระหว่างผิวหลังคาด้านบนและด้านล่าง

การสังเกตน้ำค้างบนผิวใบไม้หรือใบหญ้า พบว่า ใบไม้ด้านบนจะมีหยดน้ำมากกว่าใบไม้ที่อยู่ด้านล่าง ทั้งนี้ในตอนกลางคืนที่วัสดุบนพื้นโลกจะคายรังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า อากาศและกลุ่มใบไม้บริเวณด้านล่างจะทำหน้าที่เสมือนฉนวนกันความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นดิน ทำให้ผิวใบที่เกิดน้ำค้างคายรังสีความร้อนได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ถ้าพิจารณาลักษณะผิวด้านล่างของใบไม้หรือใบหญ้าบางชนิด จะเห็นว่า มีขนเล็กๆจำนวนมาก อากาศภายในจะเสมือนเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับผิวไม้ได้อีกทางหนึ่ง ทำให้อุณหภูมิผิวใบด้านบนลดต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้าง

เมื่อผิวด้านบนหลังคามีอุณหภูมิต่ำลง อุณหภูมิด้านล่างหลังคาซึ่งสูงกว่าจะถ่ายเทความร้อนยังผิวด้านบน ทำให้ผิวด้านบนหลังคาไม่สามารถมีอุณหภูมิต่ำจนถึงจุดน้ำค้างได้ จึงควรป้องกัน การนำความร้อนจากด้านล่างหลังคาด้วยการใส่ฉนวนกันความร้อน การนำความร้อนจากผิวด้านล่างสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{conduction}} = \frac{K(T_a - T_f)L}{L}$$

โดยที่:  $T_f$  คือ อุณหภูมิผิว

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ

$K$  คือ สัมประสิทธิ์ การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

$L$  คือ ความหนาของฉนวนกันความร้อน (m)

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดของหลังคาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิวและความสามารถคายความร้อนของผิวหลังคานั้นๆ ฉะนั้น การสูญเสียพลังงานความร้อนสุทธิเพื่อให้ผิวหลังคามีอุณหภูมิต่ำที่สุด จะต้องให้ผิวหลังคาคายความร้อนกลับสู่ท้องฟ้ามากที่สุด และรับความร้อนจากลมที่พัดผ่านและการนำความร้อนจากด้านล่างหลังคาน้อยที่สุด จากความสมดุลทางพลังงานจะได้



$$\begin{array}{l}
 E_{\text{INPUT}} = E_{\text{OUTPUT}} \\
 Q_{\text{CONDUCT+CONVEC.}} = Q_{\text{RADIATION}} \\
 \boxed{h_c (T_r - T_a) + \frac{K}{L} (T_a - T_r) = \epsilon_r \sigma F A (T_r - T_2)^4} \\
 \text{Minimized} \qquad \qquad \qquad \text{Maximized}
 \end{array}$$

จากสมการข้างต้นเพื่อให้อุณหภูมิผิวหลังคาต่ำสุดจนถึงจุดน้ำค้างสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าการคายรังสีความร้อนจากผิวหลังคามากที่สุด
- มุมที่เปิดสู่ท้องฟ้ามากที่สุด
- ลมบริเวณใกล้ผิวหลังคาควรเป็นลมที่ค่อนข้างสงบ ซึ่งมีความเร็วลมประมาณ 0 - 1 กิโลเมตร/ชั่วโมง
- การป้องกันการนำความร้อนจากด้านล่างหลังคาให้น้อยที่สุด

## 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของผิวหลังคากับการเกิดน้ำค้าง

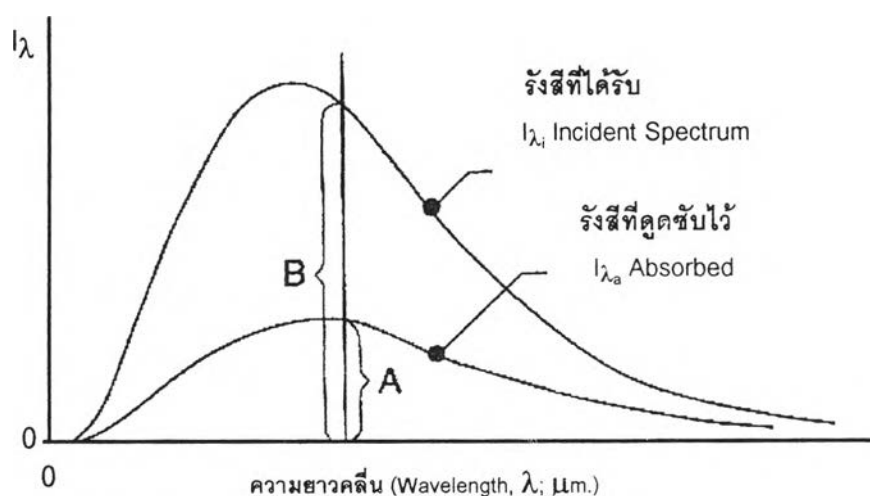
หลังคาที่ทำจากวัสดุต่างๆจะมีอุณหภูมิผิวลดลงกว่าจุดน้ำค้างได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันไป โดยพิจารณาความสมารถทำให้เกิดน้ำค้างและทำให้น้ำค้างไหลอย่างรวดเร็ว อันได้แก่

- ค่าการดูดซับรังสีความร้อน
- ค่าการคายรังสีความร้อน
- ชนิดของผิววัสดุหลังคา
- สภาพผิวของวัสดุหลังคา
- การเลือกการคายรังสีความร้อนของผิวหลังคา

### 2.3.1 ค่าการดูดซับรังสีความร้อน

การดูดซับรังสีความร้อน (solar absorbtance:  $\alpha$ ) เป็นความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ของวัสดุ ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3 -3 ไมครอน การพิจารณาถึงค่าการดูดซับรังสีของผิววัสดุหลังคาจะหาได้จาก สัดส่วนของรังสีที่ดูดซับเทียบกับรังสีความร้อนที่ได้รับในทุกความยาวคลื่น ดังสมการ

$$\alpha = \frac{\text{รังสีที่ดูดซับไว้ (Adsorbed radiation)}}{\text{รังสีที่ได้รับ (Incident radiation)}} = \frac{A}{B}$$

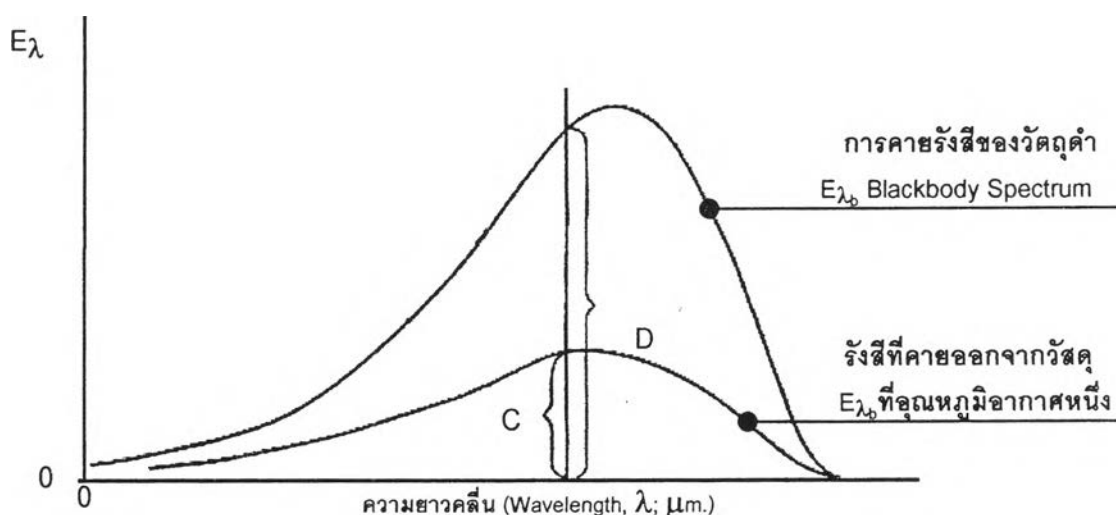


ภาพที่ 2-12 แสดงการกระจายของการดูดซับรังสีความร้อนของผิววัสดุ ในทุกความยาวคลื่น (distribution of absorbed radiation)

### 2.3.2 ค่าการคายรังสีความร้อน

การคายรังสีความร้อน (long-wave emittance:  $\epsilon$ ) เป็นความสามารถในการคายรังสีในช่วงคลื่นยาวของวัสดุ ตั้งแต่ 3 ไมครอนขึ้นไป ความสามารถในการปล่อยพลังงานนี้จะหาได้จากสัดส่วนของการคายรังสีความร้อนของพื้นผิวใดๆ เทียบกับการคายรังสีของวัตถุดำ<sup>7</sup> ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ดังสมการตามกฎของ Planck ซึ่งผิววัสดุจะปล่อยรังสีความร้อนออก ทุกๆความยาวคลื่น (Total Emissivity) หรือช่วงความยาวคลื่น (Spectral Emissivity) ซึ่งมีค่าการคายรังสีตั้งแต่ 0.0 (no Emissivity possible) ถึง 1.0 (ideal maximum-a" blackbody")

$$\epsilon = \frac{\text{รังสีที่คายออกจากพื้นผิวใดๆ (Radiation from surface)}}{\text{รังสีที่คายออกของวัตถุดำ (Radiation from blackbody)}} = \frac{C}{D}$$



ภาพที่ 2 - 13 แสดงการกระจายของการคายรังสี (Distribution of emitted radiation)

จากรูป ค่าการคายรังสีความร้อนมีการกระจายตามความยาวคลื่นของเส้นโค้ง 2 เส้นที่มีอุณหภูมิเดียวกัน โดยทั่วไปสัดส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและอุณหภูมิ นอกจากนี้ค่าการคายรังสีของพื้นผิววัสดุสามารถประมาณค่าได้จากกฎของเคอชอฟฟ์ (Kirchoff' s Law) ดังสมการ

$$\epsilon_t = 1 - \rho_t$$

โดยที่  $\epsilon_t$  = ค่าการคายรังสี ณ อุณหภูมิหนึ่ง

$\rho_t$  = ค่าการสะท้อนแสง ณ อุณหภูมิหนึ่ง

<sup>7</sup> วัตถุดำ หรือ Blackbody (perfect emitted = 1) เป็นวัตถุอุดมคติเพื่อใช้เปรียบเทียบความสามารถคายรังสีของพื้นผิว ได้ทุกความยาวคลื่น ในอุณหภูมิเดียวกัน

