

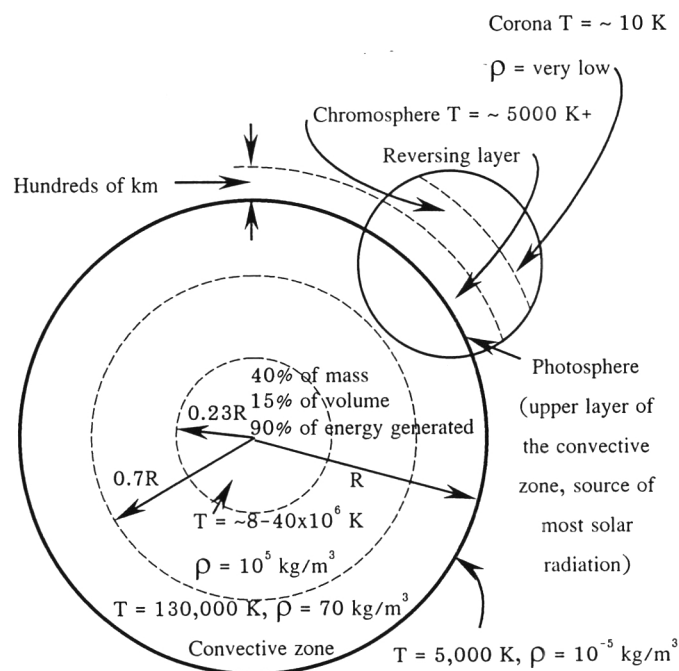
บทที่ 2

ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

2.1.1 ดวงอาทิตย์

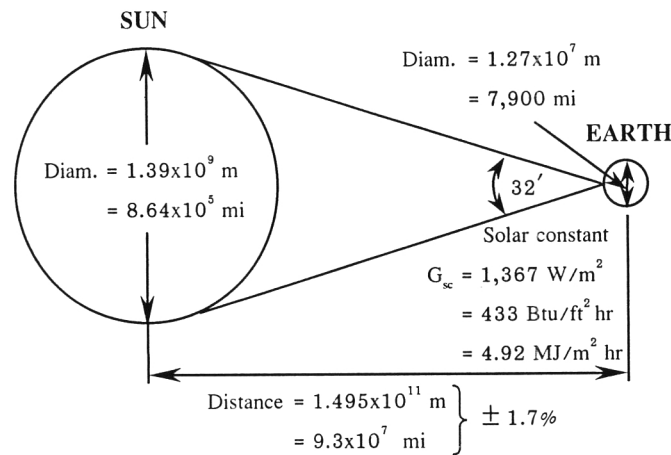
ดวงอาทิตย์² ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.39×10^9 เมตร หนัก 2.2×10^{27} ตัน ดวงอาทิตย์ หมุนรอบตัวเองด้วยอัตรา 1 รอบ ต่อ 28 วัน พลังงานที่ดวงอาทิตย์แผ่รังสีออกมาได้จากการเปลี่ยนมวลของดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงาน คือแก๊สไฮโดรเจนในดวงอาทิตย์ 4 อะตอมรวมตัวกันเป็นแก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุล เนื่องจากแก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุลที่ได้มีมวลน้อยกว่าไฮโดรเจน 4 อะตอม มวลส่วนหนึ่งจึงหายไปโดยเปลี่ยนเป็นพลังงาน ดวงอาทิตย์ให้พลังงานมานาน 300 ล้านปีแล้วและคาดว่าอีก 300 ล้านปีต่อไปดวงอาทิตย์ยังคงให้พลังงานออกมาด้วยอัตราใกล้เคียงกับที่ให้อยู่ในปัจจุบัน จึงกล่าวได้ว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์จะไม่หมดไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์²

จากรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของดวงอาทิตย์ 90% ของพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดขึ้นบริเวณจากศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ถึง $0.23R$ (R คือรัศมีของดวงอาทิตย์) ประกอบด้วยสารที่มีมวลหนัก มวลประมาณ 40% ของมวลดวงอาทิตย์ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 10^5 กิโลเมตร

ต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิประมาณ $8-40 \times 10^6$ เคลวิน ถัดจากระยะ $0.23R$ คือระยะ $0.7R$ จากศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ อุณหภูมิลดลงเหลือ $130,000$ เคลวิน และความถ่วงจำเพาะลดลงเหลือ 70 กิโลเมตรต่อลูกบาศก์เมตร. บริเวณสุดท้ายคือระยะ R ที่ผิวดวงอาทิตย์อุณหภูมิลดลงเหลือ $5,000$ เคลวิน และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 10^{-5} กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



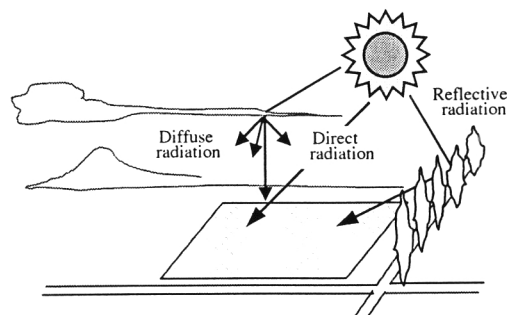
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของขนาดและระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์²

ความสัมพันธ์ของขนาดและระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.2 โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วยอัตรา 1 รอบ ต่อ 365 วัน โดยวงโคจรเป็นรูปวงรีที่ความแตกต่างของแกนหลักเท่ากับ $\pm 3\%$ มุมมองรับดวงอาทิตย์บนพื้นโลกขนาด 32 ลิปดา โดยระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.495×10^{11} เมตร มีค่าคงที่สุริยะ (solar constant, G_{sc}) เป็นพลังงานจากดวงอาทิตย์เท่ากับ $1,367$ วัตต์ต่อตารางเมตร

รังสีแสงอาทิตย์รวม (total solar or global radiation) คือรังสีทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยรังสีตรง และรังสีกระจายที่รับได้บนระนาบระดับต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่ดังรูป 2.3

- รังสีตรง (beam or direct radiation) คือรังสีที่พื้นผิวได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์มีทิศทางแน่นอนมาถึงพื้นผิวบนพื้นโลกไม่เปลี่ยนแปลง

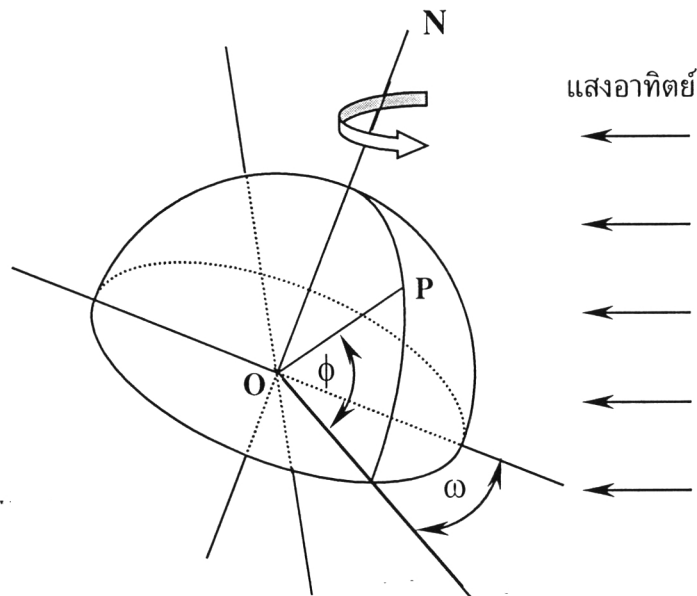
- รังสีกระจาย (diffuse radiation) คือรังสีที่ไม่ได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์แต่รับจากการสะท้อนและการกระเจิงของรังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 2.3 รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกแบบต่างๆ

2.1.2 ทิศทางของการแผ่รังสีตรง

ทิศทางของรังสีตรง^{3,4} ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสถานที่ มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อทิศทางของรังสีตรง โดยตำแหน่งและวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ซึ่งมีผลต่อรังสีตรงรายเดือนมีค่าต่างกันในแต่ละเดือน



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งที่ตั้งของเส้นละติจูดและมุมของเวลา³

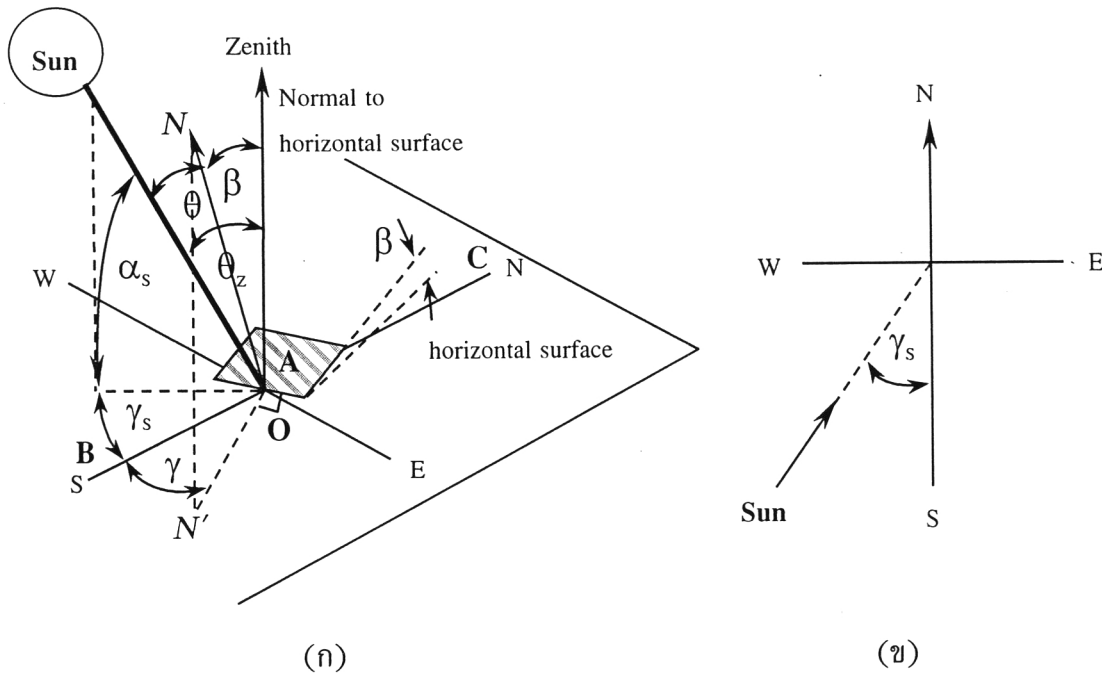
จากรูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งใดๆ บนผิวโลกที่เส้นละติจูด (ϕ) มุมของเวลา (ω) คือมุมที่เกิดจากแนวฉายของเส้น OP (O คือศูนย์กลางของโลก) ทำกับแนวต่อระหว่างศูนย์กลางของโลกและดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงสุริยะ (solar noon) ที่เวลาเที่ยงสุริยมุมของเวลาจะเป็นศูนย์และจะเพิ่มขึ้น 15° ทุกๆ ชั่วโมงนับทางด้านเวลาเช้าเป็นบวกและเวลาทางบ่ายเป็นลบ เช่น ถ้าเวลา 10:00 น. จะได้ค่ามุมของเวลาเท่ากับ $+30^\circ$ เป็นต้น มุมเดคลิเนชัน (declination, δ) คือมุมที่เกิดระหว่างแนวต่อศูนย์กลางของโลกกับดวงอาทิตย์ทำกับระนาบศูนย์สูตรเมื่อเวลาเที่ยงจริง โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1.1)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(2\pi \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

