บทที่ 2

ทฤษฎีการหาค่าความร้อนผ่านรูปร่างรอบนอกของอาคาร

บทนำ

ในการหาค่าความร้อนที่ผ่านรูปร่างรอบนอกของอาคาร จะพิจารณาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งเป็นบริเวณปรับอากาศ(External Heat Gain) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

1. การนำความร้อนผ่านกำแพงทึบและหลังคา

2. การนำความร้อนผ่านช่องกระจก

3. การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ผ่านช่องกระจก

เมื่อพิจารณาพื้นที่รูปร่างรอบนอกของอาคาร (Building Envelope) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นช่องกระจก (Fenestration)

2. ส่วนที่เป็นกำแพงทึบและหลังคา

ฉะนั้น เมื่อพิจารณาถึงความร้อนที่ผ่านรูปร่างรอบนอกของอาคาร สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนผ่านช่องกระจก

2. การถ่ายเทความร้อนผ่านกำแพงทึบและหลังคา

<u>การถ่ายเทความร้อนผ่านช่องกระจก</u>

ความร้อนที่ผ่านช่องกระจกเข้ามาในอาคาร ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และมุมตกกระทบ ความเร็วและทิศทางของลมที่ผิวภายนอกและภายในของกระจก อุณหภูมิแตกต่างระหว่างภายนอกและภายในอาคาร เป็นต้น ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณหาค่าความร้อนผ่านช่องกระจก จะกล่าวถึงตัวประกอบและทฤษฎีการหาค่าตัวประกอบที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนผ่านช่องกระจกก่อน ที่สำคัญได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์

<u>พลังงานแสงอาทิตย์</u>

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง วิธีการคำนวณปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์และตัวประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

คำจำกัดความ

พลังงานแสงอาทิตย์แบบตรง (Beam Radiation or Direct Solar Radiation) คือ พลังงานที่รับได้โดยตรงจากดวงอาทิตย์ โดยทิศทางของพลังงานจากดวงอาทิตย์มาถึงหน่วยรับบนพื้นโลกไม่เปลี่ยนแปลง

พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย (Diffuse Radiation) คือ พลังงานที่ไม่ได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์ แต่รับจากตัวกลางที่ขวางกั้นแสงอาทิตย์ไว้

พลังงานแสงอาทิตย์แบบรวม (Total or Global Solar Radiation) คือ พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงและแบบรังสีกระจายที่รับได้บนระนาบ (โดยทั่วไป จะวัดพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมบนระนาบระดับ ต่อหน่วยเวลา-หน่วยพื้นที่)

มุมเซนิธ (Zenith Angle, θ_z) คือ มุมระหว่างแนวของลำแสงอาทิตย์ที่ทำกับแนวดิ่ง

เวลาสุริยะ (Solar Time) คือ เวลาที่เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เวลาสุริยะ เป็นเวลาที่ถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ของมุมดวงอาทิตย์ ซึ่งจะไม่เป็นเวลาเดียวกับเวลาท้องถิ่น (Local Time) ที่อ่านได้จากนาฬิกา ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเวลาท้องถิ่นให้เป็นเวลาสุริยะเสียก่อน เวลาสุริยะต่างกับเวลาท้องถิ่นมากน้อยขึ้นกับเส้นแวงของสถานที่นั้น ๆ และวันที่ที่การคำนวณนั้นอ้างถึง ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งสองอาจแสดงได้โดยสมการ

เวลาสุริยะ (Solar Time) = เวลาท้องถิ่น (Local Time)

$$\pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad ...(2.1)$$

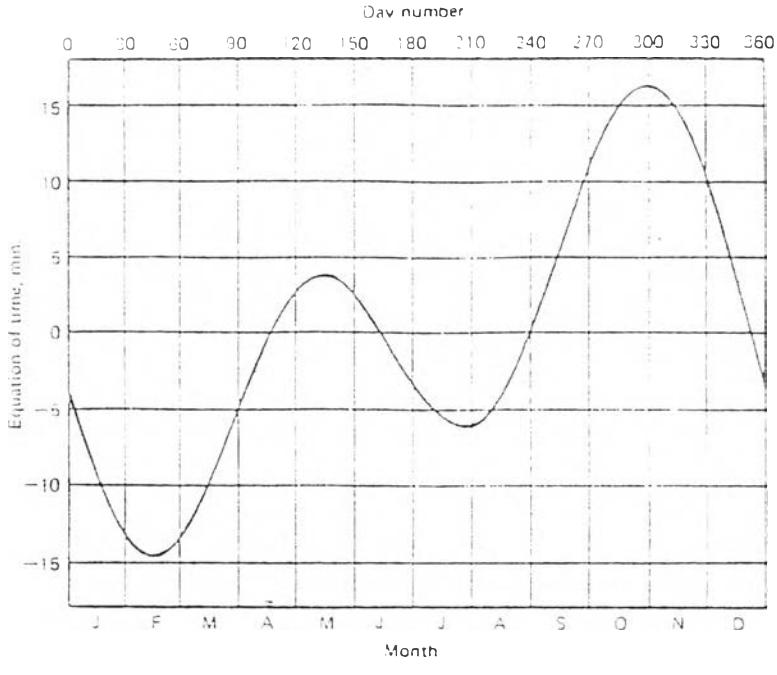
เมื่อ E คือ สมการเวลา (Equation of time) แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 หรือ หาได้จากสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นเทอมที่จะแก้ไขเวลาให้ถูกต้อง เหตุที่ต้องแก้ไข เนื่องจาก โลกหมุนรอบตัวเองและรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะบูดเบี้ยว ทำให้อัตราการหมุนไม่คงที่ L_{st} คือ เส้นแวงมาตรฐานที่เวลาท้องถิ่นอ้างถึง สำหรับประเทศไทยใช้เวลาของเส้นแวง 105 องศาตะวันออก L_{loc} คือเส้นแวงที่สถานที่นั้นตั้งอยู่

$$E = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \quad ...(2.2)$$

เมื่อ

$$B = \frac{360(n-81)}{364}$$

n = จำนวนวันของปี , $1 \leqslant n \leqslant 365$



รูปที่ 2.1 แสดงสมการเวลา, E

ทิศทางของพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรง(Direction of Beam Radiation)

