

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

#### 2.1.1 ดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อนรูปทรงกลมที่มีความหนาแน่นสูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1.39 \times 10^9$  m และมีระยะห่างเฉลี่ยจากโลกประมาณ  $1.5 \times 10^{11}$  m โดยดวงอาทิตย์จะเปรียบเสมือนวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 5,777 K อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ  $8 \times 10^6$  K ถึง  $40 \times 10^6$  K และมีความหนาแน่นประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ ดวงอาทิตย์เปรียบได้กับเตาปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชันของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermo-nuclear) หลายกระบวนการ ทุกกระบวนการเริ่มด้วยการเปลี่ยนธาตุเริ่มต้นคือไฮโดรเจนเป็นธาตุสุดท้ายคือฮีเลียม

ในปฏิกิริยา มวลรวมของอะตอมที่เข้าทำปฏิกิริยาจะน้อยกว่ามวลรวมหลังปฏิกิริยา มวลที่หายไปถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (และส่วนน้อยเป็นพลังงานจลน์ของอะตอมและอนุภาค) โดยมวลของดวงอาทิตย์ลดลงในอัตราประมาณ  $4 \times 10^9$  kg/s ควบคุมการปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ในอัตรา  $3.85 \times 10^{23}$  kW (จางจิตร หิรัญธาดา, 2541; กฤษณพงษ์ กิรติกร, 2547) เป็นไปตามสมการ

$$E = mc^2 \tag{2.1}$$

เมื่อ

E คือ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (kW)

m คือ มวลที่หายไป (m)

c คือ อัตราเร็วของแสงในสภาวะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s

#### 2.1.2 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์จึงมีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7 % ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ  $1.495 \times 10^{11}$  m ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่

ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลกที่เวลาต่างกันจึงมีค่าไม่เท่ากัน ค่าคงที่แสงอาทิตย์ (Solar constant,  $G_{sc}$ ) คือค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ  $1,367 \text{ W/m}^2$  พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลก (Extraterrestrial radiation) มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า  $\pm 1.5 \%$ ) และอีกสาเหตุหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลกมีค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีอาทิตย์เหนือบรรยากาศจะอยู่ในช่วง  $\pm 3 \%$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลก  $G_{on}$  ที่วันลำดับที่  $n$  ของปี และค่าคงที่แสงอาทิตย์ได้ดังสมการ (จงจิตร ธีรญาณ, 2541; กฤษณพงษ์ กิริติกร, 2547)

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0.333 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ

$G_{on}$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลก ( $\text{W/m}^2$ )

$G_{sc}$  คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์ ( $\text{W/m}^2$ )

$n$  คือ วันลำดับที่  $n$  ของปี

### 2.1.3 รังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลกหรือรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นราบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. รังสีตรง (Direct or beam radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ได้จากดวงอาทิตย์โดยตรง ทำให้มีทิศทางที่แน่นอนสามารถนำไปใช้งานได้ดี เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีตรง คือ ไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer)
2. รังสีกระจาย (Diffuse radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ได้รับหลังจากที่มีการกระจาย หักเห และสะท้อนในชั้นบรรยากาศหรือสิ่งแวดล้อม ทำให้มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีกระจาย คือ ไพราโนมิเตอร์ชนิดที่มี shading ring
3. รังสีรวม (Total or global radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย หรืออาจหาได้จากการอินทิเกรตความเข้มของรังสีอาทิตย์ตลอดทุกๆ ช่วงความยาวคลื่น การหาค่ารังสีอาทิตย์รวมบนพื้นราบสามารถหาได้จากเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีรวม คือ ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) หรือจากสมการเปรียบเทียบกับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

### 2.1.3.1 ทิศทางของรังสีตรง

สถานีบนพื้นโลกที่วัดค่ารังสีอาทิตย์ จะมีไพราโนมิเตอร์วัดค่ารังสีรวมที่ตกบนพื้นราบในแนวระดับ ในกรณีที่ต้องการค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นเอียง จากแนวระนาบที่มุมต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายโดยใช้มุมต่างๆ ดังนี้

มุมซีกนิธ (Zenith angle,  $\theta_z$ ) คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากกับระนาบระดับและแนวลำแสงอาทิตย์