เมื่อ $\pi = 3.141592654$

n คือจำนวนวันของปีโดยนับจากวันที่ 1 มกราคม เช่น วันที่ 7 กุมภาพันธ์ n เท่ากับ 38



รูปที่ 2.5 มุมต่างๆ เมื่อระนาบเอียงทำมุมกับระนาบระดับ^{2, 5}

- (ก) มุมเซนิต, มุมเอียงของระนาบ, มุมแอสิมัทของระนาบ, มุมแอสิมัทสุริยะของระนาบ
 (ข) มุมแอสิมัทสุริยะของระนาบ

รูปที่ 2.5 แสดงมุมที่แสงอาทิตย์ทำกับแนวตั้งฉากของระนาบ^{2, 5} ระนาบ A วางทำมุมกับระนาบระดับด้วยมุมเอียง β เส้น ON เป็นเส้นตั้งฉากของระนาบ A เส้น BOC คือเส้นลากผ่านระนาบ A ตามแนวทิศเหนือ-ใต้ เส้น ON' คือรูปฉายของ ON บนระนาบระดับ

มุมแอสิมัทของระนาบ (surface azimuth angle, γ) คือมุมระหว่างเส้น ON' กับแนว BOC มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ (angle of incidence, θ) คือมุมที่เกิดจากแนวของแสงอาทิตย์ทำกับแนวของเส้นตั้งฉาก ON ของระนาบ A โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\
 &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\
 &+ \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\
 &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega
 \end{aligned}
 \tag{2.1.2}$$

เมื่อ δ คือ มุมเดคลิเนชัน $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

ϕ คือ เส้นละติจูด ถ้าเหนือเส้นศูนย์สูตร เส้นละติจูดเป็นบวก และได้เส้นศูนย์สูตร เส้นละติจูดเป็นลบ $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

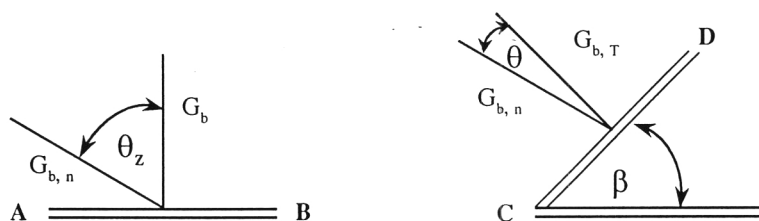
β คือ มุมเอียงของระนาบ $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ β มากกว่า 90 องศาหมายถึงระนาบเอียงทิศทางตรงข้ามกับทิศเดิม

γ คือ มุมแอสิมัทของระนาบ ถ้าระนาบหันทางทิศใต้มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าหันทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบ ถ้าหันทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นบวก $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$

ในกรณีที่ระนาบวางอยู่แนวระนาบระดับ มุมเอียงระนาบเป็นศูนย์ มุมแอสิมัทของระนาบมีชื่อเฉพาะว่ามุมเซนิต (Zenith angle, θ_z) ได้จากการแทนค่า β ลงในสมการ (2.1.2) จะได้

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.1.3)$$

2.1.3 อัตราส่วนของรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อระนาบระดับ²



รูปที่ 2.6 รังสีแสงอาทิตย์แบบรังสีตรงบนระนาบระดับและระนาบเอียง²

รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบรังสีแสงอาทิตย์แบบรังสีตรง $G_{b,n}$ ที่ตกลงบนระนาบระดับ AB และที่ตกบนระนาบเอียง CD อัตราส่วนของรังสีตรงที่ตกบนระนาบเอียงต่อระนาบระดับ คือ R_b

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.1.4)$$

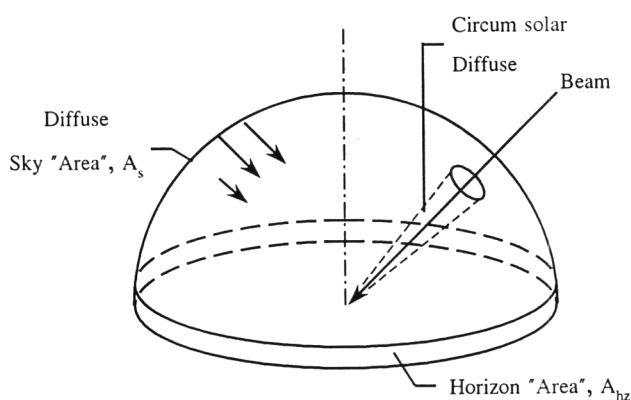
เมื่อ R_b คืออัตราส่วนของรังสีตรงที่รับได้บนระนาบเอียงต่อที่รับได้บนระนาบระดับ

θ และ θ_z คือมุมที่รังสีตรง $G_{b,n}$ ทำกับแนวเส้นตั้งฉากกับระนาบทั้งสอง

$G_{b,n}$ คือรังสีแสงอาทิตย์แบบรังสีตรง

2.1.4 รังสีแสงอาทิตย์บนระนาบเอียง

โดยปกติข้อมูลปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ เป็นค่าที่ได้จากระนาบระดับแต่แผงรับแสงอาทิตย์จะวางในลักษณะพื้นผิวที่รับรังสีเอียงทำมุมกับระนาบระดับ ดังนั้นข้อมูลก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต้องเปลี่ยนไปอยู่ในระนาบเอียงเสียก่อน



รูปที่ 2.7 แผนภาพรังสีตรงและรังสีกระจาย 3 แบบที่เกิดภายในโดมท้องฟ้า²

รูปที่ 2.7 แสดงรังสีตรงและรังสีกระจาย รังสีกระจายประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของรังสีกระจาย isotropic ที่รับจากโดมท้องฟ้า ส่วนที่สองเป็นส่วนของรังสีกระจาย circumsolar ที่เป็นผลมาจากการกระจายของรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนที่สามเกี่ยวข้องกับค่า horizon brightening ซึ่งมีค่าประมาณค่า horizon (สมมุติฐานนี้สำหรับวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง)

สำหรับแบบจำลองท้องฟ้า², รังสีแสงอาทิตย์รวมประกอบด้วยผลรวมของรังสีตรง รังสีกระจายทั้ง 3 ส่วนและรังสีสะท้อนจากพื้นผิวที่สามารถมองเห็นโดยระนาบ (รังสีสะท้อนคือรังสีที่ไม่ได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์แต่รับจากพื้นผิวต่างๆ ที่อยู่บริเวณพิจารณาสะท้อนรังสีมายังพื้นผิว) โดยการคำนวณจะพิจารณาระนาบวางแนวระดับ รังสีแสงอาทิตย์รวมบนระนาบระดับได้ตั้งสมการ

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \quad (2.1.5)$$

เมื่อ ตัวห้อย iso, cs, hz และ refl หมายถึง isotropic, circumsolar, horizon และ reflected radiation ตามลำดับ

สำหรับพื้นผิวแผ่รังสีแสงอาทิตย์ของพื้นที่ A_c รังสีแสงอาทิตย์รวมสามารถแสดงในเทอมของรังสีตรงและรังสีกระจายบนระนาบระดับและรังสีสะท้อนจากพื้นผิวอื่นมายังแผ่รังสีแสงอาทิตย์สมการ (2.1.5) จะเขียนได้เป็น

$$A_c I_T = I_b R_b A_c + I_{d,iso} A_s F_{s-c} + I_{d,cs} R_b A_c + I_{d,hz} A_{hz} F_{hz-c} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i-c} \quad (2.1.6)$$