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบที่ทิศทางเฉพาะใด ๆ เมื่อเทียบกับโลกที่เวลาใด ๆ (ไม่ว่าจะเป็นระนาบที่อยู่กับที่หรือเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับโลกก็ตาม) กับพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้รับ, นั่นคือตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยมุมต่าง ๆ โดยที่มุมต่าง ๆ และความสัมพันธ์ระหว่างมุมมีดังนี้

ϕ เส้นรุ้ง (Latitude) คือ ตำแหน่งเชิงมุมทางเหนือหรือใต้ของเส้นศูนย์สูตร, โดยทางเหนือของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ ซึ่งมีค่าระหว่าง $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$

δ เดคคลีเนชั่น (Declination) คือ มุมที่เกิดระหว่างแนวต่อศูนย์กลางของโลกกับดวงอาทิตย์ทำกับระนาบศูนย์สูตร เมื่อเวลาเที่ยงสุริยะ, โดยทางเหนือของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ มีค่าระหว่าง $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$

β มุมเอียงของระนาบ (Slope) คือ มุมของระนาบที่ทำกับแนวระดับมีค่าระหว่าง $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$ ($\beta > 90^{\circ}$ แสดงว่าระนาบหันหน้าลง)

γ มุมแอสซิมุธของระนาบ (Surface azimuth angle) คือมุมที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของแนวฉาย(Projection) บนระนาบระดับของเส้นตั้งฉากกับผิวระนาบจากแนวเมอริเดียน (Local Meridian) มุมนี้มีค่าเป็นศูนย์ถ้าแนวของรูปฉายชี้ไปทางทิศใต้ มีค่าเป็นบวกถ้าชี้ไปทางทิศตะวันตกของทิศใต้ และเป็นลบถ้าชี้ไปทางทิศตะวันออกของทิศใต้ มุมนี้มีค่าระหว่าง $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$

ω มุมของเวลา (Hour angle) คือ มุมที่เกิดจากแนวฉายของเส้นที่ลากจากศูนย์กลางของโลกไปยังตำแหน่งใด ๆ บนผิวโลกทำกับแนวต่อระหว่างศูนย์กลางของโลกและดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงสุริยะ ที่เวลาเที่ยงสุริยะมุมนี้จะเป็นศูนย์และจะเพิ่ม 15° ทุก ๆ ชั่วโมง โดยทางด้านเวลาเช้าจะเป็นลบ และเวลาทางบ่ายจะเป็นบวก

θ มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ (Angle of incidence) คือ มุมที่เกิดจากแนวของแสงอาทิตย์ทำกับแนวของเส้นตั้งฉากของระนาบ

มุมเซนิธ (Zenith angle), มุมเอียงของระนาบ (Slope) และมุมแอสซิมุธของระนาบ(Surface azimuth angle) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เดคคลีเนชั่น (Declination), δ, สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\delta = 23.45\sin(360.\frac{284+n}{365}) \quad \ldots.(2.3)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนวันของปี เพื่อความสะดวก n สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 (หรือจากรูปที่ 2.3)

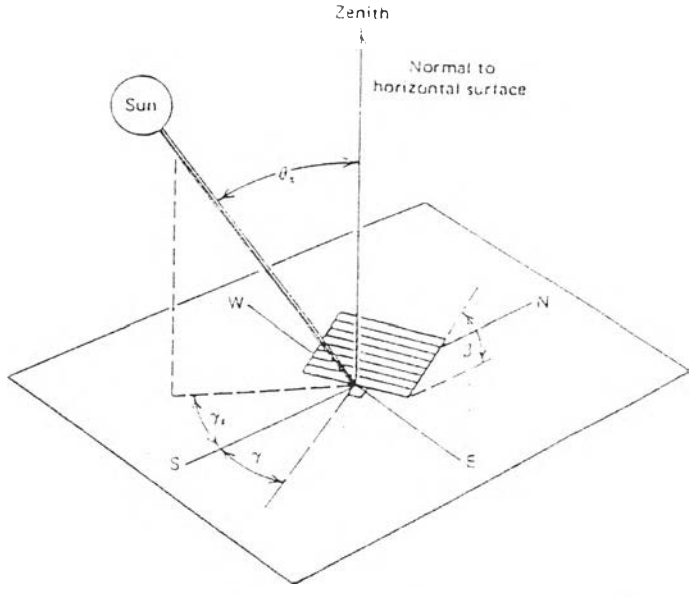
สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์, θ, กับมุมอื่น ๆ มีดังนี้

$$\begin{aligned}\cos\theta = {} & \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma \\ & + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega \\ & + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \quad \ldots.(2.4)\end{aligned}$$

มุมที่จะกล่าวถึงเพิ่มเติมได้แก่ มุมแอสซิมุธของดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle), γ_s, คือ มุมที่เกิดจากแนวฉายของแนวแสงอาทิตย์บนระนาบระดับทำกับแนวเมอริเดียน โดยที่มุมนี้จะเป็นศูนย์เมื่อแนวของรูปฉายชี้ไปทางทิศใต้ จะมีค่าเป็นบวกเมื่อชี้ไปทางทิศตะวันตกของทิศใต้ และมีค่าเป็นลบถ้าชี้ไปทางทิศตะวันออกของทิศใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

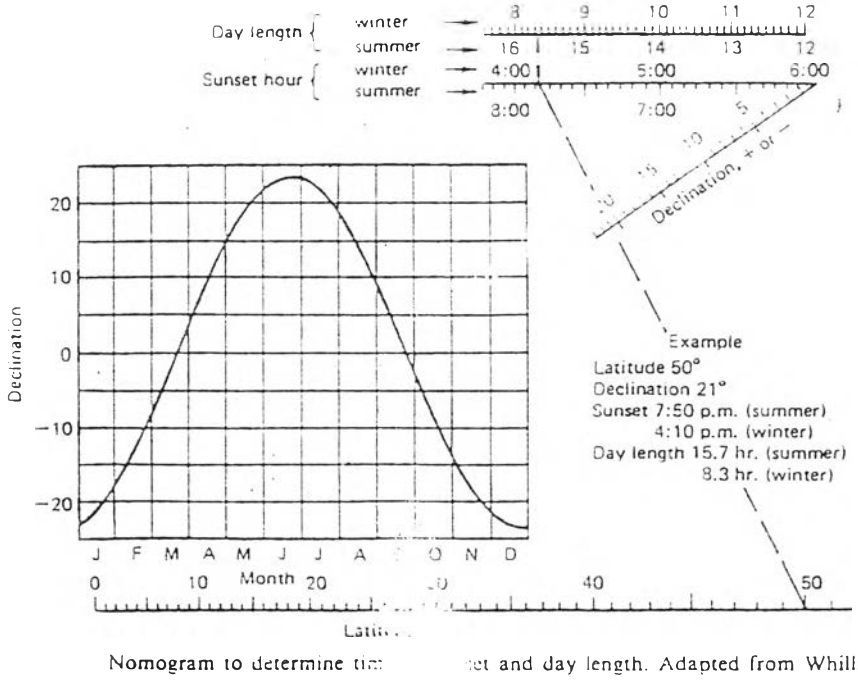
ในกรณีที่ระนาบวางอยู่บนพื้นระดับ มุมเอียงระนาบ β เป็นศูนย์, มุมตกกระทบจะเป็นมุมเซนิธ, θ_z, แทนค่า $\beta = 0$ ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$\cos\theta_z = \cos\delta\cos\phi\cos\omega + \sin\delta\sin\phi \quad \ldots.(2.5)$$