มวลอากาศ (Air mass,  $m$ ) คือ สัดส่วนของความหนาของบรรยากาศที่รังสีตรงส่องผ่านต่อความหนาของบรรยากาศเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งตรงศีรษะ นอกบรรยากาศกำหนดให้มวลอากาศเท่ากับ 0 สำหรับที่ระดับน้ำทะเล ค่ามวลอากาศได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (จงจิตร หิรัญลาก, 2541)

$$m = \sec \theta_z \quad (2.3)$$

โดย  $0 \leq \theta_z \leq 70$

$$\begin{aligned} m &= \left[ 1229 + (614 \sin \alpha_s)^2 \right]^{1/2} - 614 \sin \alpha_s \\ &= \left[ \sin \alpha_s + 0.15 (\alpha_s + 3.9)^{-1.253} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดย  $\theta_z \geq 70$

เมื่อ

$\alpha_s$  คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

ละติจูด (Latitude,  $\phi$ ) คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือ กำหนดให้มีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง  $-90^\circ$  ถึง  $90^\circ$

มุมเอียง (Slope,  $\beta$ ) คือ มุมระหว่างพื้นผิวของระนาบรับรังสีกับแนวระดับ มีค่าอยู่ระหว่าง  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$

มุมอะซิมุท (Azimuyh angle,  $\gamma$ ) คือ มุมระหว่างทิศใต้กับทิศทางการหันหน้าของ แผงรับรังสีอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  โดยเป็นศูนย์เมื่อหันไปทางทิศใต้ ( $\gamma = 0$ ) เป็นบวกเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันตก  $\gamma =$  บวก (+), เป็นลบเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันออก  $\gamma =$  ลบ (-)

มุมชั่วโมง (Hour angle) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือตะวันตก ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นองศา (ของเส้นโค้งอิกัวเตอร์) หรือเป็นชั่วโมง (วัดจาก

เที่ยงสุริยะ) เวลาที่ใช้ในการคำนวณ เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์จะเป็นเวลาสุริยะ (Solar time) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเวลามาฬิกาท้องถิ่น (Standard time) ซึ่งตำแหน่งดวงอาทิตย์กำหนดโดยค่ามุมชั่วโมง (Hour angle,  $\omega$ ) โดยการโคจรของดวงอาทิตย์จะใช้เวลา 4 นาทีในแต่ละองศา หรือ  $15^\circ$  ในแต่ละ 1 ชั่วโมง ช่วงบ่ายจะมีค่าเป็นบวก (+) ช่วงเช้า มีค่าเป็นลบ (-) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

$$\omega = \frac{t}{24} \times 360^\circ = 15t \quad (2.5)$$

เมื่อ

$\omega$  คือ มุมชั่วโมง

$t$  คือ เวลาที่วัดหลังจากเที่ยงสุริยะ (Hr)

เวลาสุริยะ (Solar time)

เวลาสุริยะเป็นเวลาที่ถูกรับตำแหน่งเฉพาะของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ไม่ใช่เวลามาฬิกาท้องถิ่น (Local clock time) หรือเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard time) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{Solar Time} = \text{Standard Time} \pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.6)$$

สำหรับเครื่องหมายบวก ( $\pm$ ) มีค่าเป็นบวก (+) สำหรับซีกโลกตะวันตก มีค่าเป็นลบ (-) สำหรับซีกโลกตะวันออก

ค่า E เป็นสมการเวลาสามารถหาได้จาก

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (2.7)$$

โดยที่ค่า B สามารถคำนวณได้จาก

$$B = \frac{360(n-81)}{365} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$L_{st}$  คือ เส้นแวงที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น

$L_{loc}$  คือ เส้นแวงของตำแหน่งที่ตั้ง (หน่วยเป็นองศาตะวันออก)

E คือ สมการเวลา

$n$  คือ วันที่ของปี (Julian date),  $1 \leq n \leq 365$

มุมเดคลิเนชัน (Declination angle,  $\delta$ ) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมเดคลิเนชันมีค่าเปลี่ยนไปทุกวันระหว่าง  $-23.45^\circ$  ถึง  $23.45^\circ$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ

$n$  คือ วันที่ของปี (Julian Date),  $1 \leq n \leq 365$

มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle,  $\alpha_s$ ) คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวลำแสงอาทิตย์ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.10)$$

เมื่อ

$\alpha_s$  คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

$\phi$  คือ ละติจูด (Latitude)

$\delta$  คือ เดคลิเนชัน (Declination angle)

$\omega$  คือ มุมชั่วโมง (Hour angle)

มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle,  $\gamma_s$ ) คือ มุมระหว่างระนาบแนวตั้งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียนท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวตั้งดวงอาทิตย์ไปทางตะวันตกมีค่าเป็นบวก วัดไปทางตะวันออกมีค่าเป็นลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่ทิศใต้ มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง  $-180^\circ$  ถึง  $180^\circ$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$\gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$\gamma_s$  คือ มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle)