เทอมแรกเป็นรังสีตรงที่พื้นที่ A_c เทอมที่สองเป็นรังสีกระจาย isotropic ซึ่งรวมรังสีที่ได้จากพื้นที่ A_s และค่าวิวแฟกเตอร์จากท้องฟ้าไปยังแผ่รังสีแสงอาทิตย์, F_{s-c} เทอมที่สามเป็นรังสีกระจาย circumsolar ซึ่งสามารถคำนวณคล้ายกับรังสีตรง เทอมที่สี่เป็นรังสีกระจาย horizon จากพื้นที่ A_{hz} เทอมที่ห้าเป็นรังสีสะท้อนจากสิ่งก่อสร้างต่างๆ หรือพื้นผิวที่อยู่บริเวณที่ทำให้เกิดการสะท้อน โดย i หมายถึงแต่ละพื้นผิวที่ทำให้เกิดการสะท้อน ρ_i เป็นสภาพการสะท้อนของรังสีกระจายบนพื้นผิวและ F_{i-c} เป็นค่าวิวแฟกเตอร์จากพื้นผิวที่ i ไปยังแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งในการคำนวณส่วนใหญ่จะสมมุติให้มีเพียงหนึ่งพื้นผิวคือพื้นดินเท่านั้น ทำให้เทอมสุดท้าย I_i แทนด้วย I และ ρ_i แทนด้วย ρ_g เป็นสภาพการสะท้อนจากพื้นผิว ถ้าพื้นผิวนั้นมีค่าสภาพการสะท้อนสูงจะส่งผลให้การสะท้อนของรังสีแสงอาทิตย์กลับไปท้องฟ้ามากด้วย จากสมการ (2.1.6) เขียนใหม่ให้อยู่ในเทอมของค่าวิวแฟกเตอร์จากแผ่รังสีแสงอาทิตย์ไปยังท้องฟ้าและพื้นผิวระนาบได้

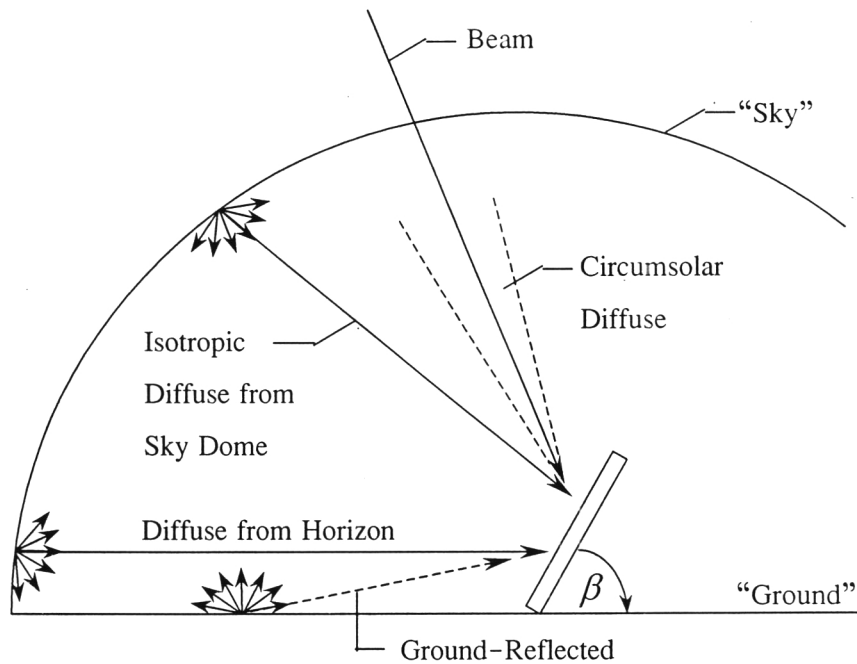
โดย $A_s F_{s-c} = A_c F_{c-s}$; $A_{hz} F_{hz-c} = A_c F_{c-hz}$ จะสามารถทำการคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมได้ตามสมการ

$$I_T = I_b R_b + I_{d,iso} F_{c-s} + I_{d,cs} R_b + I_{d,hz} F_{c-hz} + I \rho_g F_{c-g} \quad (2.1.7)$$

อัตราส่วนของรังสีแสงอาทิตย์รวมบนระนาบเอียงต่อระนาบระดับได้จาก

$$R = \frac{\text{Total radiation on the tilted surface}}{\text{Total radiation on a horizontal surface}} = \frac{I_T}{I} \quad (2.1.8)$$

สมมุติว่าการรวมระหว่างแผ่รังสีตรงและรังสีสะท้อนจากพื้นดินเป็น isotropic โดยสมมุติฐานคือผลรวมของรังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีสะท้อนจากพื้นดินบนพื้นผิวแผ่รังสีแสงอาทิตย์เป็นค่า regardless of orientation และการแผ่รังสีรวมบนพื้นผิวแผ่รังสีแสงอาทิตย์เป็นผลรวมของรังสีตรงคำนวณได้จาก $I_b R_b$ และรังสีกระจายบนระนาบระดับ, I_d



รูปที่ 2.8 การแผ่รังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีสะท้อนจากพื้นดินบนระนาบเอียง²

แบบจำลองการกระจายรังสี isotropic² โดย Liu และ Jordan เสนอว่าการแผ่รังสีบนพื้นผิวพิจารณาได้เป็น 3 ส่วน คือ รังสีตรง รังสีกระจาย isotropic และรังสีสะท้อนจากพื้นดิน จากสมการที่ (2.1.7) เทอมที่ 3 และ 4 มีค่าประมาณศูนย์ รังสีกระจายทั้งหมดถูกสมมุติให้เป็น isotropic พื้นผิวเอียงเป็นมุม β จากระนาบระดับมีค่าวิวแฟกเตอร์ไปยังท้องฟ้า F_{c-s} ซึ่งเท่ากับ $(1 + \cos \beta)/2$ (ถ้าการแผ่รังสีตรงเป็น isotropic ดังนั้น R_d , อัตราส่วนของรังสีกระจายบนพื้นผิวต่อรังสีกระจายบนระนาบระดับ) พื้นผิวมีค่าวิวแฟกเตอร์ไปยังพื้นดิน F_{c-g} ซึ่งเท่ากับ $(1 - \cos \beta)/2$ จากสมการ (2.1.7) จะได้เป็น

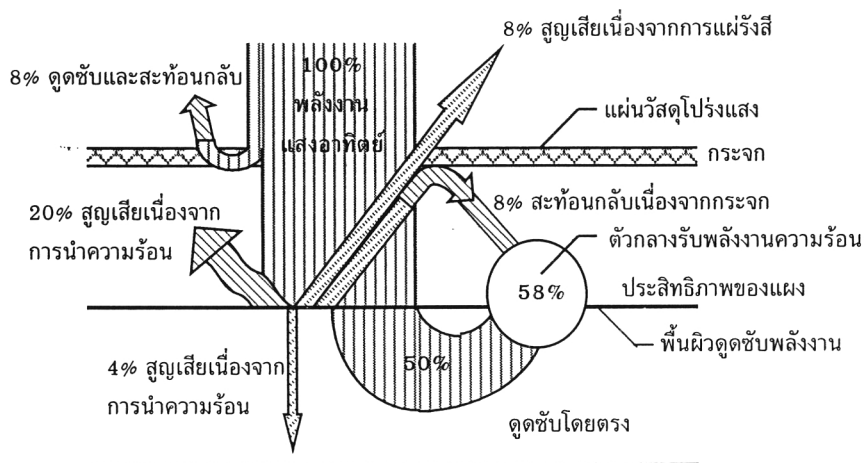
$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.1.9)$$

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.1.10)$$

โดยปกติสำหรับค่าสภาพการสะท้อนจากพื้นผิวสิ่งก่อสร้างสีทึบและแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีมุมเอียงน้อย² มีค่าเท่ากับ 0.2

2.2 แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น (Solar flat-plate collector)

พื้นผิวใดก็ตามเมื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ส่องมากระทบ พื้นผิวนั้นก็จะดูดความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำให้วัตถุที่แสงอาทิตย์ส่องถึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากวัตถุนั้นดูดพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาสะสมไว้ ความสามารถในการดูดพลังงานความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุแต่ละชนิด เมื่อวัตถุที่ได้รับแสงอาทิตย์ส่องมากระทบมีอุณหภูมิสูงกว่าวัตถุอื่นที่อยู่รอบๆ เช่น อากาศ น้ำ ดิน วัตถุนั้นจะเริ่มสูญเสียความร้อนที่สะสมไว้ในตัวเองออกไป เพื่อที่จะให้พลังงานความร้อนที่วัตถุที่รับแสงอาทิตย์สะสมไว้สูญเสียไปน้อยที่สุดและสามารถนำพลังงานความร้อนนี้ไปใช้ประโยชน์เราจึงต้องออกแบบและสร้างที่เก็บรวบรวมพลังงานขึ้นมา ซึ่งอุปกรณ์ส่วนนี้เรียกว่า “แผงรับแสงอาทิตย์” (Solar collector) เพื่อให้สามารถดูดความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้มากและสูญเสียไปน้อยที่สุด



รูปที่ 2.9 ส่วนต่างๆ ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์³

จากรูปที่ 2.9 พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมากระทบแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นวัสดุโปร่งใส³ เช่น แผ่นกระจกหรือแผ่นพลาสติกปิดอยู่ ปริมาณความร้อนประมาณ 8% จะถูกแผ่นวัสดุโปร่งใสดูดไว้และสะท้อนกลับ ที่เหลือนอกนั้นประมาณ 92% จะถูกส่งผ่านไปยังพื้นดูดซับพลังงาน พลังงานความร้อนประมาณ 20% จะสูญเสียไปจากการพาความร้อนของอากาศที่คั่นอยู่ระหว่างแผ่นวัสดุโปร่งใสกับพื้นผิวดูดซับ พลังงานอีก 16% จะสูญเสียไปจากการแผ่รังสีของผิว แต่จะสะท้อนกลับคืนมา 8% พลังงาน 4% จะสูญเสียไปจากการนำความร้อนของสารดูดซับพลังงาน สรุปแล้วเราจะได้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประมาณ 58% คือ 50% จากการที่ตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนดูดมาโดยตรง และอีก 8% จากการสะท้อนกลับที่วัสดุโปร่งใส

การพัฒนาาระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีแสงอาทิตย์จะสนใจแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นมากกว่าแผงรับแสงอาทิตย์แบบอื่น ๆ เพราะว่าแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นมีสมบัติดังนี้