### 2.3.2 ค่าการคายรังสีความร้อนกับชนิดของผิววัสดุ

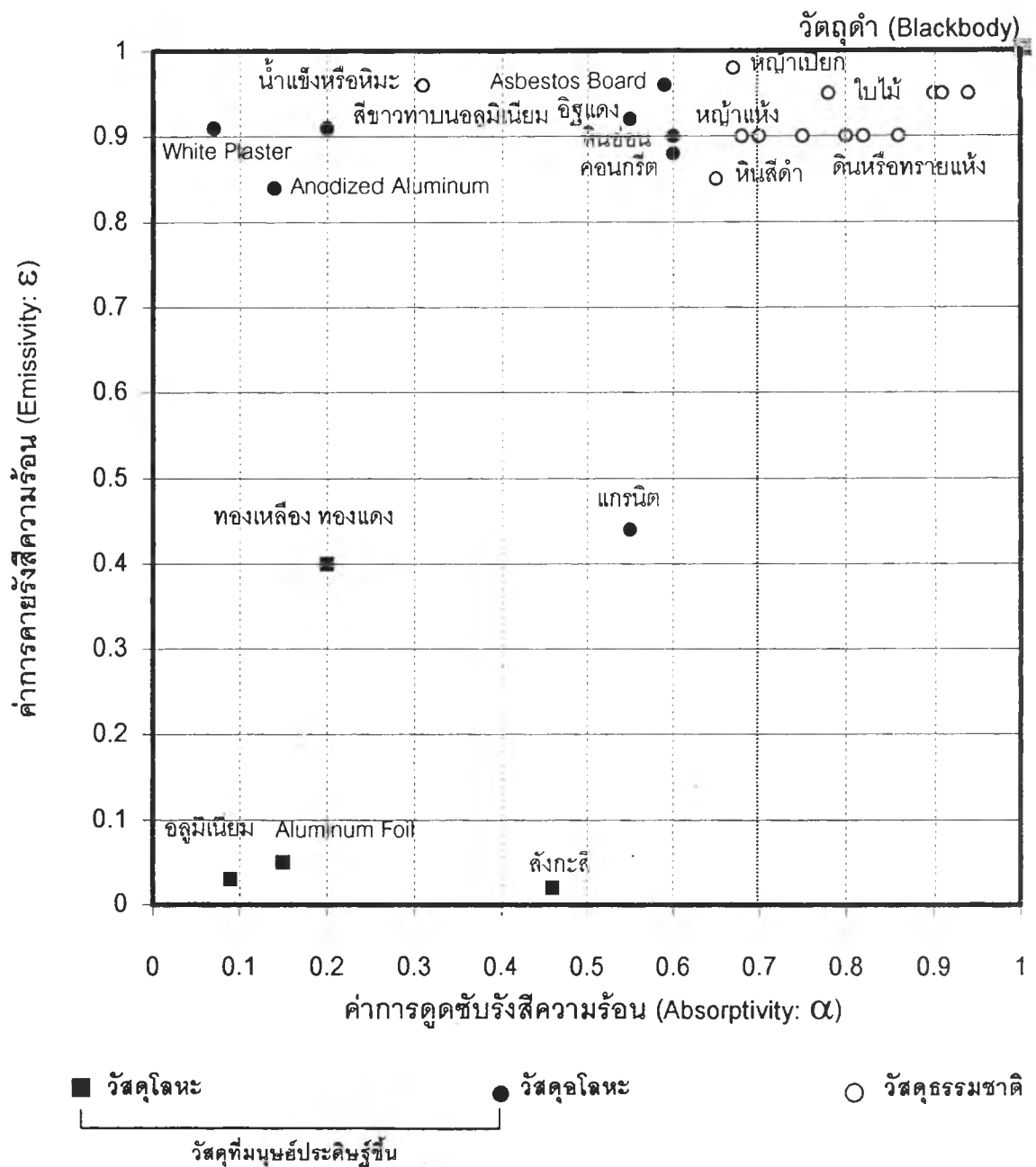
ผิววัสดุทั่วไปบนพื้นโลกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ซึ่งแต่ละพื้นผิวมีค่าการดูดซับและการคายรังสีความร้อนที่ต่างกันออกไป ดังนี้

1. วัสดุธรรมชาติ (natural materials) ได้แก่
  - น้ำ, น้ำแข็ง, หิมะ โดยทั่วไปมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ประมาณ 0.94-0.99
  - ดินและแร่ธาตุต่างๆ
  - พืชพันธุ์ โดยทั่วไปมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ประมาณ 0.90-0.95
2. วัสดุจากที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น (man-made materials) แบ่งออกเป็น
  - วัสดุโลหะ (electric materials) เช่น polished metal จะมีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ ประมาณ 0.01-0.04
  - วัสดุอโลหะ (dielectric materials) ได้แก่
    - ไม้ อีฐ ก่อ และคอนกรีต จะมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ประมาณ 0.9-0.98
    - การเคลือบผิววัสดุต่างๆ (coating) เช่น anodizing, painted และ powder coating



ภาพที่ 2 - 14 เปรียบเทียบค่าการคายรังสีความร้อนของพื้นผิววัสดุ ได้แก่ ไม้ ไม้ โลหะขัดมัน และวัสดุอโลหะ

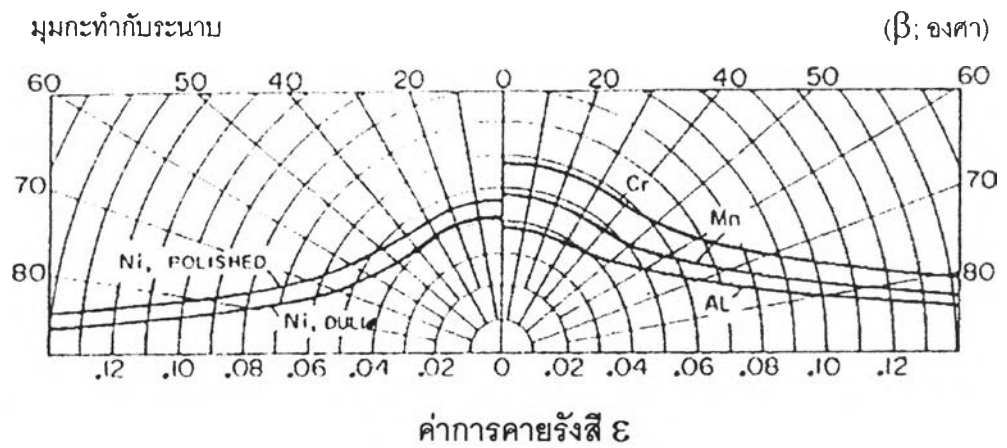
จากภาพแสดงให้เห็นว่า วัสดุอโลหะที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติหรือจากที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น จะมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง  $\epsilon$  มากกว่า 0.9 ในขณะที่วัสดุโลหะจะมีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ  $\epsilon$  น้อยกว่า 0.1 ซึ่งสามารถพิจารณาการดูดซับและคายรังสีความร้อนของวัสดุต่างๆบนพื้นโลก จากแผนภูมิที่ 2-3



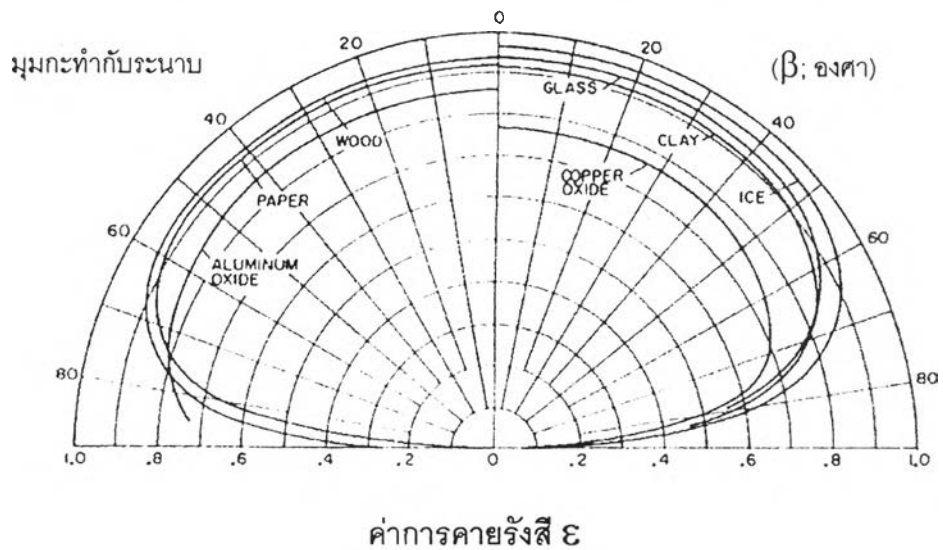
แผนภูมิที่ 2-3 แสดงอัตราส่วนการดูดซับความร้อนและการคายรังสีของพื้นผิวแต่ละชนิด  
ที่มา: Anderson, 1977: 354-355 ดุรายละเอียดจากภาคผนวก ก

เมื่อแบ่งประเภทตามการคายรังสีของผิววัตถุบนพื้นโลก จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การคายรังสีของผิวโลหะ (metal) และการคายรังสีของผิวอโลหะ (non-metal) ซึ่งลักษณะการคายรังสีของผิวทั้งสองจะมีความแตกต่างกันตามปริมาณการคายรังสี โดยที่

- การคายรังสีของผิวโลหะจะมีค่าคงที่ เมื่อมีมุมกระทำกับระนาบน้อย  $\beta$  น้อยกว่า  $40^\circ$  และค่าการคายรังสีจะสูงขึ้นเมื่อมุมกระทำระนาบเพิ่มขึ้น (โดยประมาณ  $40^\circ$  ขึ้นไป) พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดขึ้นกับความยาวคลื่นมาก (มนตรี อัจเจริญ, 2540: 94) ดังภาพที่ 2-15
- การคายรังสีของผิวโลหะจะมีค่ามากกว่าผิวโลหะและมีค่าสูงสุดเมื่อมุมกระทำกับระนาบ  $\beta$  เท่ากับ  $0^\circ$  ค่าการคายรังสีจะค่อนข้างคงที่ตลอดเมื่อมีมุม  $0^\circ \leq \beta < 45^\circ$  (ค่าประมาณ) และลดลงเมื่อมุมกระทำกับระนาบเพิ่มขึ้น (ตั้งแต่  $45^\circ$  ขึ้นไป) โดยที่ค่าการคายรังสีเท่ากับ 0 เมื่อมีมุมกระทำกับระนาบ  $\beta = 90^\circ$  ดังภาพที่ 2 - 16



ภาพที่ 2-15 ลักษณะการคายรังสีของผิวโลหะ (Electric) ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ ( $\beta$ )



ภาพที่ 2-16 ลักษณะการคายรังสีของผิวโลหะ (Dielectric) ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ ( $\beta$ )

ตารางที่ 2 - 4 ค่าการคายรังสีโดยเฉลี่ย (average emissivity) ของวัสดุจำพวกโลหะ-อโลหะ

ประเภทของพื้นผิววัสดุ	พื้นผิววัสดุ	ค่าการคายรังสีของพื้นผิว
Low emissivity พวกโลหะ	Zinc	0.02-0.05
	Silver polished	0.02-0.07
	Aluminum polished	0.04-0.06
	Copper polished	0.04-0.05
	Steel polished	0.08-0.14
	Stainless steel polished	0.17-0.30
High emissivity พวกอโลหะ	Oil paint (all color)	0.92-0.96
	White acrylic	0.90
	White enamel	0.90
	Red primer/red lead	0.93
	Teflon	0.85-0.92
	PVF	0.80-0.88
	Grass, high and dry	0.90
	Asbestos cement	0.95
	Concrete	0.88-0.94

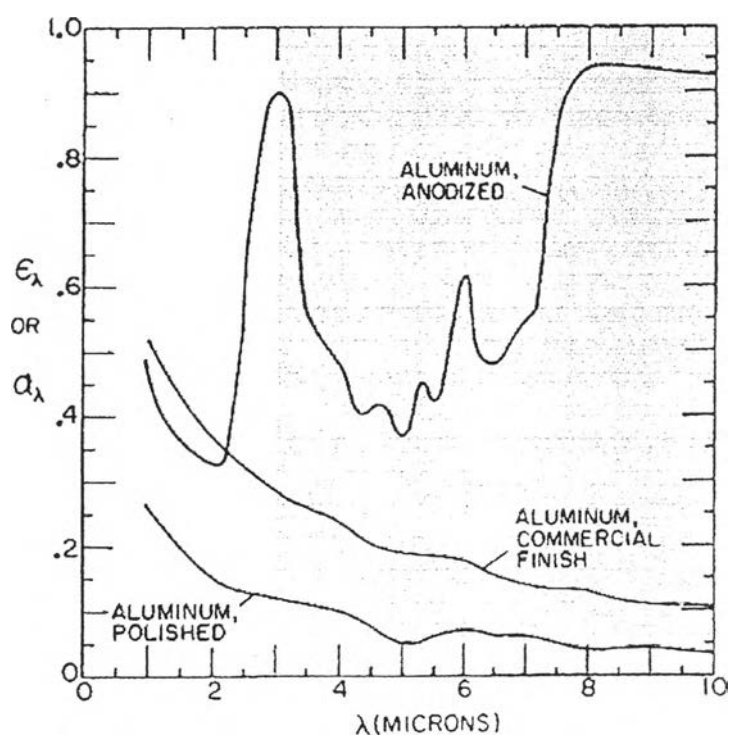
ที่มา: รวบรวมจาก EOI และ Anderson, 1977: 352-356 ดูรายละเอียดจากภาคผนวก ก และ ข

การปรับแต่งผิวโลหะให้มีความแตกต่างกันของสภาพพื้นผิวและการเคลือบผิว จะมีผลต่อให้ค่าการคายรังสีของผิวโลหะเพิ่มขึ้น สามารถแบ่งออกเป็นได้แก่

1. โลหะขัดมันหรือโลหะแต่งผิวสำเร็จ (polished finish) จะมีความสามารถในการสะท้อนรังสีสูง ทำให้มีพลังงานบางส่วนผ่านเข้ายังพื้นผิวได้น้อย การดูดกลืนรังสีในระดับความลึกจากผิวไม่มากนัก ทำให้การคายรังสีความร้อนน้อยด้วย
2. โลหะผิวไม่เรียบหรือแบบมีลวดลาย (patterned finish) ได้แก่ การใช้ลูกรีดที่มีลวดลายรีดให้เกิดลวดลายหรือผิวขรุขระตามต้องการ มีความสามารถในการสะท้อนกลับต่ำ บวกกับความสามารถในการดูดกลืนพลังงานได้มาก จึงทำให้โลหะผิวไม่เรียบเป็นตัวดูดกลืนที่ดี การคายรังสีจึงสูงขึ้นด้วย