Zenith angle, slope, surface azimuth angle and solar azimuth angle for a tilted surface.

รูปที่ 2.2 แสดงมุมต่าง ๆ ของระนาบกับดวงอาทิตย์



Nomogram to determine tim et and day length. Adapted from Whillier, Solar Energy 9, 164 (1965).

รูปที่ 2.3 แสดงโนโมแกรม

จากสมการที่ (2.5) นี้ สามารถนำไปคำนวณมุมของดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก(Sunrise or Sunset Hour Angle), ω_s ได้ โดยขณะที่ดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก มุม θ_z จะเท่ากับ 90° แทนค่า θ_z ลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$\cos\omega_s = -\frac{\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta} = -\tan\phi\tan\delta \quad \ldots.(2.6)$$

และความยาวของช่วงเวลากลางวัน N สามารถคำนวณได้โดย

$$N = \frac{2}{15}\cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta) \quad \ldots.(2.7)$$

เพื่อความสะดวก Whillier (4) ได้คิด โนโมแกรม(Nomogram) ขึ้น เพื่อใช้คำนวณหาความยาวของช่วงเวลากลางวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าวันเฉลี่ยของทุกเดือน

Recommended Average Days for Each Month [from Klein (1976)] and Values of n by Months

Month	n for ith Day of Month[a]	For the Average Day of the Month		
		Date	n, Day of Year[b]	δ, Declination
January	i	17	17	−20.9
February	$31 + i$	16	47	−13.0
March	$59 + i$	16	75	−2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	−9.6
November	$304 + i$	14	318	−18.9
December	$334 + i$	10	344	−23.0

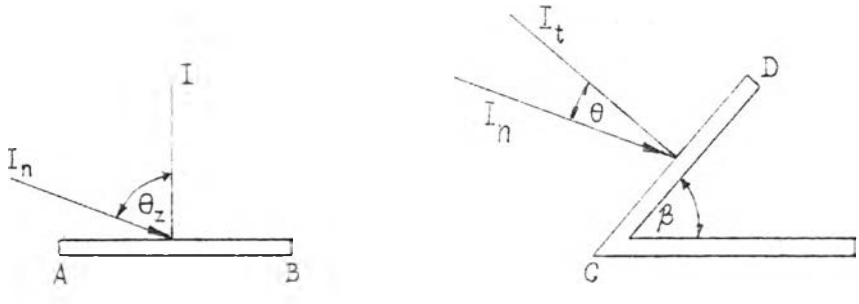
[a] The average day is that day which has the extraterrestrial radiation closest to the average for the month.

[b] These do not account for leap year; values of n from March onward for leap years can be corrected by adding 1. Declination values will also shift slightly.

อัตราส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรงบนระนาบเอียงต่อระนาบระดับ (Ratio of beam radiation on tilted surface to that on horizontal surface)

โดยทั่วไป การวัดหรือการประเมินค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ จะกระทำบนระนาบระดับ ข้อมูลส่วนใหญ่ทั่วไปจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมรายชั่วโมงหรือรายวันบนระนาบระดับ ซึ่งจะใช้หาพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวม, แบบตรง และแบบกระจายบนระนาบใด ๆ ต่อไป

รูปที่ 2.4 AB เป็นระนาบระดับ และ CD เป็นระนาบเอียงเป็นมุม I_n เป็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงที่ตกบนระนาบระดับทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบระดับเป็น θ_z และระนาบเอียงเป็น θ



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทาง I_n บนระนาบระดับและระนาบเอียง

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ระนาบเอียงและระนาบระดับได้รับ จึงกำหนดให้ R_b เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ตกบนระนาบเอียงต่อพลังงานที่ตกบนระนาบระดับ ดังนั้น

$$R_b = \frac{I_t}{I} = \frac{I_n \cos\theta}{I_n \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \qquad \ldots.(2.8)$$

ซึ่งค่า $\cos\theta$ และ $\cos\theta_z$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5)

อัตราส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์แบบทั้งหมดบนระนาบเอียงต่อระนาบระดับ (Ratio of total radiation on tilted surface to that on horizontal surface)

การคำนวณอัตราส่วนของพลังงานแบบรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อบนระนาบระดับได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น การคำนวณหาอัตราส่วนของพลังงานแบบรังสีกระจายบนระนาบเอียงต่อบนระนาบระดับจะได้กล่าวในหัวข้อนี้ การคำนวณทำแบบตรงไปตรงมาแบบการคำนวณสำหรับรังสีตรงไม่ได้ เพราะทิศทางของรังสีกระจายไม่แน่นอน เพื่อที่จะให้การคำนวณดำเนินต่อไปโดยสะดวกจึงกำหนดสมมุติฐานขึ้น 2 ข้อ คือ

1. สำหรับวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส(ไม่มีเมฆ) พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายมีจุดกำเนิดจากบริเวณรอบดวงอาทิตย์

2. วันที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใส(มีเมฆปกคลุม) พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะมีจุดกำเนิดจากบรรยากาศ หรือ จากท้องฟ้า

ตามสมมุติฐานข้อที่ 1 พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มีจุดกำเนิดจากบริเวณรอบดวงอาทิตย์ จะมีลักษณะคล้ายกับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรง ทิศทางของพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจาย จึงเหมือนกับของพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรง ดังนั้น อัตราของพลังงานทั้งหมดที่ได้รับบนระนาบเอียงต่ออัตราพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนระนาบระดับจึงเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงที่รับได้บนระนาบเอียง ต่อพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงที่รับได้บนระนาบระดับ