- กรรมวิธีในการผลิตอุปกรณ์ง่ายกว่า ไม่ต้องใช้เทคนิคมาก
- สามารถรับรังสีกระจายได้ดีเท่ากับรังสีตรง
- ง่ายต่อการใช้งานสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของหลังคาได้
- ง่ายต่อการบำรุงรักษา

2.2.1 ส่วนประกอบ

ในที่นี้จะศึกษาแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

1. แผ่นปิดคลุมด้านหน้าโดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์ต้องเป็นวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านไปได้ เช่น กระจก แผ่นกระจกจะวางปิดด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์เพราะฉะนั้นจะมีด้านหนึ่งของกระจกหันเข้าหาดวงอาทิตย์ส่วนอีกด้านหนึ่งหันลงด้านล่าง เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์จึงเกิดการสูญเสียพลังงานโดยการสะท้อนกลับได้ สมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของกระจกสำหรับแผงรับแสงอาทิตย์ คือ ความสามารถซึ่งให้การแผ่รังสีได้ซึ่งวัดออกมาเป็นค่าที่เรียกว่า ค่าการทะลุผ่านซึ่งขึ้นกับค่าดรรชนีหักเหของกระจก

การสูญเสียพลังงานในการดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Iron Oxide ในกระจกนั้น รังสีแสงอาทิตย์อาจถูกดูดกลืนมากถ้าเนื้อกระจกมี Fe_2O_3 มาก จะดูดรังสีในช่วงอินฟราเรดไว้ กระจกนั้นจะมี Fe_2O_3 มากหรือน้อย โดยดูที่ขอบกระจกหากมีสีเขียวมักแสดงว่ามี Fe_2O_3 มาก

เราจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ให้ดูดความร้อนให้มากขึ้น โดยเพิ่มกระจกที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์เป็น 2 แผ่น แต่การเพิ่มเป็น 2 แผ่นอาจไม่มีประโยชน์หากแผงรับแสงอาทิตย์ฉาบไว้ด้วยวัสดุดูดความร้อนได้ดีและคายความร้อนช้า เพราะจะกลายเป็นการลดปริมาณความร้อนที่จะผ่านทะลุเข้ามากระทบแผงรับแสงอาทิตย์ด้วยซ้ำ

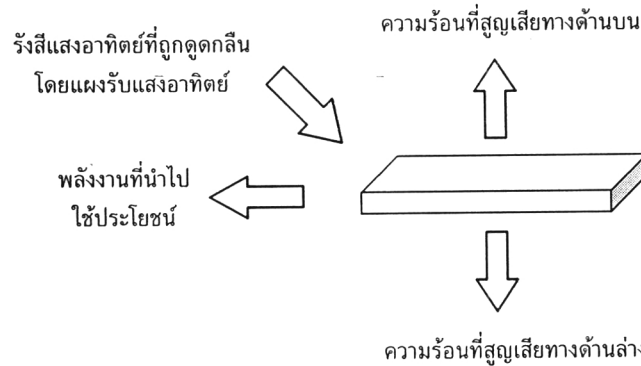
แผ่นปกคลุมนั้นอาจใช้พลาสติกใสแทนก็ได้ แต่พลาสติกใสจะมีอายุการใช้งานต่ำเนื่องจากจะเสียสมบัติโปร่งใสไปทีละน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลงไปเรื่อย ๆ

2. ตัวดูดกลืน (absorber) โดยทั่วไปจะเป็นแผ่นโลหะฉาบสีดำไว้เพื่อให้มีพฤติกรรมเช่น วัตถุดำ (วัตถุดำคือตัวดูดรังสีความร้อนที่สมบูรณ์โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทางที่รังสีตกลงบนวัตถุดำ รังสีตกกระทบทั้งหมดจะถูกดูดเอาไว้ วัตถุดำเป็นเพียงวัตถุที่สมมุติขึ้นมา เนื่องจากวัตถุที่แท้จริงทั้งหลายจะสะท้อนรังสีบางส่วนและยอมให้รังสีบางส่วนผ่านทะลุผ่านได้)

3. ฉนวน เป็นส่วนที่อยู่ใต้และรอบๆ ข้างแผ่นดูดกลืน (absorber plate) ได้แก่ โยแก้ว ซึ่งหน้าที่ของฉนวนในที่นี้คือกั้นการถ่ายเทความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ออกจากทางด้านล่างและด้านข้าง

4. ของไหล ในที่นี้จะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เมื่อของไหลมีอุณหภูมิสูงก็สามารถที่จะนำไปใช้งานต่อไปได้

2.2.2 ดุลพลังงานของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น



รูปที่ 2.10 ขอบเขตในการพิจารณาหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาแผงรับแสงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ ตามรูปที่ 2.10 สมการดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ คือ

พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับ

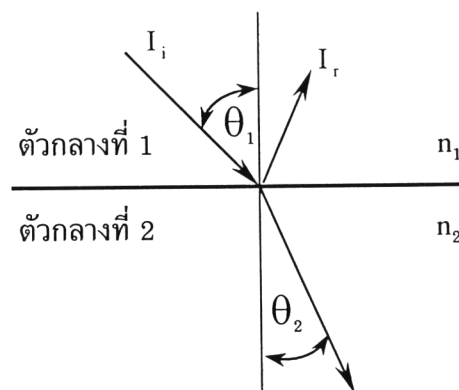
(2.2.1)

$$= \text{ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์} + \text{ความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด}$$

โดยแต่ละพจน์ในสมการสามารถหาโดยใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้

พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับ

รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (ประกอบด้วยรังสีตรง และรังสีกระจาย) ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์นั้น ส่วนหนึ่งของรังสีจะถูกแผงรับแสงอาทิตย์ดูดไว้ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนไปกระทบกับผิวของแผ่นปิดใส ซึ่งสามารถสะท้อนรังสีส่วนหนึ่งกลับมายังแผงรับแสงอาทิตย์เช่นนี้ต่อเนื่องกัน



รูปที่ 2.11 มุมตกกระทบและมุมหักเหในตัวกลาง² ที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 และ n_2

สำหรับพื้นผิวเรียบดังรูปที่ 2.11, เมื่อแสงตกกระทบกระจกที่มุมตกกระทบใดๆ ที่ตัวกลางที่ 1 มีค่าดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีหักเห n_2 รังสีส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนโดยค่าการสะท้อนรังสี (reflection, r) คำนวณได้จากสมการของ Fresnel²

รังสีตั้งฉากกับพื้นผิว, r_{\perp}

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.2.2)$$

รังสีขนานกับพื้นผิว, r_{\parallel}

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.2.3)$$

$$r = \text{การสะท้อนรังสี} = \frac{\text{รังสีที่สะท้อนจากผิว}}{\text{รังสีที่ตกกระทบผิว}}$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} (r_{\perp} + r_{\parallel})$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right) \quad (2.2.4)$$

เมื่อ θ_1 คือ มุมตกกระทบ, มุมที่รังสีตกกระทบทำกับแนวตั้ง

θ_2 คือ มุมหักเหในเนื้อกระจก, มุมที่รังสีหักเหทำกับแนวตั้ง

มุม θ_1 และมุม θ_2 มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนโดยตรง โดยกฎของ Snell²

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (2.2.5)$$

เมื่อ n_1 คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางที่ 1

n_2 คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางที่ 2

ถ้าตัวกลางที่ 1 คือ อากาศ $n_1 = 1.0$ และตัวกลางที่ 2 คือ กระจก $n_2 = 1.526$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{1.526} \right) \quad (2.2.6)$$

ถ้าแผงรับแสงอาทิตย์วางทำมุมกับแนวระดับตลอดทั้งวัน ค่า θ_1 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละวัน แต่ถ้าทำการปรับแผงรับแสงอาทิตย์ให้หันเข้าหาดวงอาทิตย์ตลอดเวลาซึ่งจะประมาณได้ว่า $\theta_1 = 0^\circ$ จะได้การสะท้อนรังสี

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.2.7)$$

ถ้าตัวกลางที่ 1 คือ อากาศ $n_1 = 1.0$

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2.2.8)$$

n คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางที่ 2

ถ้าไม่มีการดูดกลืนภายในเนื้อของวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์ ค่าการส่งผ่านของ 2 ตัวกลางเฉลี่ยที่พิจารณาเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนรังสีเท่านั้นเท่ากับ τ_r

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (2.2.9)$$

ถ้ามีการดูดกลืนภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์ จากกฎของ Bouguer² สมมุติว่าการดูดกลืนรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับตำแหน่งตกระทบในตัวกลางและระยะทาง x รังสีผ่านในตัวกลาง

$$dI = -IK dx \quad (2.2.10)$$

ค่าการส่งผ่านของ 2 ตัวกลางที่พิจารณาเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนรังสีเท่านั้น คือ τ_a

$$\tau_a = \frac{I_{\text{transmitted}}}{I_{\text{incident}}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (2.2.11)$$

เมื่อ τ_a คือ ค่าส่งผ่านเมื่อมีการดูดรังสีไว้ส่วนหนึ่งในเนื้อวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์
 K เป็นสัดส่วนคงที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์เอกซ์ทิงชัน (extinction coefficient), m^{-1}
 L คือ ความหนาของวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์ (กระจก), m

เมื่อคิดการสะท้อนออกจากกระจกและการดูดรังสีภายในเนื้อกระจกแล้วค่าส่งผ่านที่เหลือจะมีค่า