3. โลหะเคลือบผิว (coating) ด้วยสารประกอบของ  $O_2$  กับธาตุอื่นๆ (oxide layer) และการเคลือบผิวทางเคมี (physical and chemical contamination) ทำให้มีพฤติกรรมการคายรังสีของผิวโลหะเสมือนผิวอโลหะ (ดูรายละเอียดจากภาคผนวก ข) ได้แก่
- การเคลือบผิวด้วย anodizing ซึ่งเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี
  - การเคลือบสีเช่น การเคลือบเงา (enamel on aluminum) , การเคลือบสี polyvinyl di fluoride (PVDF coating)
  - การเคลือบผิวแบบ powder coating

เมื่อศึกษาพฤติกรรมการคายรังสีคลื่นยาวของการเคลือบผิวโลหะที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อการคายรังสีของผิววัสดุที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างการทดลองเปรียบเทียบการเคลือบผิวโลหะอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน ผิววัสดุที่ทดลองได้แก่ อลูมิเนียมขัดมัน (polished aluminum ) commercial finish aluminum และอลูมิเนียมชุบ anodized

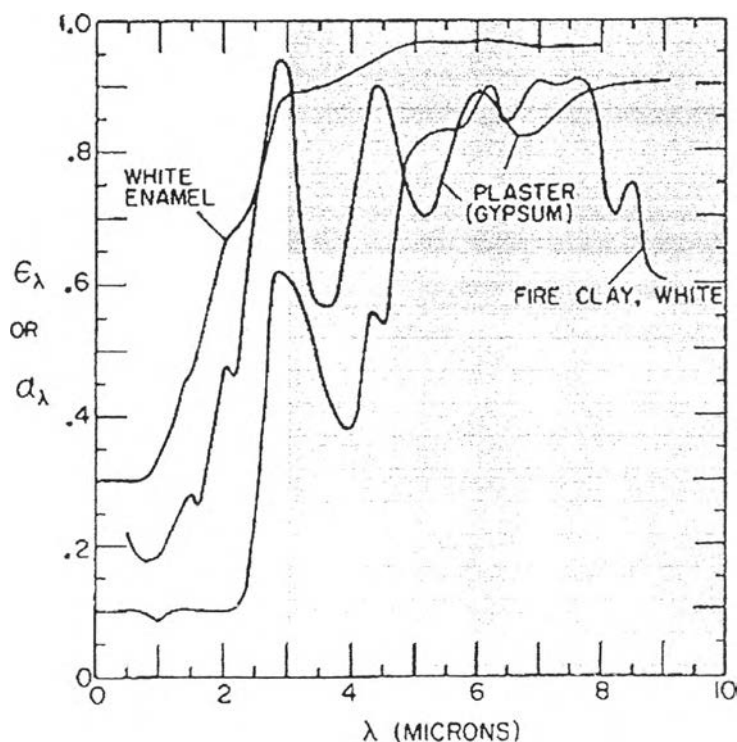


แผนภูมิที่ 2- 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการคายรังสีของพื้นผิววัสดุระหว่าง polished aluminum / commercial finish aluminum และ anodized aluminum (Dunkle and et al. 1953 อ้างใน Sparrow, 1978: 37)



ผลการทดลองพบว่า การเคลือบผิวบนวัสดุที่แตกต่างกันส่งผลให้พฤติกรรมจะแตกต่างกันออกไป (Dunkle and et al, 1953 อ้างใน Sparrow, 1978: 37) การคายรังสีของอลูมิเนียมขัดมันกับอลูมิเนียมแต่งสำเร็จจะมีค่าการคายรังสีลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น แต่สำหรับอลูมิเนียมอะโนไดซ์ (anodized aluminum) จะมีค่าการคายรังสีเพิ่มขึ้น (ตั้งแต่ 8  $\mu\text{m}$ .ขึ้นไป) ทั้งนี้ anodizing เป็นกระบวนการ ผลิตจากการเคลือบออกไซด์บนผิววัสดุทำให้มีพฤติกรรมเหมือนโลหะ ซึ่งโดยปกติโลหะจะมีค่าการคายรังสีค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างเช่น แผ่นอลูมิเนียมขัดมัน (highly polished aluminum) ที่อุณหภูมิห้องมีค่าการคายรังสีประมาณ 0.04 - 0.08 แต่เมื่อเทียบกับ commercial finish aluminum ซึ่งเป็นผลจากการทำให้ขรุขระ (contaminate) ก็จะมีค่าการคายรังสีเพิ่มขึ้น

การศึกษาพฤติกรรมการคายรังสีความร้อนของผิวโลหะที่มีสีขาว 3 ชนิด ได้แก่ วัสดุเคลือบสี (white enamel), ยิปซัม (gypsum) และดินเผา (fire clay)



แผนภูมิที่ 2-5 แสดงการเปรียบเทียบค่าการคายรังสีของการเคลือบผิววัสดุระหว่าง White enamel, Plaster (gypsum) และ fire clay, white (Dunkle and et al, 1953 อ้างใน Sparrow, 1978: 37)

ผลการทดลองพบว่า ในช่วงแสงที่มองเห็น (visible wavelength: 0.5  $\mu\text{m}$ .) จะม้ค่าการคายรังสีต่ำหรือมีค่าการสะท้อนกลับสูง แต่ในช่วงคลื่นยาว(ตั้งแต่ 3 $\mu\text{m}$ . ขึ้นไป วัสดุที่เคลือบสีและเคลือบเงาจะมีค่าการคายรังสีสูง ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ blackbody (Siebler, 1941 อ้างใน Sparrow, 1978: 38)

จากการศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติการคายรังสีของผิววัสดุหลังคา(actual surface) จะขึ้นอยู่กับ

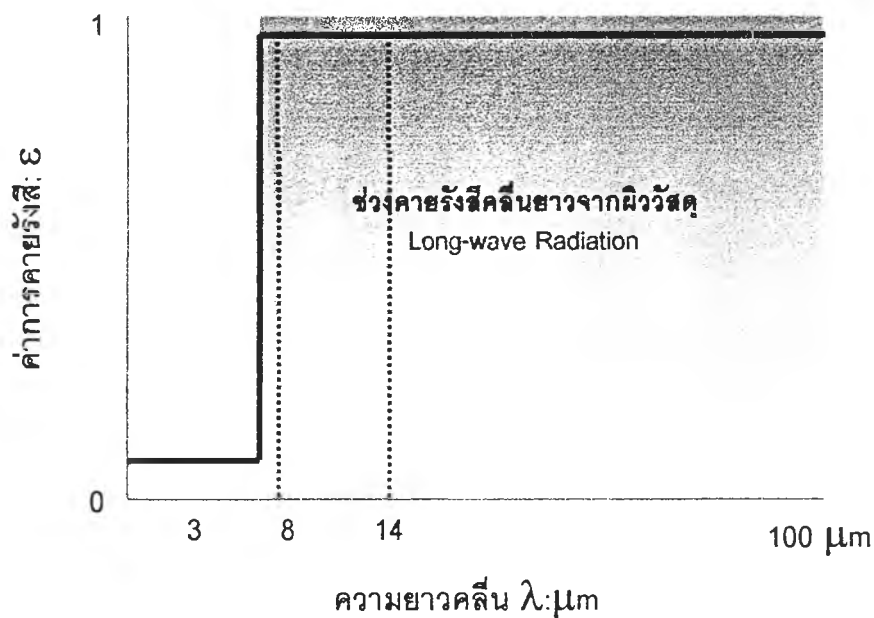
- ชนิดของพื้นผิว: วัสดุมีค่า  $\epsilon$  จะเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงความยาวคลื่น (ในเชิง spectral)
  - ผิวโลหะส่วนใหญ่จะมีค่าการคายรังสีตั้งแต่ 0.90 ขึ้นไป
  - ผิวโลหะจะมีค่าการคายรังสีน้อยกว่า 0.90
- สภาพผิว เช่น ความเรียบ/ขรุขระของผิว ความมันวาว
- ทิศทางการคายรังสีและมุมของการคายรังสีซึ่งจะมีค่าสูงสุดในทิศทางตั้งฉาก
- ความยาวคลื่นของการคายรังสี ( $\lambda$ ): ผิวโลหะจะมีการคายรังสีลดลงเมื่อ  $\lambda$  เพิ่มขึ้น ผิวอโลหะจะมีการคายรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\lambda$  เพิ่มขึ้น
- อุณหภูมิผิว: เมื่อมีอุณหภูมิผิวสูงขึ้น
  - การคายรังสีของโลหะจะเพิ่มขึ้น
  - การคายรังสีของอโลหะจะลดลง

ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุหลังคากับการเกิดน้ำค้างจะพิจารณาจากค่าการคายรังสีคลื่นยาวของผิววัสดุ แสดงถึงศักยภาพในการคายความร้อนออกจากผิวกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน จนทำให้อุณหภูมิผิววัสดุต่ำกว่าจุดน้ำค้างได้

### 2.3.3 การเลือกคายรังสีคลื่นยาวของพื้นผิวหลังคา (selective surface)

จากคุณสมบัติการดูดซับและการคายรังสีความร้อน เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างการดูดซับรังสีคลื่นสั้น (short-wave absorptance;  $\alpha$ ) กับ การคายรังสีคลื่นยาว (long-wave emittance; $\epsilon$ ) สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีได้แก่

1. ถ้า  $\alpha/\epsilon$  สูง = พื้นผิวนั้นมีการดูดซับมากและคายรังสีความร้อนได้น้อยเหมาะสำหรับเลือกใช้เป็น solar collector
2. ถ้า  $\alpha/\epsilon$  ต่ำ = พื้นผิวนั้นมีการดูดซับน้อยมาก และจะคายรังสีความร้อนได้มาก การเลือกคายรังสีของพื้นผิววัสดุจึงเป็นตัวแปรหนึ่งต่อการเกิดน้ำค้าง เพื่อผิวหลังคาจะได้สูญเสียความร้อนกับท้องฟ้ามากที่สุด (to maximize net long-wave radiant heat loss) สามารถพิจารณาจากคุณสมบัติของการเคลือบผิวนั้นๆ โดยมีค่าการคายรังสีคลื่นยาวสูง (high long-wave emittance) โดยเฉพาะคายรังสีในช่วง 8-14  $\mu\text{m}$ . (atmospheric window) และมีค่าการดูดซับรังสีต่ำ (low-solar absorptance) ดังภาพ



ภาพที่ 2-17 แสดงสมมติฐานการเลือกคายรังสีของพื้นผิวหลังคาเพื่อใช้ประโยชน์จากน้ำค้าง

การเลือกวัสดุหลังคาเพื่อคายความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนมีจำนวนหลายงานวิจัยที่ศึกษาและทดลองถึงคุณสมบัติการเคลือบผิวของแผ่นหลังคาต่างๆกัน ตัวอย่างเช่น การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุที่มีค่าการคายรังสีของของพื้นผิวที่แตกต่างกัน 5 ชนิดในสภาวะอากาศเดียวกันที่ The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization ประเทศออสเตรเลีย (Mitchell, 1976 อ้างใน Givoni, 1982:44) โดยมีวัสดุวัสดุทดลองได้แก่

- anodized aluminum หนา 4 และ 10  $\mu\text{m}$ . ( $\epsilon = 0.84$ )
- aluminum with sodium silicate layer

- aluminized tedlar sheet
- white paint ( $\epsilon = 0.92$ )
- black paint ( $\epsilon = 0.90$ )

ผลการทดลองพบว่า anodized aluminum สามารถคายรังสีในช่วง 8-14  $\mu\text{m}$ . ได้มากที่สุด แม้ว่าในตอนกลางคืนการทดลองของวัสดุทั้ง 3 ชนิดอันได้แก่ anodized aluminum, aluminized tedlar sheet และ black paint จะมีอุณหภูมิผิวใกล้เคียงกัน (ตั้งแต่ 6-8°C) สรุปได้ว่าการเลือกคายรังสีในช่วง 8-14  $\mu\text{m}$ . ของ anodized aluminum ไม่มีผลต่อการสูญเสียความร้อน