ตามสมมติฐานข้อที่ 2 ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 กรณี กรณีแรก พื้นโดยรอบระนาบมีคุณสมบัติเหมือนกับบรรยากาศโดยรอบระนาบ คือ รับพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้ว จึงปล่อยพลังงานให้ระนาบอีกทอดหนึ่ง ดังนั้น ระนาบจึงได้รับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจายจากท้องฟ้าและพื้นโดยรอบระนาบ พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่รับได้บนระนาบเอียง คือ

$$I_t = I_b R_b + I_d \qquad ....(2.9)$$

อัตราส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดรับได้บนระนาบเอียงต่อพลังงานแสงอาทิตย์รับได้บนระนาบระดับ คำนวณได้จากสมการ

$$R = \frac{I_t}{I} = \frac{I_b R_b}{I} + \frac{I_d}{I} \qquad ....(2.10)$$

เมื่อ I_t = พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดรับได้บนระนาบเอียง

I_b = พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงรับได้บนระนาบระดับ

I_d = พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจายรับได้บนระนาบระดับ

กรณีที่ 2 สมมุติว่าพื้นโดยรอบระนาบไม่มีคุณสมบัติทางรับพลังงานแสงอาทิตย์แล้วส่งต่อเหมือนกรณีแรก แต่มีคุณสมบัติทางสะท้อนแสงเพียงอย่างเดียว สมการสำหรับคำนวณอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดสำหรับกรณีนี้ ต้องเพิ่มจากเดิมที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.9) อีก 2 เทอม คือ เทอมแรก พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจายที่แผ่รังสีจากท้องฟ้าเท่ากับ $I_d(1+\cos\beta)/2$ และเทอมที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงและแบบรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นโดยรอบระนาบเท่ากับ $(I_b+I_d)(1-\cos\beta)\rho/2$ ดังนั้น

$$I_t = I_b R_b + I_d(1+\cos\beta)/2 + (I_b+I_d)(1-\cos\beta)\rho/2 \qquad .....(2.11)$$

013816

และ

$$R = \frac{I_b R_b}{I} + (I_d/I)(1+\cos\beta)/2 + (1-\cos\beta)\rho/2 \quad \ldots.(2.12)$$

เมื่อ β = มุมเอียงของระนาบ ρ = คุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นโดยรอบระนาบ

สำหรับค่า ρ Liu และ Jordan (4) ได้แนะนำให้ใช้ค่า $\rho = 0.2$ เมื่อไม่มีหิมะปกคลุม และ $\rho = 0.7$ เมื่อมีหิมะใหม่ ๆ ปกคลุม

การส่งรังสีผ่านตัวกลางที่โปร่งใสบางส่วน(Transmission of radiation)

ค่าการผ่านทะลุ การสะท้อนและการดูดกลืนรังสี เป็นฟังชั่นของความยาวคลื่น มุมของรังสีตกกระทบ ความหนา ดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญหาย (extinction coefficient,K) ของวัสดุ โดยทั่วไป ดัชนีหักเห,n, และสัมประสิทธิ์การสูญหาย,K ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสี อย่างไรก็ดี ค่า n และ K จะสมมุติให้ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ดีสำหรับกระจก

การสะท้อนของพลังงานรังสี(Reflection of radiation)

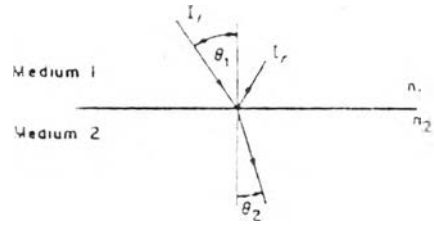
สำหรับผิวเรียบ Fresnel (4)ได้หาความสัมพันธ์สำหรับการสะท้อนกลับของรังสีอันโพลาไรซ์(Unpolarized radiation) ที่ผ่านจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 ดังนี้

$$r_\perp = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \ldots.(2.13)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \ldots.(2.14)$$

$$r = \frac{I_r}{I_1} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad \ldots.(2.15)$$

เมื่อ I_1 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบผิว I_r คือ ความเข้มที่สะท้อนกลับจากผิว θ_1 และ θ_2 เป็นมุมตกกระทบและมุมหักเห ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงมุมตกกระทบและมุมหักเหในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 และ n_2

สมการที่ (2.13) แสดงถึงส่วนที่ตั้งฉากของรังสีอันโพลาไรซ์ (perpendicular component of unpolarized radiation), $r_{\perp}$ และสมการที่ (2.14) แสดงถึงส่วนที่ขนานของรังสีอันโพลาไรซ์ (parallel component of unpolarized radiation), $r_{\parallel}$ (ส่วนที่ขนานและตั้งฉากหมายถึงระนาบที่ถูกกำหนดโดยรังสีตกกระทบ และเส้นที่ตั้งฉากกับผิว) สมการที่ (2.15) เป็นค่าสะท้อนกลับของรังสีอันโพลาไรซ์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสองส่วนที่จะกล่าวถึงนี้ สำหรับมุม θ_1 และ θ_2 นี้สัมพันธ์กับดัชนีหักเห โดยกฎของสเนล (Snell's law) ดังนี้

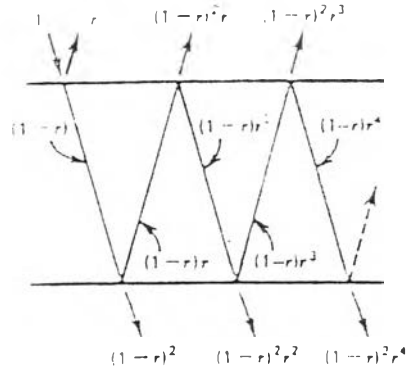
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} \quad \ldots.(2.16)$$

ดังนั้น ถ้าทราบมุมตกกระทบและดัชนีหักเห ก็จะสามารถหาค่าการสะท้อนกลับระหว่างผิวเดียวได้