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (2.2.12)$$

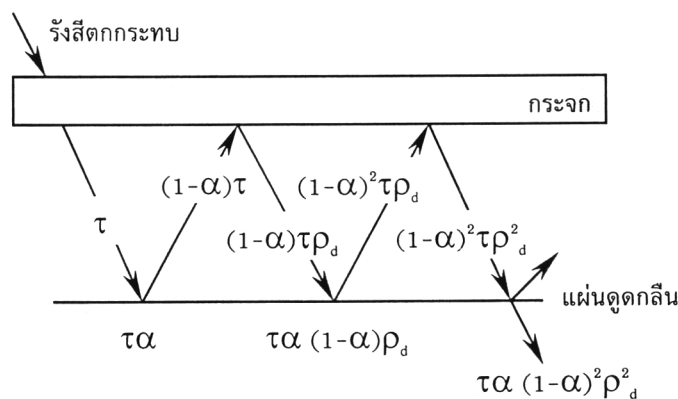
ค่าการดูดกลืนของวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์สามารถประมาณได้

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (2.2.13)$$

ค่าความสะท้อนของวัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์ได้จาก $\rho = 1 - \alpha - \tau$ ดังนั้น

$$\rho \cong \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \quad (2.2.14)$$

เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกลงมาตกกระทบกับแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าการดูดกลืน α จะมีส่วนหนึ่ง $(1 - \alpha)$ สะท้อนออกไป รังสีส่วนนี้จะไปตกกระทบกระจกด้านบน และมีบางส่วนสะท้อนกลับลงมายังแผงรับแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์โดยแผ่นดูดกลืน²

ดังนั้นผลคูณระหว่างค่าการส่งผ่านและค่าการดูดกลืนรังสีจะเป็น

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (2.2.15)$$

การดูดกลืนรังสีต่อหน่วยพื้นที่, S

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

$$S = (\tau\alpha)_{av} I_T \quad (2.2.16)$$

โดยที่

$$(\tau\alpha)_{av} \cong 0.96(\tau\alpha)_b \quad (2.2.17)$$

ปริมาณความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์

ปริมาณความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ได้จากรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับลบออกด้วยพลังงานที่สูญเสียความร้อน

$$Q_u = m C_p (T_o - T_i) \quad (2.2.18)$$

$$Q_u = A_c (S - U_L (T_{cm} - T_a)) \quad (2.2.19)$$

- เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าแผงรับแสงอาทิตย์
 T_o คือ อุณหภูมิของน้ำขาออกแผงรับแสงอาทิตย์
 A_c คือ พื้นที่รับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์
 S คือ การดูดกลืนรังสีต่อหน่วยพื้นที่
 U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์
 T_a คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ
 T_{cm} คือ อุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์เฉลี่ย

ความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด (Heat loss)

จากสมการ (2.2.1) ได้ค่าความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด

$$Q_l = I_T - Q_u \quad (2.2.20)$$

2.2.3 ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ (Efficiency)

ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์² สามารถหาได้จากค่าพลังงานของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกลงบนแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น เทียบกับค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ ดังสมการ

$$\% \text{ ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์} = \frac{\text{ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกลงบนแผงรับแสงอาทิตย์}}$$

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.2.21)$$

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{S - U_L (T_{\text{cm}} - T_a)}{G_T} \quad (2.2.22)$$

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (2.2.23)$$

- เมื่อ A_c คือ พื้นที่รับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์
 G_T คือ รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ตกลงบนแผงรับแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่
 S คือ การดูดกลืนรังสีต่อหน่วยพื้นที่
 U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนทั้งหมดของแผงรับแสงอาทิตย์
 T_{cm} คือ อุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์เฉลี่ย
 T_a คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ
 T_i คือ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าแผงรับแสงอาทิตย์
 T_o คือ อุณหภูมิของน้ำขาออกแผงรับแสงอาทิตย์

2.3 ของไหลทำงาน

อนุพันธ์แฮโลคาร์บอน⁶ (halocarbon derivative) เป็นสารประกอบสายโซ่ตรงที่ใช้ทั่วไปในระบบปั๊มความร้อน โดยอนุพันธ์แฮโลคาร์บอนได้มาจากการแทนที่ไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน (เช่นมีเทน CH_4 , อีเทน C_2H_6 , เป็นต้น) ด้วยคลอรีน (Cl) และฟลูออรีน (F) สารประกอบเหล่านี้จะถูกกำหนดตัวเลขตามรหัสเฉพาะจากสูตรโมเลกุล $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{Cl}_\gamma\text{F}_\delta$

เมื่อ α คือ จำนวนอะตอมคาร์บอนภายในโมเลกุล

β คือ จำนวนอะตอมไฮโดรเจนภายในโมเลกุล

γ คือ จำนวนอะตอมคลอรีนภายในโมเลกุล

δ คือ จำนวนอะตอมฟลูออรีนภายในโมเลกุล

โดยสัญลักษณ์ตัวเลขได้มาจากตัวเลข 3 ตำแหน่ง ดังสูตร $(\alpha-1) (\beta+1) \delta$ ถ้าสัญลักษณ์ตัวเลขตำแหน่งแรก $(\alpha-1) = 0$ จะไม่แสดงตัวเลข 0 ในตำแหน่งแรกจะเหลือสัญลักษณ์ตัวเลขเพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น ดังนั้นอนุพันธ์ของมีเทนจะมีตัวเลขสัญลักษณ์ 2 ตำแหน่ง เพราะค่า $\alpha = 1$ และอนุพันธ์ของอีเทนมีสัญลักษณ์ตัวเลข 3 ตำแหน่ง เช่น

CHCl_3	(1-1) (1+1) 0	สัญลักษณ์ตัวเลข คือ	20
CHClF_2	(1-1) (1+1) 2	สัญลักษณ์ตัวเลข คือ	22
$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	(2-1) (0+1) 4	สัญลักษณ์ตัวเลข คือ	114

ผู้ใช้ของไหลทำงานในการทำความเย็นจะเติมตัวอักษร R หน้าสัญลักษณ์ตัวเลขเป็น R20, R22, R114 นอกจากนั้นมีการเติมตัวอักษร C ต่อท้ายตัวอักษร R แทนโมเลกุล cyclic และอักษร a, b ตามหลังสัญลักษณ์ตัวเลขแทน consecutive isomers

การเลือกใช้ของไหลทำงานให้เหมาะกับงานจะต้องพิจารณาสมบัติของของไหลทำงานเปรียบเทียบกับ ปัจจุบันมีการสนใจเรื่องสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่า ODF (Ozone Depletion Factor) และ GWP (Global Warming Potential) ประกอบการพิจารณาด้วย ODF คือ ผลการทำลายโอโซน (O_3) ในชั้นบรรยากาศ stratosphere โดยคลอรีนและฟลูออรีน และ GWP คือ การวัดค่าระดับชั้นของอันตรายในชั้นบรรยากาศ ซึ่งพิจารณาว่าของไหลทำงานนั้นส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบนพื้นโลกโดยของไหลทำงานขัดขวางรังสีแสงอาทิตย์ที่จะแผ่ออกนอกโลก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ข้อมูลของของไหลทำงานต่าง ๆ

ของไหลทำงานถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันมาก ตั้งแต่ระบบการปรับอากาศถึงระบบปั๊มความร้อน การเลือกของไหลทำงานให้เหมาะสมกับชนิดของเครื่องอัด และสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ การเปรียบเทียบสมบัติของของไหลทำงานต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงว่าของไหลทำงานชนิดใดมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการ

ตารางที่ 2.1 สมบัติของของไหลทำงานโคโลฟลูออโรคาร์บอน สารผสมของ CFCs และของไหลทำงานชนิดอื่น ๆ⁶

ชนิดของของไหลทำงาน		น้ำหนัก โมเลกุล	จุดเดือด มาตรฐาน (K)	ตัวแปรเสริมวิกฤต		ลักษณะเฉพาะ			
สัญลักษณ์ ตัวเลข	ชื่อ, สูตรโมเลกุล			T _{cr} (K)	P _{cr} (MPa)	ODF*	GWP**	ความเป็นพิษ	ความสามารถ ในการติดไฟ
ของไหลทำงาน CFCs									
R12	Dichlorodifluoromethane, CCl ₂ F ₂	120.93	243.4	385.2	4.11	1.0	3.0	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R114	1,2-Dichlorotetrafluoroethane, CClF ₂ CClF ₂	170.94	276.8	418.9	3.26	0.7	4.0	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R11	Trichlorofluoromethane, CCl ₃ F	137.80	297.0	471.2	4.40	1.0	1.0	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R113	Trichlorotrifluoroethane, CCl ₂ FCClF ₂	187.39	320.8	487.3	3.37	0.9	1.4	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R502	48.8% R22, 51.2% R115	111.64	227.6	636.5	4.27	0.6	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R500	73.8% R12, 26.2% R152a	99.31	239.7	378.7	4.42	0.7	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R505	78.0% R12, 22.0% R31	103.43	243.6	391.0	4.73	0.8	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R506	55.1% R31, 44.9% R114	93.69	260.8	415.4	5.16	0.4	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
ของไหลทำงานอื่นๆ									
R717	Ammonia, NH ₃	17.03	239.9	406.2	11.62	0.0	ไม่มีผล	ต่ำ	เล็กน้อย
R718	Water, H ₂ O	18.02	373.2	647.6	22.86	0.0	ไม่มีผล	ไม่เป็นพิษ	ไม่ติดไฟ
R630	Methylamine, CH ₃ NH ₂	31.06	266.5	430.1	7.46	0.0	n.d.	ต่ำ	สูง
-	Methanol, CH ₃ OH	32.04	338.0	513.2	7.85	0.0	n.d.	ต่ำ	-
-	Isopropylmercaptan, (CH ₃) ₂ CHSH	76.16	321.5	512.1	4.35	0.0	n.d.	ต่ำ	สูง
R600	n-Butane C ₄ H ₁₀	58.13	272.7	425.2	3.79	0.0	n.d.	ต่ำ	สูง
	n-Pentane C ₅ H ₁₂	72.15	309.2	469.7	3.37	0.0	n.d.	ต่ำ	สูง