การศึกษาการคายรังสีของวัสดุทำจาก polyvinyl fluoride on aluminum (Tedlar) โดยนำแผ่น polyethylene film wind screen เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ผลการทดลองพบว่า มีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 12°C ถ้าได้รับอิทธิพลจากรังสีดวงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 15°C (Catalonotti et al, 1975: 83-89)

การศึกษาการเลือกคายรังสีคลื่นยาวของผิววัสดุที่ทำจาก aluminum หนา 0.1mm.เคลือบด้วย Tedlar sheet และคลุมด้วย polyethylene windscreen เปรียบเทียบกับวัสดุอลูมิเนียมเคลือบสี (ordinary surface) ใน Berkley ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทดลองในวันที่สภาพท้องฟ้าแจ่มใสที่มีอุณหภูมิอากาศ 12.5°C วัสดุทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิผิวดังนี้

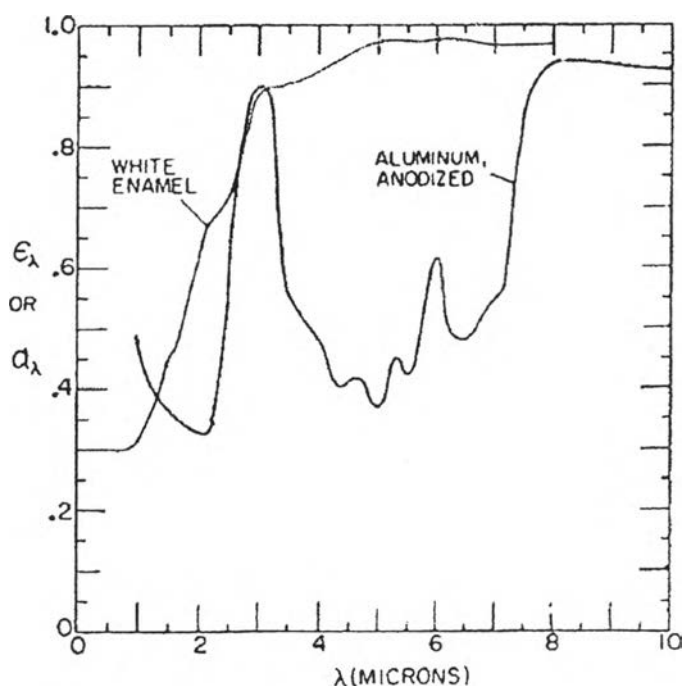
- paint aluminum plate (ordinary surface) มีอุณหภูมิผิว 3.5°C
- Tedlar sheet คลุมด้วย polyethylene windscreen (selective surface) มีอุณหภูมิผิว 3.3°C

จะเห็นว่า อุณหภูมิผิวที่ลดลงของทั้งสองแผ่น (ประมาณ 9°C) ไม่มีความแตกต่างกัน จากผลการทดลองดูเหมือนว่าจะเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพของการคายรังสีของพื้นผิววัสดุมากกว่า แต่จุดสำคัญคือสามารถเกิดหยดน้ำ (condensation) บนพื้นผิวของ polyethylene windscreen (Sakkal et al, 1979 อ้างใน Givoni, 1982:44)

เมื่อนำค่าการคายรังสีของ white paint เทียบกับ anodized aluminum จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันในช่วงคลื่น 8  $\mu\text{m}$ . เป็นต้นไป จะมีความแตกต่างกันมากในช่วงคลื่น 3-8  $\mu\text{m}$ . ได้มีงานวิจัยคุณสมบัติของ black paint ( $\epsilon = 0.9$ ) และ white paint ( $\epsilon = 0.92$ ) ถูกเปรียบเทียบกับ selective

surface ที่ทำจาก Anodized Aluminum ( $\epsilon = 0.84$ ) ที่ Nevada Desert Research Institute ผลงานวิจัยพบว่า (Miller and Bradley, 1979 อ้างใน Givoni, 1982:44) พื้นผิวทั้งหมดนั้นไม่มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวในตอนกลางคืน (ประมาณ  $5-10^{\circ}\text{C}$ ) สามารถวัดอุณหภูมิอากาศได้  $5^{\circ}\text{C}$  โดยที่

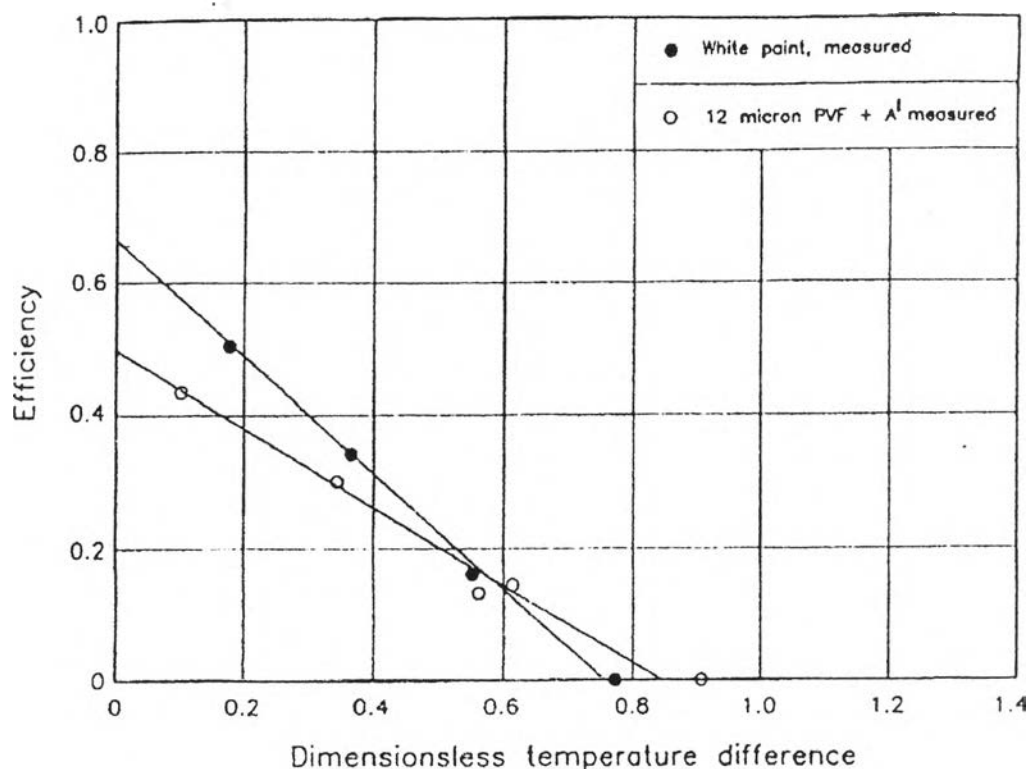
- anodized aluminum (selective surface) มีอุณหภูมิผิว  $-12^{\circ}\text{C}$
- black paint และ white paint มีอุณหภูมิลดลงเป็น  $-10^{\circ}\text{C}$



แผนภูมิที่ 2-6 ค่าการคายรังสีความร้อนของ white paint เทียบกับ anodized aluminum (ภาพปรับปรุงจาก Dunkle and et al, 1953 อ้างใน Sparrow, 1978: 37)

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของ aluminized polyvinyl fluoride (PVF) กับ white painted ที่ Lawrence Berkley Laboratory (Kruskopf et al, 1980 อ้างใน Givoni, 1982: 44) พบว่า มีความแตกต่างเพียงระหว่างอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิอากาศเล็กน้อยประมาณ  $6^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่างการทดลองเปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนของ Ordinary และ Selective Surface ทั้งสองจะคลุมด้วย polyethylene windscreen (Landro and McCormic, 1980 อ้างใน Givoni, 1991:99) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิผิวของวัสดุ, อุณหภูมิอากาศและความชื้น โดยที่

- white paint (ordinary surface) มีอุณหภูมิผิวต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ  $10^{\circ}\text{C}$
- aluminized PVF (selective surface) มีอุณหภูมิผิวต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ  $14^{\circ}\text{C}$



แผนภูมิที่ 2-7 การเปรียบเทียบพลังงานจากการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าในตอนกลางคืนของพื้นผิววัสดุ PVF และ White Paint (after Landro and McCormic, 1980)

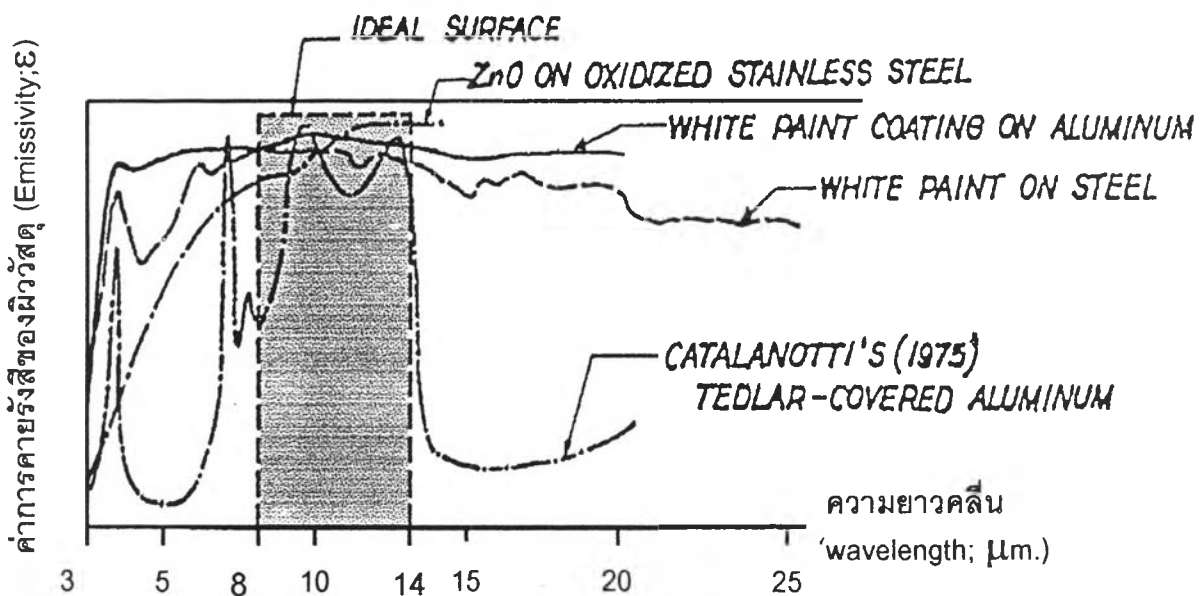
จากรูป พลังงานจากการคายรังสีความร้อนสุทธิ (net cooling power:  $W/m^2$ ) ภายใต้ท้องฟ้าแจ่มใสสัดส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวจะลดลงตลอด และที่ความแตกต่างน้อยกว่า  $3^{\circ}C$  คุณสมบัติของ white paint จะดีกว่า PVF (selective surface)

ในประเทศไทยมีงานวิจัยที่ศึกษา การทำความเย็นแบบธรรมชาติโดยวิธีเลือกคายรังสีในช่วง 8–13  $\mu m$ . เพื่อใช้ประโยชน์เกี่ยวกับผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งอาศัยข้อมูลการสำรวจอากาศชั้นบน (10 กม.) ของกรมอุตุนิยมวิทยาเมื่อปี 1970 ในการคำนวณค่าการคายรังสีของบรรยากาศในบริเวณเมืองเชียงใหม่ พบว่า (Boon-Long, 252)

- ค่าการคายรังสีของช่วงความยาวคลื่น 8-13  $\mu m$ . (spectral emissivity) มีค่าตั้งแต่ 0.42 (มกราคมและกุมภาพันธ์) ถึง 0.81 (มิถุนายนและกรกฎาคม)
- ค่าการคายรังสีของช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด (total emissivity) มีค่าตั้งแต่ 0.77 (กุมภาพันธ์) ถึง 0.87 (มิถุนายนและกรกฎาคม)

งานวิจัยนี้สรุปว่า มีความเป็นไปได้ของการนำความเย็นด้วยคายรังสีในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว สำหรับสภาพอากาศของประเทศไทย อัตราการคายรังสีจากผิวเลือกคายรังสีจาก ideal cooling surface เมื่อท้องฟ้าแจ่มใสจะให้พลังงานความเย็นสูงสุด มีค่าตั้งแต่  $50 \text{ W/m}^2$  ในเดือนมกราคม ถึง  $20 \text{ W/m}^2$  ในเดือนกรกฎาคม วัสดุที่นำมาเปรียบเทียบค่าการคายรังสีคลื่นยาว ได้แก่ (ดังรูป)

- ZnO on oxidized stainless steel
- white paint coating on aluminum
- white paint on steel
- Tedlar-covered aluminum (Catalanotti, 1975)



แผนภูมิที่ 2-8 แสดงการคายรังสีของผิววัสดุในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 3 เป็นต้นไป (Boon-Long, n.d.)