การส่งผ่านรังสีซึ่งมีส่วนต่อระหว่างผิว 2 ด้าน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสะท้อน ที่มุมตกกระทบใด ๆ นอกจากตกกระทบในแนวตั้งฉากกับผิว รังสีที่สะท้อนระหว่างผิวจะแตกต่างกันไปสำหรับทุก ๆ ส่วนของรังสีโพลาไรซ์ ดังนั้นรังสีที่ผ่านทะลุและสะท้อนกลับจะกลายเป็นรังสีโพลาไรซ์บางส่วน จึงจำเป็นต้องคิดรังสีโพลาไรซ์ทุก ๆ ส่วนแยกจากกัน

เมื่อไม่คำนึงถึงการดูดกลืนในวัสดุ จากรูปที่ 2.6 พิจารณาในช่วงเวลาขณะหนึ่งเพียงส่วนที่ตั้งฉากของรังสีโพลาไรซ์ที่ได้รับเท่านั้น, $(1-r_\perp)$ ของรังสีตกกระทบที่มาถึงส่วนต่อระหว่างผิวที่สอง, $(1-r_\perp)^2$ จะผ่านส่วนต่อระหว่างผิวนี้ และ $r_\perp(1-r_\perp)$ จะสะท้อนกลับไปยังส่วนต่อระหว่างผิวแรก และจะเป็นแบบนี้เรื่อยไป ดังนั้นค่าการผ่านทะลุของส่วนที่ตั้งฉากของรังสีโพลาไรซ์จะเป็น

$$\tau_\perp = (1-r_\perp)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r^{2n} = \frac{(1-r_\perp)^2}{(1-r_\perp^2)} = \frac{1-r_\perp}{1+r_\perp} \quad ..(2.17)$$



รูปที่ 2.6 แสดงการส่งผ่านในตัวกลาง

ในทำนองเดียวกัน ส่วนที่ขนานของรังสีโพลาไรซ์ ก็สามารถพิจารณาได้แบบเดียวกัน ดังนั้นค่าการผ่านทะลุของรังสีอันโพลาไรซ์จะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าการ

ผ่านทะลุของทั้งสองส่วนนี้

$$\tau_r = \frac{1}{2}\left[\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}}\right] \quad \ldots.(2.18)$$

เมื่อตัวห้อยท้าย r หมายถึงพิจารณาค่าการสะท้อนเพียงอย่างเดียว

การดูดกลืนรังสี(Absorption of radiation)

บอยเย่อ (Bouger) (4) ได้บรรยายการดูดกลืนรังสีในตัวกลางที่โปร่งใสเพียงบางส่วนและได้ตั้งข้อสมมุติไว้ว่ารังสีที่ถูกดูดจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มที่เกิดขึ้นในตัวกลาง และระยะทางที่รังสีเคลื่อนไปในตัวกลาง, x

$$dI = IKdx \quad \ldots.(2.19)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ของการสูญหายไป และมีค่าคงที่ตลอดคลื่นแสงอาทิตย์ (Solar spectrum)

เมื่ออินทิเกรทสมการ(2.19) ระหว่าง x = 0 ถึง x = L/cos θ_2 จะได้

$$\tau_a = \frac{I}{I_1} = e^{-KL/\cos\theta_2} \quad \ldots.(2.20)$$

เมื่อตัวห้อยท้าย a หมายถึงพิจารณาค่าการดูดกลืนเพียงอย่างเดียว สำหรับกระจก ค่า K เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแก้ว คือ 4 m^{-1} สำหรับกระจกใส (water white glass) และ 32 m^{-1} สำหรับกระจกสีเขียวอ่อน(greenish cast of edge)

คุณสมบัติทางแสงของวัสดุตัวกลาง

ค่าการผ่านทะลุ, การสะท้อนและการดูดกลืนของวัสดุตัวกลาง, เมื่อคำนึงถึงทั้งการสะท้อนและการดูดกลืน, สามารถหาได้ในทำนองเดียวกับสมการที่ (2.17) สำหรับส่วนที่ขนานของรังสีโพลาไรซ์, ค่าการผ่านทะลุ, $\tau_{\parallel}$, ค่าการสะท้อน, $\rho_{\parallel}$ และค่าการดูดกลืน, $\alpha_{\parallel}$, ของวัสดุตัวกลาง มีค่าดังนี้

$$\tau_{\parallel} = \frac{\tau_a (1-r_{\parallel})^2}{1-(r_{\parallel}\tau_a)^2} = \tau_a \left[\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}}\right]\left[\frac{1-r_{\parallel}^2}{1-(r_{\parallel}\tau_a)^2}\right] \quad ....(2.21)$$

$$\rho_{\parallel} = r_{\parallel} + \frac{(1-r_{\parallel})^2 \tau_a^2 r_{\parallel}}{1-(r_{\parallel}\tau_a)^2} = r_{\parallel}(1+\tau_a\tau_{\parallel}) \quad ....(2.22)$$

$$\alpha_{\parallel} = (1-\tau_a)\left[\frac{1-r_{\parallel}}{1-r_{\parallel}\tau_a}\right] \quad ....(2.23)$$

ในทำนองเดียวกัน ส่วนที่ตั้งฉากของรังสีโพลาไรซ์ สามารถหาได้โดยวิธีเดียวกัน สำหรับรังสีโพลาไรซ์ที่ตกกระทบสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของส่วนทั้งสอง

การหาค่าการผ่านทะลุในสมการที่ (2.21) สามารถทำให้ง่ายลงได้ โดยที่เทอมสุดท้ายในสมการมีค่าใกล้เคียง 1 และส่วนใหญ่ τ_a จะมีค่ามากกว่า 0.9 ดังนั้นค่าการผ่านทะลุจะเป็น

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad ....(2.24)$$

สำหรับการดูดกลืนของพลังงานรังสี สามารถทำให้ง่ายลงโดยเทอมสุดท้ายในสมการที่ (2.23) มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้น

$$\alpha \cong 1-\tau_a \qquad \ldots.(2.25)$$

ค่าละท้อนสามารถหาได้จากสมการ $= 1-\alpha-\tau$ ดังนั้น

$$\rho \cong \tau_a(1-\tau_r) = \tau_a - \tau \qquad \ldots.(2.26)$$

ค่าการผ่านทะลุสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจาย(Transmittance for diffuse radiation)

ในหลักการ, จำนวนปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านวัสดุตัวกลางสามารถคำนวณได้โดยอินทิเกรทพลังงานที่ส่งผ่านตลอดทุกมุม อย่างไรก็ดี, โดยทั่วไปจะไม่สามารถรู้ถึงการกระจายเชิงมุมของพลังงานรังสีได้