$\alpha_s$  คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

$\delta$  คือ เดคลิเนชัน (Declination angle)

$\omega$  คือ มุมชั่วโมง (Hour angle)

สามารถหาค่ามุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (Sunset hour angle,  $\omega_s$ ) ได้จาก

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.12)$$

เมื่อ

- $\delta$  คือ มุมเดคลิชัน (Declination angle) ( $^{\circ}$ )
- $\omega_s$  คือ มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (Sunset hour angle) ( $^{\circ}$ )
- $\phi$  คือ มุมละติจูด (Latitude) ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตั้งอยู่ ( $^{\circ}$ )

มุมตกกระทบ (Incidence Angle,  $\theta$ )

มุมตกกระทบ คือมุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์บนพื้นผิวกับแนวตั้งฉากของพื้นผิว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมอื่นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร ธีรฤฎาภ, 2541)

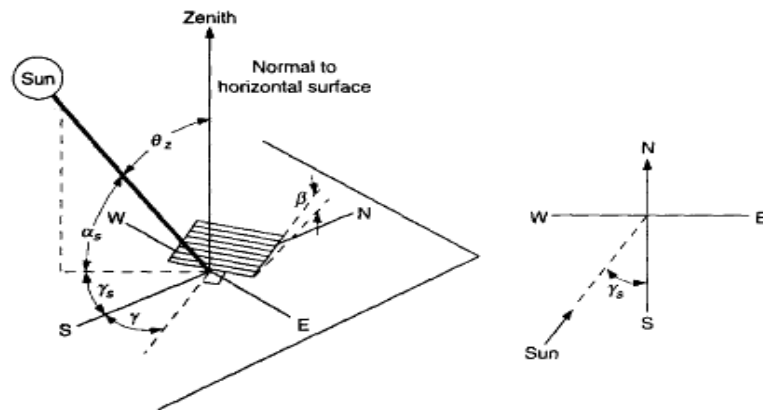
$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.13)$$

กรณีพื้นราบ ( $\beta = 0^{\circ}$ ) มุมตกกระทบ คือ มุม ซินิธ

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.14)$$

เมื่อ

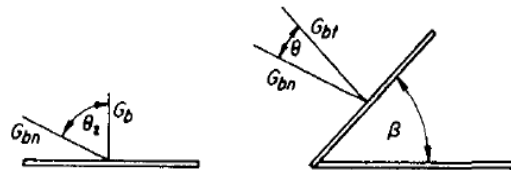
- $\theta$  = มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นเอียง ( $^{\circ}$ )
- $\theta_z$  = มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นราบ ( $^{\circ}$ )
- $\beta$  = มุมเอียงจากแนวระดับ ( $^{\circ}$ )
- $\gamma$  = มุมอะซิมูท (Azimuyh angle)



รูปที่ 2.1 พื้นผิวรับแสงและมุมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวเอียง (Duffie and Beckman, 1991)

2.1.3.2 ค่ารังสีตรงบนพื้นเอียง

อัตราส่วนรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ



รูปที่ 2.2 มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบและพื้นเอียง (Duffie and Beckman, 1991)

โดยที่อัตราส่วนรังสีตรงที่ตกกระทบพื้นเอียงต่อรังสีตรงที่ตกกระทบพื้นราบ ( $R_b$ ) ที่เวลาใดๆ สามารถหาได้จากสมการ

$$R_b = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bt} \cos \theta}{G_b \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \tag{2.15}$$

เมื่อ

$R_b$  คือ รังสีตกกระทบพื้นราบ

$G_b$  คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบ ( $W/m^2$ )

$G_{bt}$  คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นเอียง ( $W/m^2$ )

ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นราบเมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลกในแต่ละวันจากดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตกสามารถคำนวณได้จาก

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.16)$$

เมื่อ

$H_0$  คือ รังสีอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศรายวัน ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{day}$ )

$G_{sc}$  คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์มีค่า  $1,367 \text{ W}/\text{m}^2$

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลรังสีอาทิตย์สามารถประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ยได้โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงสถิติของรังสีอาทิตย์กับชั่วโมงที่มีแดด

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \left[ a + b \left( \frac{\bar{S}}{\bar{N}} \right) \right] \quad (2.17)$$

เมื่อ

$a, b$  คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอย โดยแสดงในตารางที่ 2.1

$\bar{H}$  คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{day}$ )

$\bar{N}$  คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของความยาวนานของวัน

$$\text{เมื่อ } N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

$\bar{S}$  คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของชั่วโมงที่มีแดด โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1998) แสดงในตารางที่ 2.2