จากรูป พื้นผิววัสดุที่เป็น ideal selective radiator จะมีค่าการคายรังสีความร้อนสูงในช่วงความยาวคลื่น  $8-14 \mu\text{m}$ . และมีค่าการดูดซับรังสีความร้อนช่วงคลื่นสั้นต่ำหรือเท่ากับสูง 0 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิววัสดุกับอุณหภูมิอากาศ (ตามทฤษฎีของ ideal surface จะมี  $\Delta T=0$  เมื่อมีการคายรังสี หมายถึง ไม่มีการจลความร้อนและไม่มีการรับความร้อน) สำหรับ ideal surface จะมี  $\Delta T = 32^\circ\text{C}$  ในเดือนมกราคม และ  $9.5^\circ\text{C}$  ในเดือนกรกฎาคมของประเทศไทย

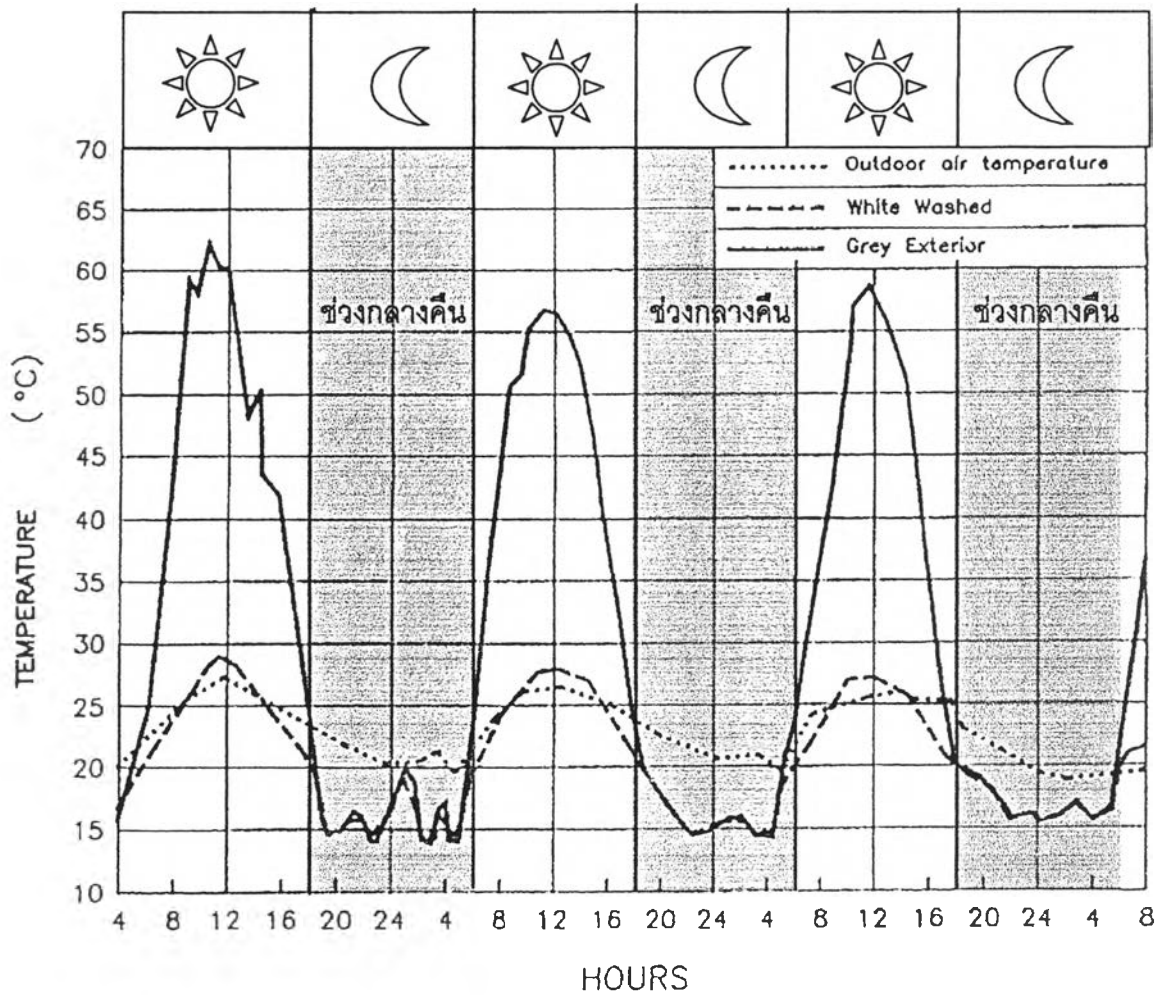
การศึกษาการทำความเย็นโดยการคายรังสีความร้อนกับท้องฟ้าในประเทศไทย ได้ทดลองสร้างอุปกรณ์ทำน้ำเย็นตามหลักการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุกับท้องฟ้า มีน้ำเย็นในระบบอยู่ 55 ลิตร และสีทาบนแผ่นทดลอง 2 แผ่นที่ขนาด 1.977 ตารางเมตร ทาสีขาวและสีดำอย่างละแผ่น 1 แผ่น ทำการศึกษาทดลองในช่วงปลายฤดูร้อนถึงต้นฤดูฝน (23 เม.ย. - 19มิ.ย. 2533) ผลการทดลองพบว่า (พงศธร มนูญพัฒน์พงศ์, 2533)

- แผ่นทดลองสามารถทำน้ำเย็นให้มีอุณหภูมิต่ำสุด  $23^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ  $0.4-3.4^{\circ}\text{C}$
- สีที่ทาบนแผ่นทดลองไม่มีความแตกต่างกันต่อความเย็นในช่วงดังกล่าว
- ประสิทธิภาพการคายรังสีความร้อนของระบบ (radiative efficiency) มีค่า 54-58%
- มีค่า  $\epsilon$  สูงสุดที่มุมเอียงของแผงคายรังสีน้อยที่สุด และค่าการสูญเสียความร้อนมีค่ามากที่สุดที่มุมเอียงน้อยที่สุด

จะเห็นได้ว่าการทำความเย็นด้วยการคายรังสีความร้อน จะมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศมากนักในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น แต่เป็นวิธีการทางธรรมชาติที่ประหยัดพลังงาน ราคาถูกและไม่เกิดมลภาวะ

ในขณะเดียวกันได้มีการศึกษาอิทธิพลของสีที่มีผลต่ออุณหภูมิผิวของหลังคา โดยทดลองจากหลังคาที่ทำจาก asbestos cement ทาด้วยสีดำและขาว ที่เมือง Hafia ในประเทศซึ่งที่มีสภาพอากาศชื้น (humid climate) ในฤดูร้อนของปี ค.ศ. 1964 พบว่า สีของหลังคาที่แตกต่างกันจะมีผลต่ออุณหภูมิในช่วงเวลากลางวัน แต่จะไม่มีผลต่ออุณหภูมิผิวของหลังคาในช่วงเวลากลางคืน โดยทั้งสองสีจะมีอุณหภูมิผิวลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศใกล้เคียงกัน (ประมาณ 5-6 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ในทุกๆคืน จะมีน้ำค้างจำนวนมากเกาะอยู่บนหลังคา (Givoni, 1994:11) ดังแผนภูมิที่ 2-9





แผนภูมิที่ 2-9 แสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิผิววัสดุที่เคลือบสีเทากับขาว (Givoni, 1994:11)

เมื่อศึกษาคุณสมบัติค่าการดูดซับและคายรังสีของผิววัสดุพบว่า ผิววัสดุมีการดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์แตกต่างกัน แต่จะมีค่าการคายรังสีออกจากผิววัสดุใกล้เคียงกัน (ดังตารางที่ 2-5) ดังนั้น สีของการเคลือบผิวหรือค่าการดูดซับรังสีของผิวไม่มีผลในเวลากลางคืน แต่จะพิจารณาจากการคายรังสีคลื่นยาวจากผิววัสดุเป็นสำคัญ

ตารางที่ 2-5 แสดงคุณสมบัติการดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์กับการคายรังสีคลื่นยาวจากผิววัสดุ

พื้นผิว	สีดำ	สีขาว
Short -wave Absorptance	0.94-0.98	0.20
Long-wave Emittance	0.88	0.91

ที่มา: Anderson, 1977: 354-355

จากทฤษฎีและงานวิจัยข้างต้น คุณสมบัติทางกายภาพของผิวหลังคาที่ต่างกันเช่น ค่าการคายรังสีคลื่นยาว ชนิดผิววัสดุ สามารถตั้งสมมติฐานการวิจัยได้ว่า วัสดุที่มีค่าการคายรังสีต่างกันจะมีผลต่อปริมาณน้ำค้างที่เกิดขึ้นต่างกัน

## 2.4 มวลสารของวัสดุกับการเกิดน้ำค้าง

จากการสังเกตน้ำค้างตามธรรมชาติจะเห็นหยดน้ำเกาะอยู่บนใบไม้หรือใบหญ้า ในขณะที่คอนกรีตไม่มีหยดน้ำเกาะ ทั้งนี้ ในตอนกลางวันที่วัตถุได้รับรังสีความร้อน วัตถุจะกักเก็บความร้อนไว้จนเต็มมวลสาร มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัตถุ ดังเช่น ใบไม้หรือคอนกรีตซึ่งมีมวลสารต่างกัน จะมีค่าความจุความร้อน<sup>๑</sup>แตกต่างกันด้วย วัตถุที่มีมวลสารมากก็จะเก็บความร้อนมาก วัตถุที่มีมวลสารน้อยก็จะเก็บความร้อนได้น้อย เนื่องจากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนในระดับหนึ่งจะพบว่า วัสดุที่มีมวลสารน้อยและมีค่าความจุความร้อนต่ำเช่น มวลสารของใบไม้มีความสามารถในการสะสมความร้อนต่ำ ความร้อนที่เติมเข้าไปจะเต็มเร็วและไม่เกิดการหน่วงเหนี่ยวความร้อน ส่งผลให้มวลสารถ่ายเทความร้อนออกไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่มวลสารที่มีค่าความจุความร้อนมากและมีการหน่วงเหนี่ยวความร้อนสูง เช่น คอนกรีต จะกักเก็บความร้อนสูงกว่า ความร้อนที่เติมเข้าไปในมวลสารจะช้ากว่า ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่า

ในช่วงเวลากลางคืน เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลงใบไม้จะถ่ายเทความร้อนออกจากมวลสารได้รวดเร็ว เนื่องจากใบไม้มีการสะสมความร้อนน้อย ส่งผลให้มีอุณหภูมิผิวลดลงต่ำกว่าจุดน้ำค้าง จึงเกิดหยดน้ำเกาะอยู่ตามผิวใบ ในขณะที่คอนกรีตยังมีความร้อนสะสมอยู่ในมวลสาร การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้อุณหภูมิผิวไม่สามารถลดลงต่ำกว่าจุดน้ำค้างได้

---

<sup>๑</sup> ค่าความจุความร้อน (heat capacity) หรือการกักเก็บความร้อนของมวลสารต่อปริมาตร มีความสัมพันธ์กันระหว่างความร้อนและอุณหภูมิ ถูกจำกัดความด้วย ปริมาณพลังงานความร้อนที่กักเก็บต่อ 1 หน่วยปริมาตร ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น 1 °F มีหน่วยเป็น Btu/ft<sup>3</sup>°F (heat capacity = ความหนาแน่น (density) \* ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) และ thermal storage capacity = density \* specific heat \* conductivity)

ตารางที่ 2 - 6 การเปรียบเทียบมวลสารประเภท Low, Medium และ High Mass

Material		Specific heat หน่วย Btu / lb. °F	Density หน่วย lb / ft <sup>3</sup>
Low mass	เหล็ก (steel)	0.12	450
	อลูมิเนียม (aluminum)	0.21	171
	ไม้	0.39	35.6-41.2
Medium mass	ก่ออิฐ (brick)	0.19	120
High mass	คอนกรีต	0.19-0.24	144
	หิน (limestone)	0.19	180