ถ้าพลังงานรังสีตกกระทบมีคุณสมบัติเป็นไอโซโทรปิค (Isotropic) การอินทิเกรทสามารถกระทำได้ การแสดงผลอย่างง่าย ๆ สามารถกระทำได้โดยกำหนดเป็นมุมเทียบเท่า (equivalent angle) สำหรับพลังงานรังสีแบบตรงซึ่งให้ค่าการผ่านทะลุเหมือนพลังงานรังสีแบบกระจาย

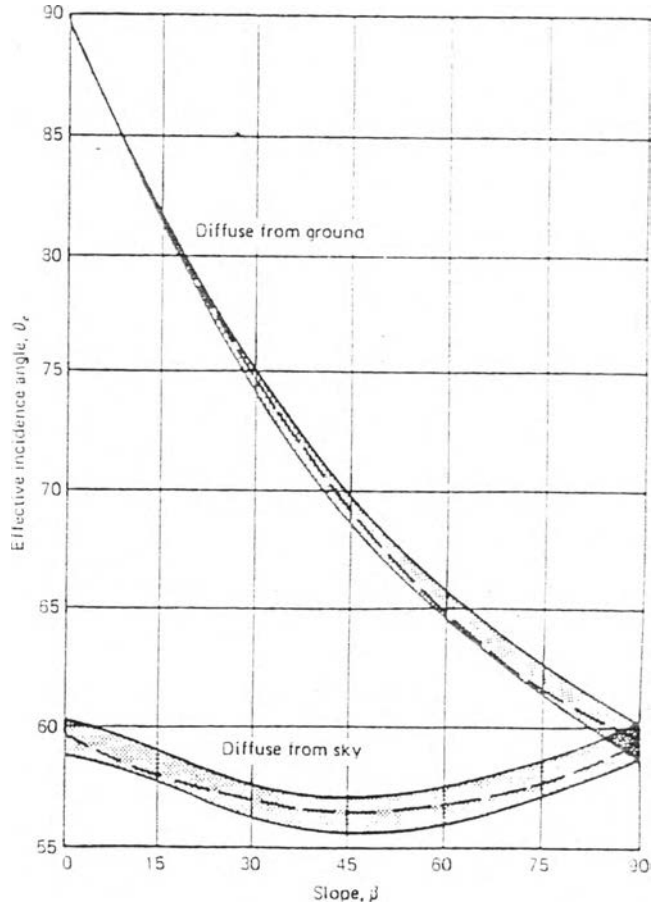
Brandemuehl และ Beckman (4) แสดงผลดังในรูปที่ 2.7 ในเทอมของมุมตกกระทบประสิทธิผล (effective beam radiation incidence angle) ซึ่งได้คำนวณมาจากกระจกหลาย ๆ ชนิด เส้นประในรูปสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$\theta_e = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \qquad \ldots.(2.27)$$

สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้น และ

$$\theta_e = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \qquad \ldots.(2.28)$$

สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายจากฟ้า



รูปที่ 2.7 แสดงมุมตกกระทบประสิทธิผลของพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย

<u>การหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านช่องกระจก</u>

หัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบ ซึ่งใช้ในการหาค่าความร้อนผ่านกระจก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและวิธีการในการหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านช่องกระจก

การทำสมดุลย์ทางความร้อนช่องกระจก (Fenestration Heat Balance)

ที่เวลาใด ๆ การทำสมดุลย์ความร้อนระหว่างพื้นที่ 1 หน่วยของ

กระจกกับสภาวะแวดล้อมทางความร้อน สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.8 คือ

$$I_t + U_f(t_o - t_i) = \dot{q}_{fR} + \dot{q}_{fs} + \dot{q}_{fT} + \dot{q}_{fRCo} + \dot{q}_{fRCi} \quad ....(2.29)$$

เมื่อ $\dot{q}_{fR}$, $\dot{q}_{fs}$ และ $\dot{q}_{fT}$ คือความร้อนที่ถูกสะท้อนกลับ, สะสมในกระจกและผ่านทะลุกระจกตามลำดับ I_t เป็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบบนกระจก U_f เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกระจก t_o และ t_i เป็นอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในบริเวณปรับอากาศตามลำดับ

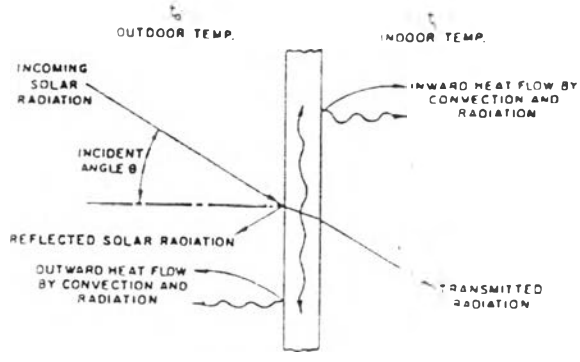
โดยทั่วไป, $\dot{q}_{fs}$ มีขนาดน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ เทอม $\dot{q}_{fRCo}$ และ $\dot{q}_{fRCi}$ คืออัตราการไหลของความร้อนสู่ภายนอกและภายในตามลำดับโดยการพาและการแผ่รังสี อัตราความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศภายนอกเป็นผลรวมของความร้อนที่สะท้อนกลับ, $\dot{q}_{fR}$ และความร้อนที่เกิดจากการพาและแผ่รังสีสู่ภายนอก, $\dot{q}_{RCo}$

ดังนั้นอัตราความร้อนรวมที่เกิดขึ้นผ่านกระจกใด ๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

ความร้อนที่ผ่านกระจกทั้งหมด = พลังงานแสงอาทิตย์ผ่านทะลุกระจก
+ ความร้อนที่ระบายสู่ภายใน-
เนื่องจากการพาและการแผ่รังสี
จากผิวกระจกภายใน

$$\dot{q}_f = H_t + \dot{q}_{fRCi} \quad ....(2.30)$$

เมื่อ H_t หมายถึง พลังงานแสงอาทิตย์ผ่านทะลุกระจก



รูปที่ 2.8 แสดงสมดุลย์ทางความร้อนของกระจกที่ถูกแสงแดดที่เวลาใด ๆ

สมการนี้สามารถเขียนใหม่ได้ เป็น

ความร้อนที่ผ่านกระจกทั้งหมด = พลังงานแสงอาทิตย์ผ่านทะลุกระจก
+ ความร้อนที่ระบายสู่ภายใน-
เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่
ถูกดูดกลืน
+ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก-
อุณหภูมิอากาศที่แตกต่างระหว่าง
ภายนอกและภายใน