* Ozone Depletion Factor

** Global Warming Potential

ตารางที่ 2.2 สมบัติของของไหลทำงานโคโลฟลูออโรคาร์บอนที่มีค่า ODF และ GWP ต่ำ⁶

ชนิดของของไหลทำงาน		น้ำหนัก โมเลกุล	จุดเดือด มาตรฐาน (K)	ตัวแปรเสริมวิกฤต		ลักษณะเฉพาะ			
สัญลักษณ์ ตัวเลข	ชื่อ, สูตรโมเลกุล			T _{cr} (K)	P _{cr} (MPa)	ODF*	GWP**	ความเป็นพิษ	ความสามารถ ในการติดไฟ
R22	Chlorodifluoromethane, CHClF ₂	86.48	232.4	369.2	4.97	0.05	0.30	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane, CH ₂ FCF ₃	102.00	246.7	374.3	4.06	0.0	0.26	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R152a	1,1-Difluoroethane	66.05	248.2	386.7	4.49	0.0	0.03	ต่ำ	เล็กน้อย
R134	1,1,2,2-Tetrafluoroethane, CHF ₂ CHF ₂	102.00	253.5	387.2	3.43	0.0	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R124	2-Chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane CHClFCF ₃	136.48	261.2	418.9	3.34	0.02	0.1	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R124a	1-Chloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane CHF ₂ CClF ₂	136.48	263.0	399.9	3.71	<0.1	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R142b	Chlorodifluoroethane, CH ₃ CClF ₂	100.50	263.4	410.3	4.12	0.06	0.36	ต่ำ	เล็กน้อย
RC318	Octafluorocyclobutane, C ₄ F ₈	200.40	267.4	388.5	2.78	0.0	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R160	Ethyl chloride, CH ₃ CH ₂ Cl	64.52	285.6	460.4	5.27	<0.1	n.d.	ต่ำ	เล็กน้อย
R123	Dichlorotrifluoroethane, CHCl ₂ CF ₃	152.91	300.8	458.2	3.73	0.02	0.02	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R141b	1,1-Dichloro-1-fluoroethane, CH ₃ CCl ₂ F	116.90	305.2	482.6	4.38	0.09	0.1	ต่ำ	เล็กน้อย
R280	Propyl chloride, C ₃ H ₇ Cl	78.54	319.8	503.2	4.58	<0.1	n.d.	ต่ำ	ไม่ติดไฟ
R150a	1,1-Dichloroethane	98.96	330.2	523.1	4.59	<0.1	n.d.	ต่ำ	เล็กน้อย

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติของไหลทำงานแต่ละชนิด สำหรับการทำงานในวัฏจักร non-ideal reverse Rankine cycle ช่วงอุณหภูมิ 273–343 เคลวิน²

Criterion of suitability	Degree of suitability		
	Good (4)	Quite good (3.5)	Adequate (3)
Large value of the COP	R11	R12	R134c
	R717	R22	RC318
	R123		R114
Advantageous pressure range	R12	R22	R114
	R134a	R717	R11
			R123
		RC318	
Low compression ratio	R22	R114	R11
	R12		RC318
	R171		
	R134a		
Small compressor	R22	R12	R114
			RC318
			R717
			R11
		R123	

2.3.1 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลทำงาน

ของไหลทำงานควรระเหยที่ความดันสูงกว่าความดันของบรรยากาศ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้าไปในระบบ ในขณะเดียวกันก็จะช่วยให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัดสูงขึ้นเพราะอัตราส่วนการอัดต่ำลง จุดเดือดของของไหลทำงานมีความสำคัญมาก โดยทั่วไปแล้วของไหลทำงานที่มีจุดเดือดต่ำจะถูกใช้ในการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ และของไหลทำงานที่มีจุดเดือดสูงจะถูกใช้ในการทำความเย็นที่อุณหภูมิสูง (การปรับอากาศ) จุดเดือดของของไหลทำงานจึงเป็นตัวเลขที่แสดงว่าของไหลทำงานสามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำพอเหมาะที่ความดันที่ต้องการหรือไม่ พิจารณาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ R12, R22, แอมโมเนีย ฯลฯ เป็นของไหลทำงานที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างจากการปรับอากาศถึงระบบทำความร้อน โดยของไหลทำงาน R22 ใช้กันแพร่หลายในการทำความเย็น

2.3.2 สมบัติทางเคมีของของไหลทำงานจำพวกฟรீออน

ของไหลทำงานจำพวกฟรீออน ลักษณะจะไม่มีสีและเกือบไม่แสดงกลิ่น มีจุดเดือดต่างกันตามปริมาณความกว้างของอุณหภูมิ สารฟรீออนประเภทนี้มีพิษน้อย ไม่เป็นอันตรายต่อโลหะ ไม่มีกลิ่นก่อกวนความรำคาญ และไม่ไวไฟจึงใช้ได้ในทุกสภาพ

R22

สูตรโมเลกุล CHClF_2 (Chlorodifluoromethane) จุดเดือดที่ 232.4 เคลวิน นิยมใช้มากในการใช้เป็นของไหลทำงาน ส่วนมากใช้กับเครื่องปรับอากาศหรือเครื่องทำความเย็นทั้งทางอุตสาหกรรมและพาณิชย์ เป็นแก๊สที่มีพิษน้อย มีอัตราส่วนของความดันต่ำ มีค่าเอนทัลปีของการระเหยต่อหน่วยปริมาตรสูง ค่าการทำลายโอโซนในบรรยากาศต่ำมาก เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกต่ำมาก และเป็นสารเคมีที่ไม่ไวไฟ สามารถใช้ได้กับงานต่างๆ ได้อย่างไม่มีข้อจำกัด จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นของไหลทำงาน

R12

สูตรโมเลกุล CCl_2F_2 (Dichlorodifluoromethane) จุดเดือดที่ 243.4 เคลวิน เป็นแก๊สที่มีพิษน้อย ไม่มีกลิ่นรบกวน แต่เป็นสารทำลายโอโซนในบรรยากาศ เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกสูง ปัจจุบันใช้ R134a หรือ R152a แทน

RC318

สูตรโมเลกุล C_4F_8 (Octafluorocyclobutane) จุดเดือดที่ 267.4 เคลวิน ใช้ความดันต่ำกว่า R22 และ R12 แต่ค่าเอนทัลปีของการระเหยต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำกว่า ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนต่ำ ไม่ค่อยนิยมใช้แต่ไม่มีคลอรีน ไม่ทำลายชั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศ ในอนาคตอาจจะนิยมใช้มากขึ้น

R114

สูตรโมเลกุล $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$ (1,2-Dichlorotetrafluoroethane) จุดเดือดที่ 276.8 เคลวิน ใช้เป็นสารในระบบทำความเย็นที่ใช้แรงม้าน้อย มีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์คล้ายกับ RC318 แต่มีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้มากกว่า เป็นแก๊สที่มีพิษน้อยและไม่ไวไฟ แต่เป็นสารทำลายโอโซนในบรรยากาศ เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกสูงมาก

R11

สูตรโมเลกุล CCl_3F (Trichlorofluoromethane) จุดเดือดที่ 297 เคลวิน ใช้ความดันต่ำ แต่มีอัตราส่วนของค่าความดันสูงต่อความดันต่ำมีค่าสูง เอนทัลปีของการระเหยต่อหน่วยปริมาตรต่ำ มีค่าการถ่ายโอนความร้อนดีมาก เป็นแก๊สที่มีพิษน้อยและไม่ไวไฟ แต่เป็นสารทำลายโอโซนในบรรยากาศ เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกสูง

R113

สัญลักษณ์ทางเคมี $\text{CCl}_2\text{F}-\text{CClF}_2$ (Trichlorotrifluoroethane) จุดเดือดที่ 320.8 เคลวิน ใช้ความดันต่ำ มีค่าการถ่ายโอนความร้อนต่ำ เป็นแก๊สที่มีพิษน้อยและไม่ไวไฟ แต่เป็นสารทำลายโอโซนในบรรยากาศ เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกสูง

R123, R134a และ R152a

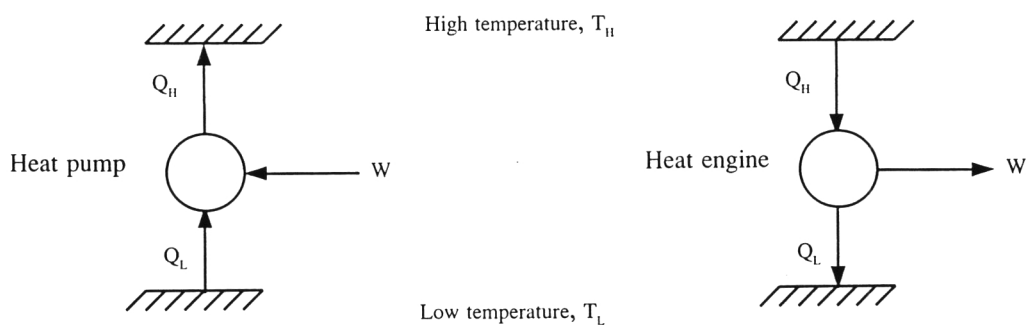
เป็นของไหลทำงานที่ยังไม่มีการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยของไหลทำงานเหล่านี้ไม่มีคลอรีน ค่าทำลายโอโซนในบรรยากาศต่ำ เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกต่ำมาก ซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะใช้ R123 แทน R11 และ R134a หรือ R152a แทน R12

R717

แอมโมเนียมีสูตรโมเลกุล NH_3 (Ammonia) เป็นแก๊สไม่มีสีแต่มีกลิ่นฉุนรุนแรง อุณหภูมิจุดเดือดอยู่ที่ความกดดันในบรรยากาศธรรมดา 239.9 เคลวิน แอมโมเนียมีค่าของความร้อนแฝงสูง (555 หน่วยความร้อนบริติช ที่ 265.22 เคลวิน) จึงเหมาะสมในการนำไปใช้กับระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ด้วยเครื่องจักรขนาดเล็ก แอมโมเนียเป็นเคมีที่มีพิษน้อย ไม่ทำลายโอโซนในบรรยากาศ ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก แต่แอมโมเนียจะไหม้หรือระเบิดได้เมื่อเข้าถึงจุดผสมกับปริมาณของอากาศ (ประมาณ 1 ส่วนของแอมโมเนียกับอากาศ 2 ส่วน) และจะยิ่งเพิ่มขึ้นอีกเมื่อผสมกับออกซิเจน