ที่มา: ASHRAE, 1997: 24.4-24.7

จากตารางที่ 2-6 ได้แบ่งประเภทของมวลสารของวัสดุออกเป็นมวลสารน้อย มวลสารกลาง และมวลสารมาก เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระหว่างคอนกรีตกับอลูมิเนียม พบว่า อลูมิเนียมสามารถรับความร้อนและสูญเสียความร้อนได้เร็วกว่าคอนกรีต อันเป็นมาจากสมการ

$$Q = m * S * \Delta t$$

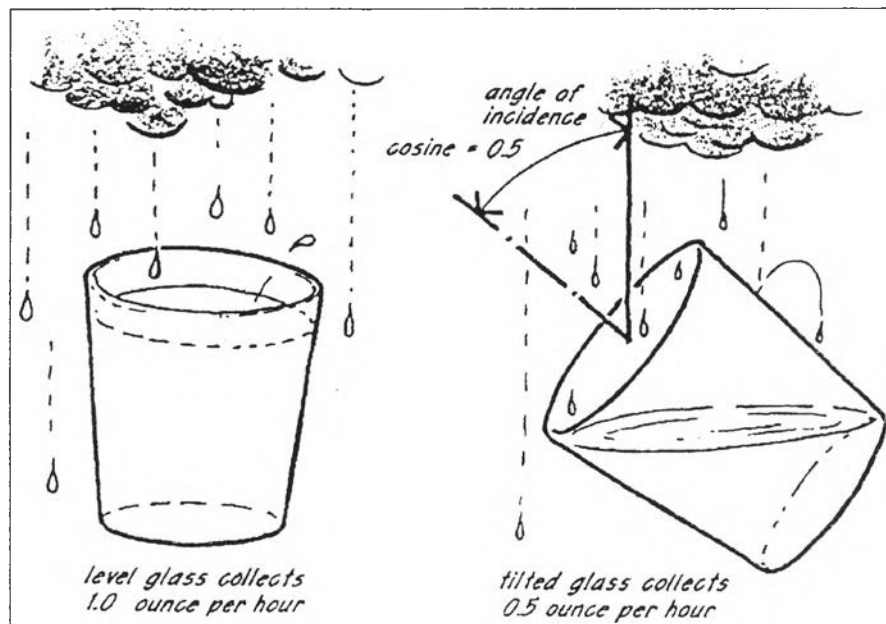
(ที่มา: Bansal, Gerd and Grenot, 1994 :42)

- โดยที่ Q = พลังงานที่สะสมในวัสดุ หน่วย kJ หรือ Btu  
 m = มวลสารของวัสดุ หน่วย กิโลกรัมหรือปอนด์  
 S = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) หน่วย Btu/lb. °F  
 $\Delta t$  = ผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม

เมื่อให้พลังงานความร้อนกับวัสดุเท่ากัน วัสดุที่มีมวลสารน้อยจะมีพลังงานที่สะสมในตัววัสดุน้อยส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 °F รวดเร็วกว่าวัสดุที่มีมวลสารมาก ฉะนั้น สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า มวลสารของหลังคาที่ต่างกันจะมีผลต่อการเกิดปริมาณน้ำค้างและความเย็นที่ต่างกัน

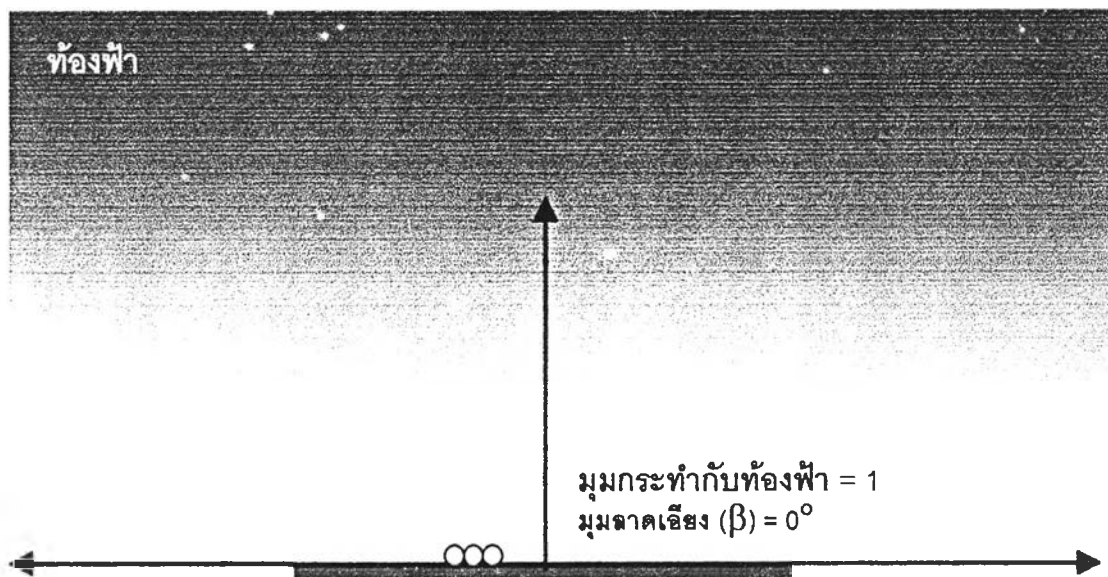
## 2.5 มุมเอียงของหลังคา กับ ปริมาณน้ำค้าง

มุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อมุมที่เปิดสู่ท้องฟ้า (angle factor) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณน้ำค้างและพลังงานที่เกิดขึ้น จะสังเกตได้จากการเกิดน้ำค้างบนหลังคาในตอนเช้า พบว่าบริเวณหลังคาจะมีความชื้นมากกว่าบริเวณที่เอียงลาด ในขณะที่มีน้ำค้างที่น้อยมากหรือไม่มีเลยในบริเวณด้านข้าง จากปรากฏการณ์นี้เป็นผลจาก ในมุมปกติหรือแนวระนาบจะสามารถรองรับรังสีได้เต็มที่ เมื่อเอียงพื้นผิวนั้นจะทำให้ความเข้มของรังสีที่ได้รับลดลง ตัวอย่างเช่น พลังงานของรังสี (radiant energy) ในมุมปกติ (0 angle of incidence) เท่ากับ  $275 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$  แต่ถ้าเอียงทำมุม  $60$  ( $\cosine 60 = 0.5$ ) พื้นผิวนั้นจะได้รับพลังงานเพียง  $137.5 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$  (Moore, 1993: 14) ดังภาพที่ 2-18

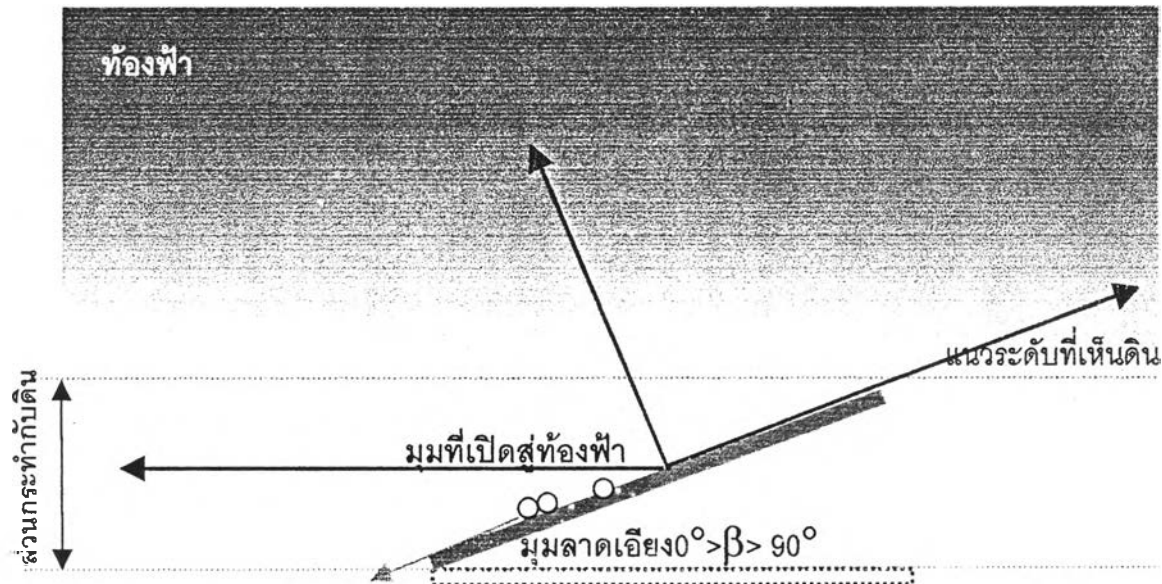


ภาพที่ 2-18 แสดงการเปรียบเทียบมุม cosine ของการรับน้ำ (water glass analogy)

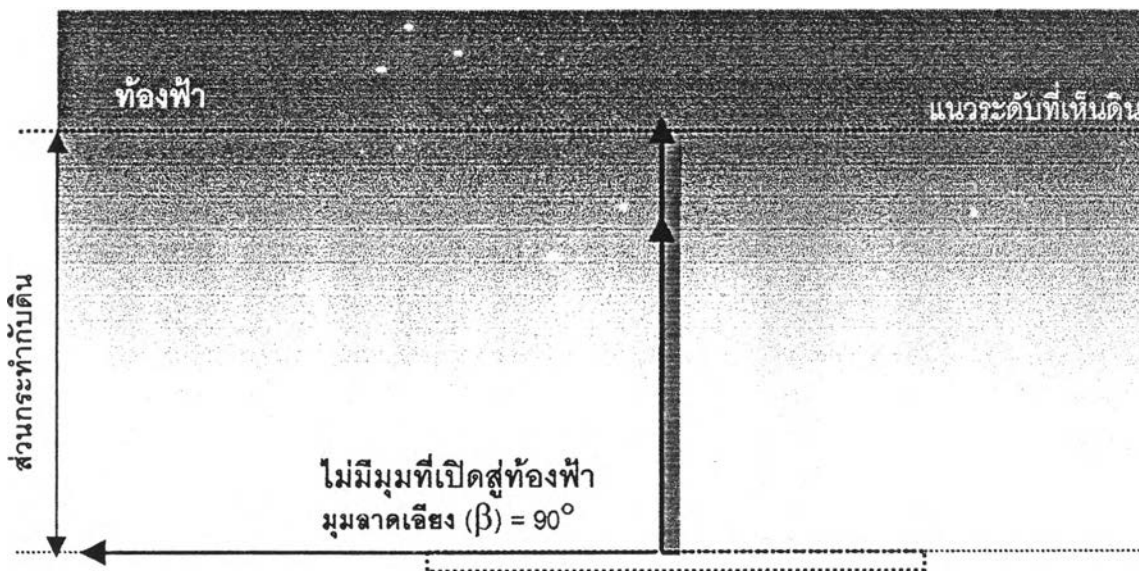
ที่มา Moore, 1993: 14



กรณีที่ 1 ไม่มีมุมเอียงหลังคา แต่มุมที่เปิดสู่ท้องฟ้ามากที่สุด (angle factors = 1 Hemisphere)  
แต่น้ำค้างไม่ไหล



กรณีที่ 2 มีมุมเอียงหลังคามากขึ้น แต่มุมที่เปิดสู่ท้องฟ้าน้อยลง ( $0.5 < \text{Angle factor} < 1$ )  
ทำให้น้ำค้างไหลเมื่อมีปริมาณมาก



กรณีที่ 3 มีมุมเอียงหลังคามากที่สุด แต่ไม่มีมุมที่เปิดสู่ท่อน้ำ (Angle factor = 1/2 Hemisphere)  
 น้ำค้างอาจไม่เกิดหรือเกิดเล็กน้อย

ภาพที่ 2-19 แสดงการเปรียบเทียบมุมเอียงหลังคา กับมุมที่เปิดสู่ท่อน้ำ (angle factor) ที่ต่างกันตามกรณี 1-3

จากการคายรังสีจากพื้นผิวมีลักษณะครึ่งทรงกลม (hemisphere) และขึ้นอยู่กับมุมที่เปิดสู่ท่อน้ำ เมื่อเอียงหลังคา ( $\beta > 0^\circ$ ) จะมีมุมบางส่วนเปิดสู่ท่อน้ำและบางส่วนทำมุมกับพื้นผิวโดยรอบ (surrounding) ทำให้ความเข้มของการคายรังสีลดลง เมื่อเอียงหลังคาเพิ่มขึ้นจนถึง  $90^\circ$  จะเห็นได้ว่าไม่มีส่วนใดที่แลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท่อน้ำเลย การที่มุมหลังคาเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มของการคายรังสีลดลง เป็นผลจาก angle factor: F หรือเรียกอีกอย่างว่า concept of configuration factor โดยที่

$$F = \text{Angle Factor หรือ Shape Factor}$$

$$= \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)$$

ดังนั้นสรุปได้ว่า ในแนวระนาบ ( $\beta=0^\circ$ ) มีมุมที่เปิดสู่ท่อน้ำมากที่สุด (angle factor = 1) และเมื่อ  $\beta=90^\circ$  มีมุมที่เปิดสู่ท่อน้ำน้อยที่สุด (angle factor 0.5) ดูรายละเอียดจากภาคผนวก ค