สำหรับกระจกชั้นเดียว

$$\dot{q}_f = H_t + N_1(\alpha I_t) + U_f(t_o - t_1) \qquad \ldots.(2.31)$$

เมื่อ N_1 เป็นเศษส่วนความร้อนที่ไหลเข้าสู่ภายในเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ สำหรับกระจกชั้นเดียวที่ไม่มีร่มเงา $N_1 = U_f/h_o$

จากสมการที่ (2.31) จะเห็นว่าสองเทอมแรกในสมการ จะเกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ ในขณะที่เทอมที่ 3 เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีแสงอาทิตย์หรือ

ไม่ก็ตาม ดังนั้น สมการที่ (2.31) สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นดังนี้

ความร้อนที่ผ่านกระจกทั้งหมด = ความร้อนที่ได้รับเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์
+ ความร้อนที่ได้รับเนื่องจากการนำความร้อน

ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{q}_f = FI_t + U_f(t_o - t_i) \quad \ldots.(2.32)$$

เมื่อ $\dot{q}_f$ = อัตราความร้อนที่ผ่านกระจกที่เวลาใด ๆ , W/m^2

F = อัตราส่วนความร้อนที่ได้รับเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ

ค่า F นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระจกและจะเปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากค่าการผ่านทะลุและค่าการดูดกลืนของกระจกขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับกระจกชั้นเดียว

$$F = \tau + U_f\alpha/h_o \quad \ldots.(2.33)$$

เมื่อแทนค่า F ลงในสมการ (2.32) จะได้

$$\dot{q}_f = \tau I_t + \frac{U_f\alpha I_t}{h_o} + U_f(t_o - t_i) \quad \ldots.(2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) จากการคำนวณจะพบว่า เทอม $U_f\alpha I_t/h_o$

มีค่าน้อยมาก* เมื่อเทียบกับเทอมแรกคือ $C I_t$ (หรืออีกนัยหนึ่ง H_t) จนลามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น สมการที่ใช้ในการหาค่าความร้อนผ่านกระจกจะเป็นดังนี้

ความร้อนที่ผ่านกระจกทั้งหมด = พลังงานแสงอาทิตย์ผ่านทะลุกระจก
+ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก-
อุณหภูมิอากาศที่แตกต่างระหว่าง
ภายนอกกับภายใน

$$\dot{q}_f = I_t + U_f (t_o - t_i) \qquad ....(2.35)$$

แฟคเตอร์แสงอาทิตย์และสัมประสิทธิ์ร่มเงา (Solar Factor and Shading Coefficients)

ในการคำนวณหาค่าความร้อนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านช่องกระจกแบบใด ๆ และมีอุปกรณ์บังแดด เพื่อความสะดวก, จะคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับกระจกอ้างอิงซึ่งไม่มีร่มเงา สำหรับกระจกอ้างอิงนี้จะใช้กระจกใสหนา 3 mm.

สัมประสิทธิ์ร่มเงา (Shading Coefficients, SC) หมายถึงอัตราส่วนของความร้อนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านช่องกระจกแบบใด ๆ และมีอุปกรณ์บังแดดต่อความร้อนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกใส-หนา 3 mm. ที่ไม่มีร่มเงา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$SC = \frac{\text{ความร้อนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านช่องกระจกแบบใด ๆ และมีอุปกรณ์บังแดด}}{\text{ความร้อนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกใสหนา 3 mm. ที่ไม่มีร่มเงา}} \qquad ....(2.36)$$

* รายละเอียดการคำนวณดูได้จากบทการคำนวณ

โดยทั่วไป, ค่าสัมประสิทธิ์ร่มเงา, SC, ของช่องกระจกแบบใด ๆ สามารถหาได้จากผลคูณของสัมประสิทธิ์ร่มเงาของกระจกเองและสัมประสิทธิ์ร่มเงาประสิทธิผลของอุปกรณ์บังแดดภายนอก (Effective Shading Coefficient of External Shading Device) ดังนี้

$$SC = SC_1 \times SC_2$$

เมื่อ SC = สัมประสิทธิ์ร่มเงาของช่องกระจกแบบใด ๆ

SC_1 = สัมประสิทธิ์ร่มเงาของกระจก

SC_2 = สัมประสิทธิ์ร่มเงาประสิทธิผลของอุปกรณ์บังแดดภายนอก*

สำหรับความร้อนที่ได้รับเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านกระจกใส-หนา 3 mm. จะเรียกว่าแฟคเตอร์แสงอาทิตย์(Solar Factor, SF) ดังนั้น ช่องกระจกแบบใด ๆ ความร้อนที่ได้รับเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้ดังนี้

ความร้อนที่ได้รับเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ = สัมประสิทธิ์ร่มเงาของช่องกระจก x แฟคเตอร์แสงอาทิตย์ ....(2.37)

และความร้อนที่ได้รับทั้งหมดที่เวลาใด ๆ จะเป็น

$$\dot{q}_f = U_f (t_o - t_i) + SC.SF \qquad ....(2.38)$$

<u>ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกำแพงทึบหรือหลังคา</u>

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวประกอบ ทฤษฎีและวิธีการหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกำแพงทึบหรือหลังคา

* ในวิทยานิพนธ์นี้ จะไม่คำนึงถึงอุปกรณ์บังแดดภายในอาคาร

อุณหภูมิโซล-แอร์ (Sol-Air Temperature)

เทคนิคในการหาความร้อนที่ผ่านกำแพงและหลังคาภายนอกเกี่ยวข้องกับแนวความคิดในเรื่องอุณหภูมิโซล-แอร์ อุณหภูมิโซล-แอร์ คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอกที่ไม่คิดการแลกเปลี่ยนพลังงานรังสีใด ๆ แต่ให้อัตราความร้อนเข้าสู่ผิวเช่นเดียวกับผลรวมจริงของพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบ การแลกเปลี่ยนพลังงานรังสีกับท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อมภายนอกอื่น ๆ และการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน การทำสมดุลย์ความร้อนที่ผิวที่ถูกแสงแดดจะให้อัตราไหลของความร้อนเข้าสู่ผิว q_w/A มีหน่วยเป็น W/m^2 ดังนี้

$$q_w/A = \alpha I_t + h_o (t_o - t_s) - \varepsilon \Delta R \qquad ....(2.39)$$