2.4 ป้อนความร้อน

ป้อนความร้อนสามารถทำการพิจารณาอย่างง่ายเช่นเดียวกันกับเครื่องจักรความร้อนแต่จะเป็นในทางตรงกันข้าม⁶ โดยเครื่องจักรความร้อนรับความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงและให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำแล้วให้งานออกมา ส่วนป้อนความร้อนต้องการงานเข้าไปเพื่อทำการเพิ่มพลังงานจากที่อุณหภูมิต่ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น รูปที่ 2.13 แสดงแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของป้อนความร้อนและเครื่องจักรความร้อน



รูปที่ 2.13 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของป้อนความร้อนและเครื่องจักรความร้อน⁶

2.4.1 ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อน

- ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนสามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการทำงาน⁶ (COP, Coefficient Of Performance) คือ อัตราส่วนของความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงต่องานที่ให้แก่ระบบ

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W} \quad (2.4.1)$$

จากการทำสมดุลพลังงานได้ $Q_H = W + Q_L$ (2.4.2)

W ทารดลอดแล้วแทนลงใน (2.4.1) $\text{COP} = \frac{Q_H}{W} = \frac{W + Q_L}{W}$ (2.4.3)

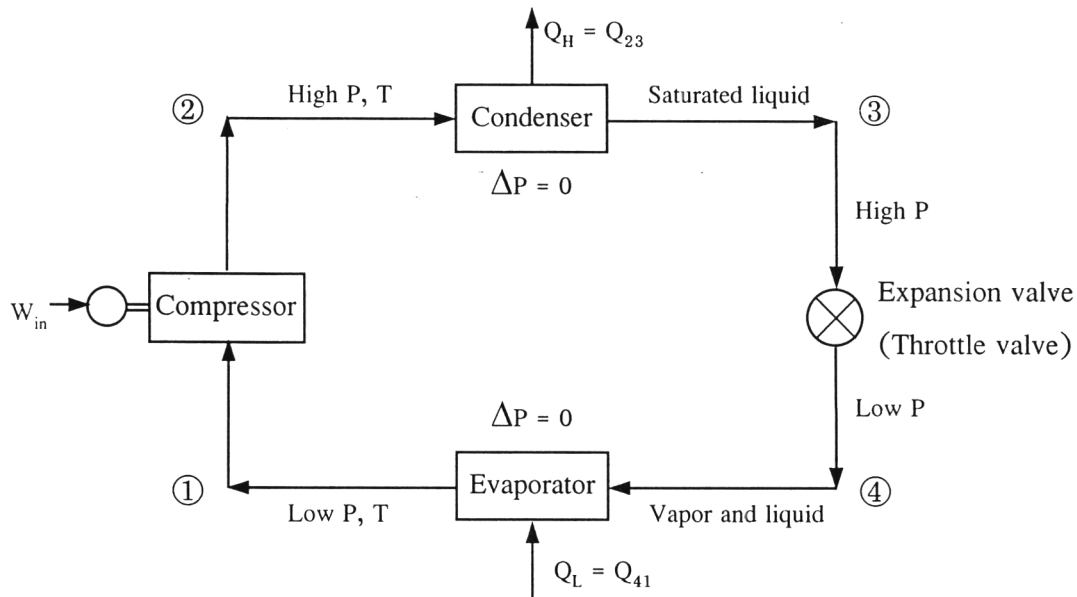
$$= 1 + \frac{Q_L}{W} = 1 + (\text{COP})_{\text{Ref.}}$$

ปั๊มความร้อนนี้นิยมนำมาใช้เพื่อเป็นการทำความร้อนในฤดูหนาว และการทำความเย็นในฤดูร้อน โดยจะอาศัยวัฏจักรต่างๆ วัฏจักรที่นิยมมี 2 วัฏจักร คือ วัฏจักรดูดกลืน (Absorption cycle) และวัฏจักรการอัด-ไอ (Vapor-compression cycle) ในการวิจัยจะศึกษาปั๊มความร้อนผลิตน้ำร้อน โดยวัฏจักรการอัด-ไอเท่านั้น

2.4.2 วัฏจักรการอัด-ไอ (Vapor-compression cycle)

วัฏจักรการอัด-ไอ เป็นวัฏจักรผันกลับของวัฏจักรคาร์โนต์⁷ ปั๊มความร้อนต้องมีการส่งและรับความร้อนภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิคงที่ การทำงานจะมีสารทำความเย็นที่เป็นของไหลทำงาน สารทำความเย็นถูกนำมาเปลี่ยนวัฏภาคโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจะระเหยโดยการดึงความร้อนเข้ามาและควบแน่นโดยการส่งผ่านความร้อนออกไป กระบวนการทั้งสองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิคงที่

รูปที่ 2.14 แสดงวัฏจักรการอัด-ไอแบบอุดมคติ ไอของของไหลทำงานออกจากเครื่องระเหยหลังจากรับความร้อนที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจาก ④ ไปยัง ① ผ่านเครื่องอัดเชิงกลแบบเอนโทรปีคงที่ไปยังความดันสูงและอุณหภูมิสูงจาก ① ไปยัง ② ความร้อนถูกจำกัดโดยการกลั่นตัวของไอในเครื่องควบแน่นจาก ② ไปยัง ③ หลังจากนั้นไอขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่ผ่านวาล์ว ③ ไปยังความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ④ เพื่อให้วัฏจักรสมบูรณ์



รูปที่ 2.14 วัฏจักรการอัด-ไอแบบอุดมคติ (Ideal vapor-compression cycle)⁷

1. เครื่องระเหย (evaporator)

ของไหลทำงานถูกส่งเข้าเครื่องระเหยและรับความร้อนจากแหล่งความร้อนคือน้ำร้อนของไหลทำงานกลายเป็นไอโดยค่าความร้อนแฝงของการเป็นไอ ทำให้เกิดเป็น 2 วัฏภาคขึ้นในเครื่องระเหยคือส่วนของของเหลวและส่วนที่เป็นไอ กระบวนการนี้ดำเนินไปภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่

2. เครื่องอัด (compressor)

เครื่องอัดแบบอะเดียแบติกจะดูดเอาไอของของไหลทำงานจากเครื่องระเหย เป็นการปรับค่าความดันและอุณหภูมิในเครื่องระเหยให้คงที่ ขณะเดียวกันเครื่องอัดจะเพิ่มความดันไอสารทำความเย็นให้มีภาวะที่จะพร้อมกลับเป็นของเหลวอีกครั้ง นั่นคืออัดให้ไอของของไหลทำงานมีภาวะไออิ่มตัวอีกครั้ง พลังงานที่ต้องการสำหรับการอัดนั้นมาจากมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องอัด อุณหภูมิของของไหลทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านเครื่องอัด

3. เครื่องควบแน่น (condenser)

ไอของของไหลทำงานที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงในเครื่องอัดถูกเปลี่ยนให้เป็นของไหลทำงานเหลวได้โดยการทำให้น้ำเย็นลงโดยใช้น้ำหล่อเย็น ที่อุณหภูมิปกติธรรมดาคือไอของของไหลทำงานระบายความร้อน (ความร้อนแฝงของการควบแน่น) ให้กับน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น เมื่อของไหลทำงานควบแน่นกลายเป็นของเหลว น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถูกระบายออกจากเครื่องควบแน่น

4. วาล์วขยายตัว (expansion or throttle valve)

วาล์วขยายตัวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดความดันของของไหลทำงานเหลวที่มีความดันสูง หลังจากออกจากเครื่องควบแน่นให้มีความดันต่ำตามที่ต้องการ เมื่อของไหลทำงานไหลผ่านวาล์วขยายตัวความดันลดลง โดยการขยายตัวเป็นแบบอะเดียแบติก

ของไหลทำงานเหลวที่มีความดันต่ำจะไหลเข้าไปในเครื่องระเหยรับเอาความร้อนจากน้ำร้อนแล้วระเหยกลายเป็นไอวนเป็นวัฏจักรต่อไป

สมมติให้กระบวนการทั้งหมดไม่มีการสูญเสียความร้อนและความดัน พลังงานจลน์และพลังงานศักย์มีค่าน้อยมาก พิจารณาส่วนต่างๆ ของกระบวนการได้ดังนี้^{8,9}

1. เครื่องระเหย จาก ④ ไปยัง ① รับพลังงานจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ (น้ำร้อน)

$$q_{in} = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (2.4.4)$$

2. เครื่องอัด จาก ① ไปยัง ② รับงานเข้าเท่ากับ w

$$w = h_2 - h_1 \quad (2.4.5)$$

3. เครื่องควบแน่น จาก ② ไปยัง ③ ส่งพลังงานออกให้กับน้ำหล่อเย็น

$$q_{out} = h_2 - h_3 \quad (2.4.6)$$

4. วาล์วขยายตัว จาก ③ ไปยัง ④

$$h_3 = h_4 \quad (2.4.7)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การทำงานของปั๊มความร้อนแบบการอัด-ไอเท่ากับ