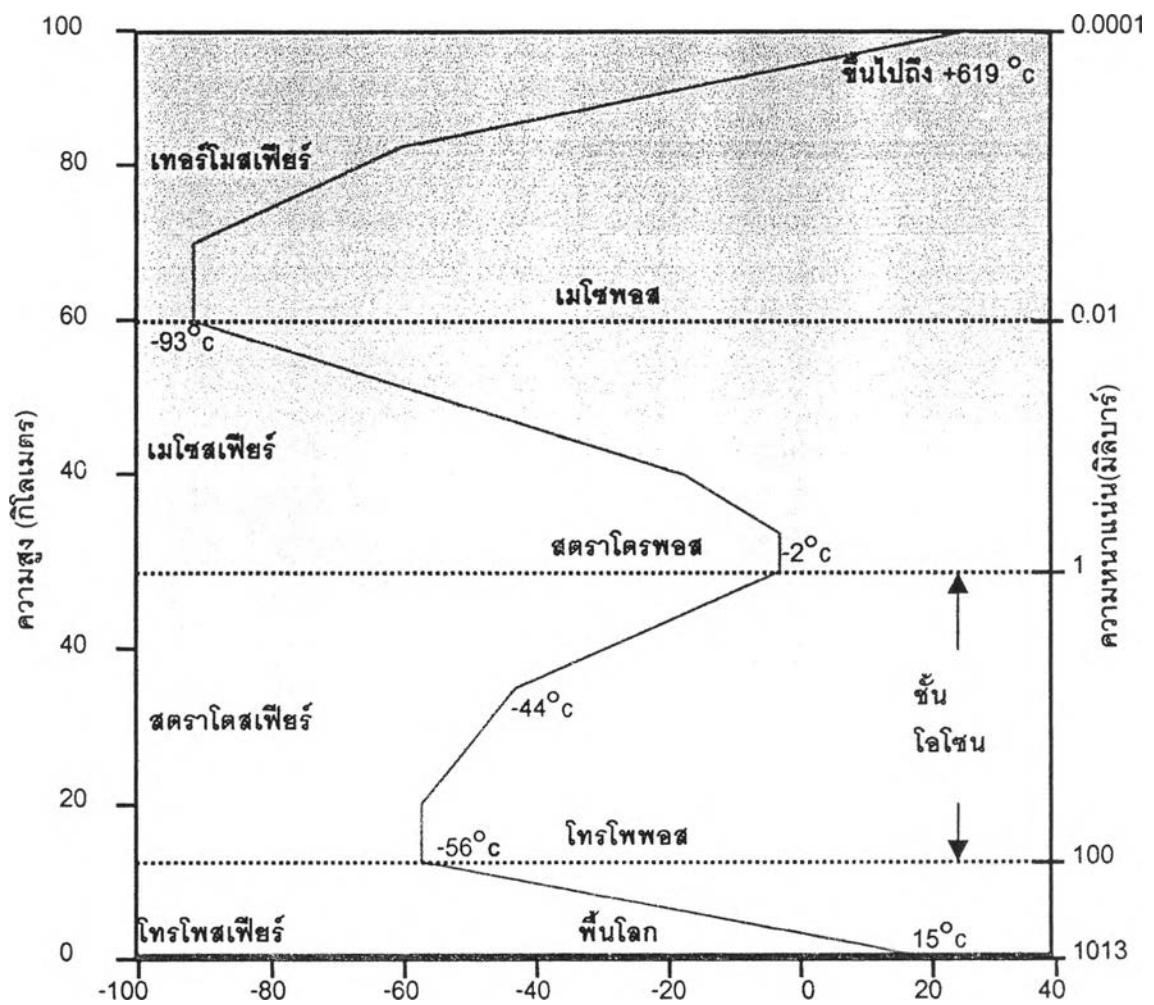
แต่อย่างไรก็ตาม การมีหยดน้ำเกาะบนพื้นผิวหลังคานั้นจะเป็นฟิล์มที่สกัดกั้นการแลกเปลี่ยน อุณหภูมิกับท้องฟ้า และเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำค้างกับพื้นผิวแทน นอกจากนี้จะทำให้ แผ่นหลังคาเปียกชื้น เกิดการกักความร้อนได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของหลังคาที่เหมาะสม ระหว่างการทำให้เกิดน้ำค้างและการไหลของน้ำค้าง เพื่อให้หยดน้ำไหลลงอย่างรวดเร็วและมีปริมาณ เก็บสะสมได้ โดยตั้งเป็นสมมติฐานการวิจัยได้ว่า มุมเอียงหลังคามีผลต่อปริมาณน้ำค้างและปริมาณ ความเย็นบนหลังคา

## 2.6 สภาพท้องฟ้าและการคายรังสีระหว่างพื้นผิวกับท้องฟ้า

ท้องฟ้า (sky) เปรียบเสมือนพื้นผิวโอบล้อมขนาดใหญ่ (enclose surface) สัดส่วนพื้นที่ของ แผ่นหลังคาเล็กมากเมื่อเทียบกับท้องฟ้า มีบรรยากาศเป็นแหล่งความเย็นที่สำคัญในการแลกเปลี่ยน อุณหภูมิ และไกลออกไปกว่านั้นเรียกว่า "อวกาศ (outer space)" บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกเป็น ตัวกั้นระหว่างอวกาศกับโลก ประกอบด้วยก๊าซต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และฝุ่นละออง

บรรยากาศจะทำหน้าที่คล้ายเรือนกระจก บรรยากาศซึ่งมีไอน้ำอยู่จะทำหน้าที่เป็นร่มหรือหลัง คากันความร้อนที่เข้ามาถึงโลกและที่ออกไปจากโลกด้วย เกิดการสมดุลทางอุณหภูมิของโลกและ บรรยากาศที่ทำให้โลกรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไว้เท่าใดก็จะส่งกลับออกไปสู่อวกาศเท่านั้น (เจริญ เจญร์ชต์ภาคย์, 2536: 19) บรรยากาศมีลักษณะพิเศษแตกต่างไปตามชั้นความสูงโดยใช้ อุณหภูมิ แบ่งออกเป็น 5 ชั้นได้แก่

1. ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere)
2. ชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere)
3. ชั้นเมโซสเฟียร์ (Mesosphere)
4. ชั้นเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere)
5. ชั้นเอ็กโซสเฟียร์ (Exosphere)



แผนภูมิที่ 2 - 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของชั้นบรรยากาศ (ภาพปรับปรุงจาก เจริญ เจริญ รัชต์ภาคย์, 2536: 1)

บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) มีลักษณะสำคัญดังนี้

- คือบริเวณความสูงตั้งแต่พื้นดิน - ความสูงไม่เกิน 12 กิโลเมตร (25,000 ฟุตที่บริเวณขั้วโลก และ 60,000 ฟุตที่บริเวณศูนย์สูตร) ในฤดูร้อนจะมีความสูงมากกว่าฤดูหนาว ดังภาพ
- อุณหภูมิของบรรยากาศในชั้นนี้ลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยจะลดลงประมาณ  $6.5^{\circ}\text{C}$  ต่อกิโลเมตร จนถึงสุดเขตโทรโพสเฟียร์เรียกว่า "โทรโพพอส (Tropopause) บริเวณเส้นศูนย์สูตรจะมีอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศประมาณ  $-80^{\circ}\text{C}$  และ  $-55^{\circ}\text{C}$  บริเวณเส้นศูนย์สูตร (เจริญ เจริญรัชต์ภาคย์, 2536: 1-2)
- บรรยากาศชั้นนี้จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น ฝนหรือพายุ ที่ระดับใกล้ผิวโลกจะมีมวลอากาศมากซึ่งอากาศมีการเคลื่อนไหวทั้งแนวตั้งและแนวนอน



**บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) มีลักษณะสำคัญดังนี้**

- คือบริเวณความสูงจากโทรโพพอส ถึงความสูง 55 กิโลเมตร
- อุณหภูมิและความหนาแน่นของบรรยากาศค่อนข้างคงที่หรือสูงขึ้นเล็กน้อย ไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูง โดยมีค่าอุณหภูมิกอากาศประมาณ  $-45^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-65^{\circ}\text{C}$  บรรยากาศจัดตัวเป็นแผ่น ค่อนข้างเรียบและมีการเคลื่อนไหวตามแนวนอนอย่างเดียวไม่มีเมฆและอยู่สูงจากระดับพายุ
- สุดเขตสตราโตสเฟียร์ซึ่งเรียกว่า "สตราโตพอส (Stratopause)" จะมีก๊าซโอโซนเป็นแนวป้องกันอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต

**บรรยากาศชั้นเมโซสเฟียร์ (Mesosphere) มีลักษณะสำคัญดังนี้**

- คือบริเวณชั้นบรรยากาศที่มีความสูงตั้งแต่ 55-80 กิโลเมตร สุดเขตเมโซสเฟียร์เรียกว่า "เมโซพอส (Mesopause)"
- อุณหภูมิของบรรยากาศลดลงตามความสูง อุณหภูมิที่ประมาณ  $-140^{\circ}\text{C}$

**บรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) หรือไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) มีลักษณะสำคัญดังนี้**

- คือบริเวณชั้นบรรยากาศที่มีความสูงตั้งแต่ 80-800 กิโลเมตร
- อุณหภูมิของบรรยากาศเพิ่มขึ้นตามความสูง ความร้อนในบริเวณนี้เกิดขึ้นจาก ปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้
- ก๊าซในบรรยากาศเริ่มมีการแตกแยกเป็นอิเล็กตรอนและไอออนชั้น (อนุภาคอิสระซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ) เรียกบรรยากาศชั้นนี้ว่า "ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)" ประกอบด้วย ชั้นดี (D-layer) ชั้นอี (E-layer) และชั้นเอฟ (F-layer)ตามความสูงที่ต่างกัน
- บรรยากาศชั้นนี้มีความสำคัญในการสื่อสารระยะไกล เพราะบรรยากาศสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้

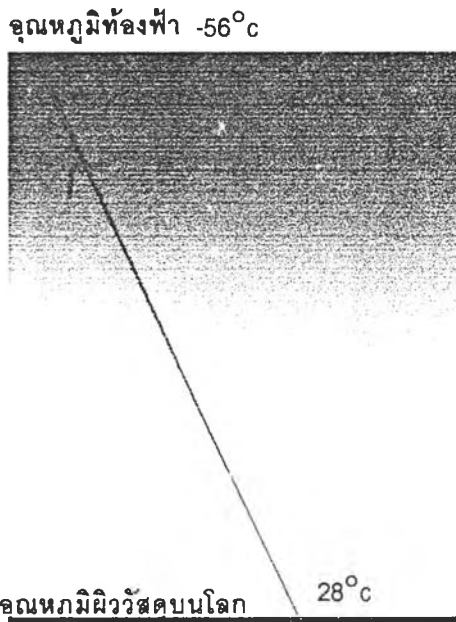
**บรรยากาศชั้นเอ็กโซสเฟียร์ (Exosphere) มีลักษณะสำคัญดังนี้**

- คือบริเวณความสูงตั้งแต่ระดับ 800 กิโลเมตรขึ้นไป
- เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดที่ห่อหุ้มโลก และมี "แนวรังสีแวนแอลเลน" รวมตัวอยู่ในชั้นนี้
- อนุของก๊าซในบรรยากาศจะอยู่แยกกันและจะค่อยๆกลืนกับอวกาศ