เมื่อ α = ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ของผิว

I_t = พลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบบนผิว, W/m^2

h_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีคลื่นยาวและการพาที่ผิวภายนอก, $W/m^2 - °C$

t_o = อุณหภูมิอากาศภายนอก, °C

t_s = อุณหภูมิที่ผิว, °C

ε = ค่าการปล่อยรังสีแบบครึ่งทรงกลมของผิว

ΔR = ค่าแตกต่างระหว่างพลังงานรังสีคลื่นยาวที่ตกกระทบบนผิวจากท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อมกับพลังงานรังสีที่ปล่อยจากวัตถุดำที่อุณหภูมิอากาศภายนอก, W/m^2

สมมุติว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายได้ในเทอมของอุณหภูมิโซล-แอร์, t_e

$$q_w/A = h_o (t_e - t_s) \qquad ....(2.40)$$

จากสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$t_e = t_o + \alpha I_t / h_o - \varepsilon \Delta R / h_o \quad \ldots.(2.41)$$

สำหรับระนาบระดับ ผิวจะรับพลังงานรังสีคลื่นยาวจากท้องฟ้าเท่านั้น ค่า ΔR จะมีค่าประมาณ 63 W/m^2 ดังนั้น ถ้า $\varepsilon = 1$ และ $h_o = 17$ เทอมสุดท้ายจะมีค่าประมาณ $-3.9\ ^{\circ}C$

สำหรับระนาบในแนวดิ่ง, ผิวจะรับพลังงานรังสีคลื่นยาวจากพื้นและอาคารข้างเคียง เช่นเดียวกับจากท้องฟ้า ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะหาค่า ΔR ที่ละเอียดถูกต้องได้ เมื่อความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์สูง, ผิวของวัตถุบนโลกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ดังนั้น พลังงานรังสีคลื่นยาวได้ชดเชยบางส่วนสำหรับการปล่อยรังสีที่ต่ำของท้องฟ้า และด้วยเหตุผลนี้ ในทางปฏิบัติจึงสมมุติให้ $\Delta R = 0$ สำหรับผิวในแนวดิ่ง

อุณหภูมิแตกต่างเทียบเท่า(Equivalent Temperature Difference)

วิธีทรานเฟอร์ฟังชั่น (Transfer Function Method) (5) ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาการไหลของความร้อนแบบทรานเซียนในหนึ่งมิติ (One - Dimensional Transient Heat Flow) ผ่านหลังคาและกำแพงที่ถูกแดดแบบต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้คือค่าของความร้อนนี้ เมื่อหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม,U,ของกำแพงหรือหลังคา ก็จะได้ค่าอุณหภูมิแตกต่างเทียบเท่า (Equivalent Temperature Difference, TD_{eq})

ในการคำนวณการไหลของความร้อนผ่านกำแพง และหลังคาภายนอก ได้ใช้อุณหภูมิโซล-แอร์ แทนสภาพภายนอกบริเวณปรับอากาศ และได้สมมุติว่าอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณปรับอากาศและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวทั้งภายในและภายนอกมีค่าคงที่ ความร้อนที่ผ่านหลังคาหรือกำแพงสามารถหาได้

จากสมการดังนี้

$$q_{we,\tau} = A_w \left[\sum_{n=0} b_n (t_{e,\tau-n\Delta}) - \sum_{n=0} d_n \frac{q_{we,\tau-n\Delta}}{A_w} - t_{rc} \sum_{n=0} c_n \right] \quad ....(2.42)$$

เมื่อ

A_w = พื้นที่ผิวภายในของหลังคาหรือกำแพง, m^2

$q_{we,\tau}$ = ความร้อนที่ได้รับผ่านผิวภายในของหลังคาหรือกำแพง, W

τ = เวลา, ชั่วโมง

Δ = ช่วงเวลา, ชั่วโมง

n = ดัชนี

$t_{e,\tau-n\Delta}$ = อุณหภูมิโซล-แอร์ที่เวลา $\tau-n\Delta$, °C

t_{rc} = อุณหภูมิคงที่ของอากาศภายใน, °C

b_n, c_n, d_n = สัมประสิทธิ์ทรานเฟอร์ฟังชั่น (Transfer Function Coefficients)

ค่าสัมประสิทธิ์ทรานเฟอร์ฟังชั่น สามารถดูได้จากตารางที่ 3.7 ซึ่งได้มาจากการที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมภายนอก h_o = 17 W/m^2 °C และภายใน h_i = 8.29 W/m^2 °C การที่ใช้ h_o = 17 นี้ เนื่องจากเพื่อให้สอดคล้องกับการหาอุณหภูมิโซล-แอร์ ซึ่งใช้ค่า h_o = 17 W/m^2 °C เช่นเดียวกัน

เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้นี้หารด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ของหลังคาหรือกำแพงก็จะได้ค่าอุณหภูมิแตกต่างเทียบเท่า(Equivalent Temperature Difference) ดังนั้น การหาค่าความร้อนผ่านหลังคาหรือกำแพงซึ่งมีพื้นที่ 1 หน่วย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{q}_w = U_w \times TD_{eq} \quad \ldots.(2.43)$$

<u>ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านรูปภายนอกของอาคาร</u>

เมื่อรวมความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกและกำแพงภายนอกของอาคารแล้ว พิจารณาจากสมการที่ (2.38) และ (2.43) สามารถเขียนสมการหาความร้อนผ่านรูบภายนอกของอาคารด้านใดด้านหนึ่งได้ดังนี้

$$q = U_w x A_w x TD_{eq} + U_f x A_f x \Delta T + A_f x SC x SF \quad \ldots.(2.44)$$

เมื่อ q = ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านรูปภายนอกของอาคาร, W

U_w = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกำแพง หรือหลังคา, $W/m^2\,^\circ C$

A_w = พื้นที่ของกำแพงหรือหลังคา, m^2

TD_{eq} = อุณหภูมิแตกต่างเทียบเท่า, $^\circ C$

U_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของช่องกระจก, $W/m^2\,^\circ C$

A_f = พื้นที่ของช่องกระจก, m^2

ΔT = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอากาศภายนอกและภายใน, C

SC = สัมประสิทธิ์ร่มเงาของช่องกระจก (Shading Coefficient of Fenestration)

SF = แฟคเตอร์แสงอาทิตย์ (Solar Factor), W/m^2