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (2.4.8)$$

2.5 งานวิจัยในอดีต

Morgan, R. G.¹⁰ ศึกษาป้อนความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบอนุกรมโดยใช้ฟรอน 11 เป็นของเหลวทำงาน ออกแบบป้อนความร้อนแบบการอัดไอเพื่อใช้ในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ในเขตร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในตอนกลางวันเครื่องระเหยจะทำงานที่อุณหภูมิสูง (15-50 องศาเซลเซียส) แปรตามค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับเข้ามา มีการรวมระหว่างแผงรับแสงอาทิตย์กับเครื่องระเหยเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการสร้าง ซึ่งสามารถทำงานได้ดีในภาวะช่วงกว้างของอุณหภูมิ ความดันที่เครื่องระเหยต่ำรับพลังงานจากบรรยากาศ น้ำหล่อเย็นที่เครื่องควบแน่นทำงานในช่วง 35-90 องศาเซลเซียส ทำการวิจัยที่ประเทศมาเลเซีย สร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการทำงานของระบบป้อนความร้อน แสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการทำงาน โดยสัมประสิทธิ์ของการทำงานอยู่ในช่วง 2.5-3.5

Chinnappa, J. C. V., Crees, M. R., Murthy, S. S., and Srivasan, K.¹¹ ศึกษาการทำ ความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ออกแบบป้อนความร้อนระบบการทำ ความเย็นแบบการอัด-ไอโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ใช้อาร์ 22 เป็นของไหลทำงาน และการทำความเย็นระบบดูดกลืนของ แอมโมเนียกับน้ำ การใช้ R22 เป็นของไหลทำงานมีความสะดวกมากเนื่องจากควบแน่นที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ทั้งยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกต่ำมาก จากการวิจัยพบว่า การทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศระบบการอัด-ไอร่วมกับระบบดูดกลืนช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้

Comakli, O., Kaygusuz, K., Ayhan, T. and Arslan, F.¹² ได้ทำการทดลองและจำลองแบบภาวะพลวัตของระบบป้อนความร้อน 3 ชุดต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน ทั้งที่มีถึงเก็บพลังงานและไม่มีถึงเก็บพลังงานเปรียบเทียบกัน ทำการทดลองที่ Trabzon, Turkey ในเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 1990 ขณะภาวะอากาศปลอดโปร่ง ใช้น้ำผ่านแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเป็นแหล่งพลังงานให้แก่ระบบป้อนความร้อน มีแผงรับแสงอาทิตย์ 18 ชุด ต่อกันแบบอนุกรม-ขนาน แต่ละชุดของแผงรับแสงอาทิตย์ประกอบด้วยท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.25 เซนติเมตร 8 ท่อ มีพื้นที่ดูดกลืน 1.66 ตารางเมตร ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.55 มิลลิเมตร ปิดด้วยกระจก 1 แผ่นหนา 3.5 มิลลิเมตร พื้นที่ดูดกลืนรวมทั้งหมด 30 ตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านแผงรับแสงอาทิตย์ 1,200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หันไปทางทิศใต้ 28 องศาตะวันออก ระบบป้อนความร้อนที่มีส่วนเก็บพลังงานใช้แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารเปลี่ยนสถานะ (phase change materials) บรรจุในถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เมตร สูง 3.2 เมตร ผลการทดลองได้ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ 50-80 เปอร์เซ็นต์ แต่ประสิทธิภาพของถังเก็บพลังงานมีค่าต่ำประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ป้อนความร้อนมีค่า COP 5-8 และ COP ของระบบอยู่ในช่วง 3-7

Morrison, G. L.¹³ ศึกษาทดลองปั๊มความร้อนผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทำการวิจัยที่ Sydney, Australia ปั๊มความร้อนผลิตน้ำร้อนโดยแผงรับแสงอาทิตย์เป็นเครื่องระเหยของระบบปั๊มความร้อน ข้อดีคือพลังงานขาเข้าระบบปั๊มความร้อนสูงขึ้นคืออุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงมากกว่าอุณหภูมิห้อง ทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างด้วย มีการออกแบบระบบ 3 แบบ แบบแรกออกแบบให้เครื่องควบแน่นอยู่ภายนอกถังน้ำ แบบที่ 2 ออกแบบให้เครื่องควบแน่นอยู่ภายในถังน้ำ แบบที่ 3 ออกแบบให้มีการรวมกันระหว่างเครื่องระเหยกับเครื่องควบแน่นทำงานด้วยกันซึ่งจะไม่เกิดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากระบบปั๊มหมุนเวียน จำลองแบบระบบปั๊มความร้อนโดยใช้โปรแกรม TRNSYS ในการกำหนดการดำเนินการของปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับ การทดลองระบบปั๊มความร้อนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองที่วัดได้ ทำการทดลอง 3 ช่วงเวลา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำงานเรียงลำดับจากสูงไปต่ำดังนี้ ช่วง 10:00 น. ถึง 16:00 น. ช่วง 6:00 น. ถึง 18:00 น. และ 24 ชั่วโมง

Kaygusuz, K.¹⁴ ศึกษาการจำลองแบบโดยใช้ SOLSIM (Solar Thermal Energy Systems) สำหรับแผงรับแสงอาทิตย์และระบบปั๊มความร้อนของอากาศในห้องที่มีส่วนเก็บพลังงานใช้แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเป็นสารเก็บพลังงานโดยอาศัยการเปลี่ยนเฟสของวัสดุ (phase-change material) ทดลองศึกษาปั๊มความร้อนระบบรวมอนุกรมและขนาน ระบบอนุกรมและระบบขนานในห้องปฏิบัติการที่เมือง Trabzon, Turkey หาค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของระบบปั๊มความร้อนที่มีส่วนเก็บพลังงาน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบรวมอนุกรมและขนานเหมาะสมมากสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยประหยัดพลังงาน 12,056 kWh ในขณะที่ระบบอนุกรมช่วยประหยัดพลังงาน 10,120 kWh และระบบขนานช่วยประหยัดพลังงาน 9,390 kWh แต่ก่อนที่จะทำการติดตั้งระบบปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้องทำการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ก่อน

Comakli, O. ; Bayramoglu, M. ; and Kaygusuz, K.¹⁵ พัฒนาแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบปั๊มความร้อนที่มีส่วนเก็บพลังงาน ใช้ R22 เป็นของไหลทำงาน แบบจำลองประกอบด้วยความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอุปกรณ์พื้นฐานในระบบ เช่น แผงรับแสงอาทิตย์ ถึงเก็บพลังงาน เครื่องอัด เครื่องควบแน่น และเครื่องระเหย ตัวแปรเสริมบางค่าของระบบสามารถคำนวณโดยใช้ผลจากการทดลองที่ได้จากระดับนาร่อง ศึกษาจำลองแบบปฏิบัติโดยการกำหนดปัจจัยของการออกแบบที่สำคัญบางตัวในระบบการทำงาน กำหนดให้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบเอียงทำมุมกับระนาบระดับเป็นค่าคงที่ในแต่ละวัน ไม่พิจารณาถึงความดันต่างในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น R22 ออกจากเครื่องระเหยเป็นไออิ่มตัว การขยายตัวที่วาล์วขยายตัวพิจารณาที่เอนโทรปีคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแผงรับแสงอาทิตย์จาก 19 เป็น 24 ชุด ค่ามากที่สุดของ COP เพิ่มขึ้น 34% ในขณะที่ราคาค่าอุปกรณ์เพิ่มขึ้น 71%

Siddiqui, A. M.¹⁶ ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและผลของของไหลผ่านแผงรับแสงอาทิตย์แบบท่อของวงช้าแบบปิดระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ thermosyphonic ที่ Aligarh (ละติจูดที่ 27 องศา 5 ลิปดา) สำหรับข้อมูลการทดลองที่ได้ แผงรับแสงอาทิตย์หันทางทิศใต้ ทำมุม 45 องศากับระนาบระดับ ข้อมูลที่ได้คืออุณหภูมิของน้ำร้อนที่อัตราการไหล 0, 50 และ 60 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมจากการบันทึกค่าบริเวณที่ทำการทดลอง ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเสริมไร้หน่วยเพื่อประมาณค่าการถ่ายโอนความร้อน และอัตราการไหลของของไหล เลขเรย์โนลด์และเลข Nusselt แสดงลักษณะที่น่าสนใจเมื่อทำการคำนวณย้อนกลับได้ตัวแปรเสริมไร้หน่วย $S_i = S/U_i (T_p - T_a)$ กลุ่มของเลข Nu Re Gr และ Pr ในรูปแบบพิเศษ $NuGr/Pr = 4.12Re^{1.67}$ แสดงว่าระบบสามารถเกิดการหมุนเวียนได้เอง คำนวณหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ได้ประสิทธิภาพ 20-50% กำหนดให้ $F_R(\alpha\tau) = 0.5$ และ $F_R U_i = 0.6$

Matrawy, K. K., and Farkas, I.¹⁷ ศึกษาเปรียบเทียบแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่น 3 แบบ แผงรับแสงอาทิตย์มีแผ่นดูดกลืนสองชั้นขนานกัน (TPPC, two parallel plate collectors) แผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางขนานกัน (PTC, parallel tubes collectors) และแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางแบบวกเวียน (STC, serpentine tubes collectors) การวิเคราะห์ TPPC ทำการพัฒนาและประยุกต์การจำลองแบบแผงรับแสงอาทิตย์ ผลชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์มีแผ่นดูดกลืนสองชั้นขนานกันมากกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางแบบวกเวียน 6% และมากกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางขนานกัน 10% เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์กับเวลาพบว่าช่วงเช้าอุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์ทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบต่อพื้นที่มีค่าต่ำและอุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเดียวกัน เวลากลางวันอุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางขนานกันมีค่าสูงที่สุด รองมาคืออุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อวางแบบวกเวียน และอุณหภูมิต่ำที่สุดคืออุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์มีแผ่นดูดกลืนสองชั้นขนานกัน หลังจากเวลา 13:00 น. อุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์ทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน ให้การกระจายของอุณหภูมิที่ผิวแผ่นดูดกลืนสม่ำเสมอๆ กับการกระจายของอุณหภูมิของของไหลทำงานระหว่างแผ่นดูดกลืนทั้งสอง