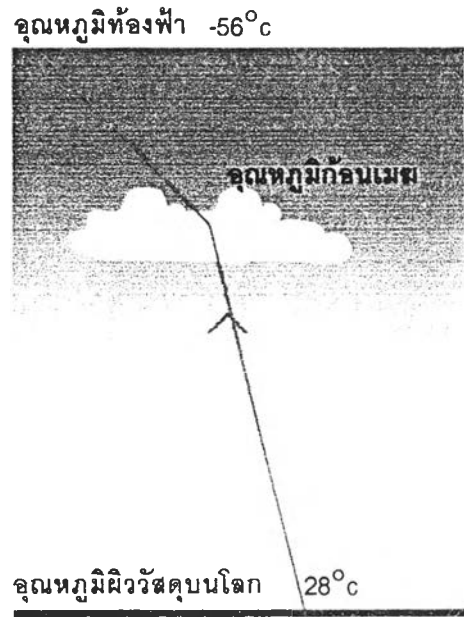
จากลักษณะของบรรยากาศข้างต้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของท้องฟ้าผกผันตามความสูงในชั้นที่ใกล้พื้นโลก อุณหภูมิของท้องฟ้าที่เขตโทรโพพอสจะเป็นแหล่งความเย็นที่สำคัญต่อการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าของพื้นผิววัสดุบนโลก เมื่อท้องฟ้าโปร่งหรือถ้าไม่มีบรรยากาศแล้ว การสูญเสียความร้อนให้กับอวกาศจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งถือว่าดีที่สุด

แต่ในสภาพท้องฟ้าโดยทั่วไป เมฆจะเป็นปรากฏการณ์สำคัญในบรรยากาศที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศที่ลอยตัวสูงขึ้นและเย็นลง รวมกันเห็นเป็นก้อนเมฆ สิ่งสำคัญที่ช่วยในการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นเมฆคือ "อนุภาคกลั่นตัว (condensation nuclear)" ซึ่งเป็นผงขนาดเล็กที่ดูดน้ำในบรรยากาศ คุณสมบัติของบรรยากาศจะมีลักษณะโปร่งใสน้อยกว่าสุญญากาศ เมื่อปริมาณเมฆเพิ่มขึ้น จะเป็นตัวสกัดกั้นการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวหลังคา กับท้องฟ้าลดลง ทำให้ผิวหลังคาแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับก้อนเมฆแทนที่จะแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าโดยตรง สามารถแบ่งสภาพท้องฟ้าจากปริมาณเมฆ ได้แก่

1. สภาพท้องฟ้าโปร่งหรือไม่มีเมฆคลุม (clear sky)
2. สภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน (partly cloudy sky)
3. สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆ (overcast sky)



กรณีที่ 1 สภาพท้องฟ้าแจ่มใส



กรณีที่ 2 สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน



กรณีที่ 3 สภาพท้องฟ้ามีเมฆมาก

ภาพที่ 2-20 แสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า ในสภาพท้องฟ้าที่ต่างกัน

สภาพท้องฟ้าหรืออุณหภูมิของท้องฟ้าจะมีการแปรปรวนตลอดเวลา เนื่องจากการกระจายรังสีของบรรยากาศมีลักษณะไม่มีรูปแบบ (non-uniform) ขึ้นอยู่กับมุม zenith angle และความยาวคลื่น ท้องฟ้าที่อยู่ใกล้แนวระนาบ (Horizontal) จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศใกล้พื้นดิน จากสภาพดังกล่าวทำให้มีการศึกษาอุณหภูมิและการคายรังสีระหว่างอวกาศกับพื้นผิวบนโลกหลายงานวิจัยทั้งต่างประเทศและในประเทศ ตัวอย่างเช่น การศึกษาการคายรังสีโดยบรรยากาศ ที่ประมาณค่าจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวบนโลกกับอุณหภูมิท้องฟ้า เรียกอีกอย่างว่า "อุณหภูมิประสิทธิผล (Effective Sky Temperature;  $T_{sky}$ )" ค่าหนึ่ง โดยประมาณค่าจาก

$$E = \epsilon_{SKY} \sigma T_a^4$$

โดยที่  $T_a$  = อุณหภูมิอากาศ

$$\epsilon_{SKY} = 0.741 + 0.0062 T_{DP} \quad (\text{Berdaul, 1987:4})$$

$$\epsilon_{SKY} = 0.787 + 0.0028 T_{DP} \quad (\text{Givoni,})$$

<sup>9</sup> วัตถุโปร่งใส (Transparent Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถส่งผ่านพลังงานจากการอาบรังสีได้ทั้งหมด (มนตรี อิงเจริญ, 2540: 8)

อุณหภูมิท้องฟ้าเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง อุณหภูมิท้องฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient Temperature) ประมาณค่าได้จากสมการ (Swinbank, 1963 อ้างใน Duffie and Beckman, 1980: 123)

$$T_{SKY} = 0.0552T_a^{1.5}$$

ก็ต่อเมื่อ - มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 25%

อุณหภูมิท้องฟ้าที่มีความสัมพันธ์ของปริมาณไอน้ำในอากาศ (Water Vapor) จะได้สมการที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิที่จุด Dew Point ดังนี้ (Brunt, 1932 และ Bliss, 1961 อ้างใน Duffie and Beckman, 1980:122)

$$T_{SKY} = T_a [0.8 + (T_{dp} - 273)/250]^{1/4}$$

ก็ต่อเมื่อ - มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 25%

- ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิท้องฟ้าเท่ากับ  $10^{\circ}\text{C}$  สำหรับเขตร้อนชื้นและ  $30^{\circ}\text{C}$  สำหรับเขตหนาวแห้ง

อุณหภูมิท้องฟ้าที่ไม่คงที่ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และปริมาณเมฆ ดังนั้น แหล่งพลังงานจากการคายรังสี (Radiative Cooling) ของพื้นผิวหลังคาจะอยู่ในช่วง  $8 - 13 \mu\text{m}$ . สามารถประมาณค่าได้จาก

$$T_{SKY} = T_a [0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013\cos(15t)]^{1/4}$$

(Berdahl and Martin, 1984 อ้างใน Duffie and Beckman, 1991:158)

ก็ต่อเมื่อ - มีอุณหภูมิจุด Dew Point ระหว่าง  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $30^{\circ}\text{C}$

- ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิท้องฟ้าเท่ากับ  $5^{\circ}\text{C}$  สำหรับเขตร้อนชื้นและ  $30^{\circ}\text{C}$  สำหรับเขตหนาวแห้ง

การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิท้องฟ้าสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทยพบว่า อุณหภูมิประสิทธิภาพของท้องฟ้า (Effective Sky Temperature) จะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ อุณหภูมิอากาศ ฤดูกาล จำนวนไอน้ำในบรรยากาศ สามารถประมาณค่าจากสมการ (ศิริชัย เทพา, 2525)

$$T_{sky} = T_a - 6$$

$$T_{sky} = T_a - 20 \text{ (สำหรับฤดูหนาว)}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } T_a &= \text{อุณหภูมิอากาศแห้ง} \\ T_{\text{SKY}} &= \text{อุณหภูมิท้องฟ้า} \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้น ยังไม่มีงานวิจัยสามารถวัดอุณหภูมิท้องฟ้าที่แน่นอนได้ เนื่องจากท้องฟ้าแปรเปลี่ยนตลอดเวลา (Non Uniform) ตามจำนวนเมฆ ฤดูกาล อุณหภูมิอากาศ หรือจำนวนไอน้ำในอากาศ เป็นต้น โดยในการวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดท้องฟ้าเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Unknown Factor) เมื่อกำหนดค่าคงที่  $K = \epsilon \sigma F A$

$$Q = \epsilon \sigma F A (T_r - T_{\text{space}})^4 = (\text{Sky Factor}) * \epsilon \sigma F A (T_a - T_i)^4$$

จะได้

$$Q = K(T_r - T_{\text{space}})^4 = (\text{Sky Factor}) * K(T_a - T_i)^4$$

จากสมการตัวแปรด้านสภาพท้องฟ้าอาจขึ้นอยู่กับวัน เดือน หรือฤดูกาล ทั้งนี้เมฆ (Clouds) จะมีส่วนทำให้อุณหภูมิท้องฟ้าสูงกว่าในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส ดังนั้น ตัวแปรด้านสภาพท้องฟ้าจึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณน้ำค้างบนหลังคา

## 2.7 บทสรุปของการเกิดปริมาณน้ำค้างบนหลังคา

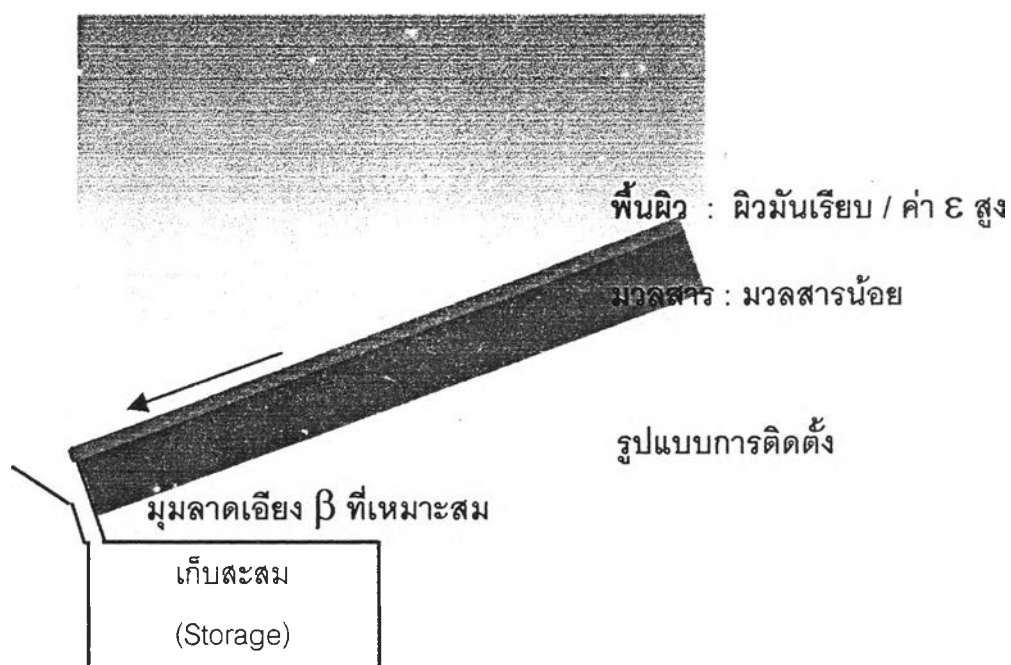
ความสามารถในการทำให้เกิดปริมาณน้ำค้างบนพื้นผิวหลังคาโดยวิธีการทางธรรมชาติ เนื่องจากจากมีวัสดุอุณหภูมิผิวต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ อันได้แก่

- ค่าการคายรังสีของพื้นผิววัสดุ วัสดุเคลือบผิว (coating surface)
- การสะสมความร้อนในมวลสารของวัสดุหลังคา
- มุมเอียงของหลังคา
- ความเร็วลมที่พัดผ่าน
- สภาพท้องฟ้า
- ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างกลางวันและกลางคืน

ดังนั้น สิ่งสำคัญต่อการเกิดน้ำค้างบนหลังคาคือ การทำให้ผิวหลังคาที่อุณหภูมิผิวเย็นที่สุด โดยต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ปัญหาที่เกิดขึ้นจากคราบฝุ่นละออง (Tropical Staining) และหยดน้ำที่เกาะบนหลังคาเป็นหยดๆ ซึ่งถ้ามีมากก็จะทำให้แผ่นหลังคาเปื่อยและขึ้น ทั้งสองอย่างนี้จะเป็นตัว

การสำคัญทำให้การคายรังสีระหว่างแผ่นหลังคากับท้องฟ้าลดลง อีกทั้งทำให้เกิดการกักความร้อน ฉะนั้นจึงต้องทำให้ผิวหลังคาสะอาดอยู่เสมอ และทำให้น้ำค้างที่เกิดขึ้นไหลอย่างรวดเร็วที่สุด การออกแบบและเลือกวัสดุหลังคาจึงต้องคำนึง 3 ปัจจัยคือ

1. การเลือกวัสดุหลังคา ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของพื้นผิวและมวลสารของวัสดุ โดยพื้นผิววัสดุมีความเรียบและมีค่าการคายรังสีคลื่นยาว คือในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3-50  $\mu\text{m}$ . โดยเฉพาะช่วง 8-13  $\mu\text{m}$ . ซึ่งเป็นช่วงที่มีอิทธิพลของการแลกเปลี่ยนความร้อนกับท้องฟ้าได้ดีที่สุด
2. มุมลาดเอียงที่เหมาะสม ระหว่างการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกับท้องฟ้า และการไหลของน้ำค้าง
3. รูปแบบการติดตั้งเพื่อเพิ่มการไหลของน้ำค้าง



ภาพที่ 2- 21 แนวความคิดการใช้ประโยชน์จากน้ำค้างที่เกิดขึ้นบนหลังคา