ดัชนีเมฆรายชั่วโมง (Hourly cloudiness index,  $k_T$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงบนพื้นราบ ( $I$ ) ต่อดัชนีรายชั่วโมงของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ ( $I_0$ )

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2.18)$$

ดัชนีเมฆรายวัน (Daily cloudiness index,  $K_T$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายวันบนพื้นราบ ( $H$ ) ต่อดัชนีรายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ ( $H_0$ )

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (2.19)$$

ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน ( $\bar{K}_T$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบ ( $\bar{H}$ ) ต่อดัชนีรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ ( $\bar{H}_0$ )

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \left( \frac{\bar{S}}{\bar{N}} \right) \quad (2.20)$$

โดยที่  $I$ ,  $H$  และ  $\bar{H}$  เป็นค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์ สำหรับ  $I_0$ ,  $H_0$  และ  $\bar{H}_0$  เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

**ตารางที่ 2.1** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรังสีรายวันต่อรังสีนอกบรรยากาศ และชั่วโมงที่มีแดดต่อความยาวนานของวัน โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานี

Station	Mean of $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$	Regression Coefficient		$R^+$	$RSME^{++}$
		a	b		
กรุงเทพ	0.5354	0.3097	0.3914	0.8776	0.0612
เชียงใหม่	0.5694	0.3579	0.3531	0.9049	0.0624
อุบลราชธานี	0.5534	0.2626	0.4526	0.9369	0.0695
หาดใหญ่	0.5271	0.2733	0.4344	0.8584	0.0416

$R^+$  คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (The correlation coefficient)

$RSME^{++}$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

**ตารางที่ 2.2** ชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยของแต่ละเดือน โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1996)

Month	$\bar{S}$ (hrs)	Month	$\bar{S}$ (hrs)
January	8.16	July	5.17
February	8.29	August	4.65
March	8.60	September	4.65
April	7.44	October	5.05
May	6.54	November	5.53
June	4.98	December	7.88

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

จากรังสีอาทิตย์รายวันสามารถหาค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง โดยกำหนดค่าอัตราส่วนรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงต่อรังสีอาทิตย์รายวัน ( $r_t$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left( \frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \cos \omega_s} \right] \quad (2.21)$$

โดยที่

$$a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60)$$

ค่า  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  และ  $b_2$  ที่สถานีวัดต่างๆของประเทศไทยแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  และ  $b_2$  ที่สถานีวัดต่างๆของประเทศไทย

สถานี	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
KMUTT	0.792	-0.250	0.189	0.471
เชียงใหม่	0.514	0.228	0.512	0.083
อุบลราชธานี	0.760	-0.031	0.207	0.238
หาดใหญ่	0.607	-0.124	0.417	0.007

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

อัตราส่วนรังสีอาทิตย์กระจายรายวัน ( $H_d$ ) ต่อรังสีอาทิตย์รวมรายวัน ( $H$ ) บนพื้นราบสามารถคำนวณได้จาก

$$H_d = -4.6408H + 26.5495 \left( \frac{H}{H_0} \right) H - 28.3422 \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 H - 31.4546 \left( \frac{H}{H_0} \right)^3 H + 46.4421 \left( \frac{H}{H_0} \right)^4 H \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$H_d = \text{รังสีอาทิตย์กระจายรายวัน (MJ/m}^2\text{day)}$$

$$H = \text{รังสีอาทิตย์รวมรายวัน (MJ/m}^2\text{day)}$$

ค่ารังสีอาทิตย์กระจายรายชั่วโมง ( $I_d$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$I_d = H_d \times \frac{\pi}{24} \left( \frac{\cos \omega \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{2\pi \omega_s \cos \omega_s}{360}} \right) \quad (2.23)$$

โดยที่สามารถหาค่า  $I_b$  ได้จากสมการ

$$I_b = I - I_d \quad (2.24)$$

รังสีอาทิตย์ขณะที่ตกผ่านชั้นบรรยากาศมาที่ผิวโลก บางส่วนจะถูกดูดกลืน บางส่วนสะท้อนกลับสู่บรรยากาศ และบางส่วนทำให้รังสีกระจาย (Diffuse radiation) ทำให้ค่ารังสีตรง (Direct or beam radiation) ตกที่พื้นผิวโลกน้อยลง รังสีรวม (Global radiation) จะประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากก้อนเมฆและแอโรซอลหรือฝุ่นละอองดังนั้น ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นเอียง ( $L_T$ ) (เกษม โพธิ์งาม, 2545) สามารถคำนวณได้จากสมการ (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.25)$$

เมื่อ

$I_T$  = รังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียง ( $W/m^2$ )

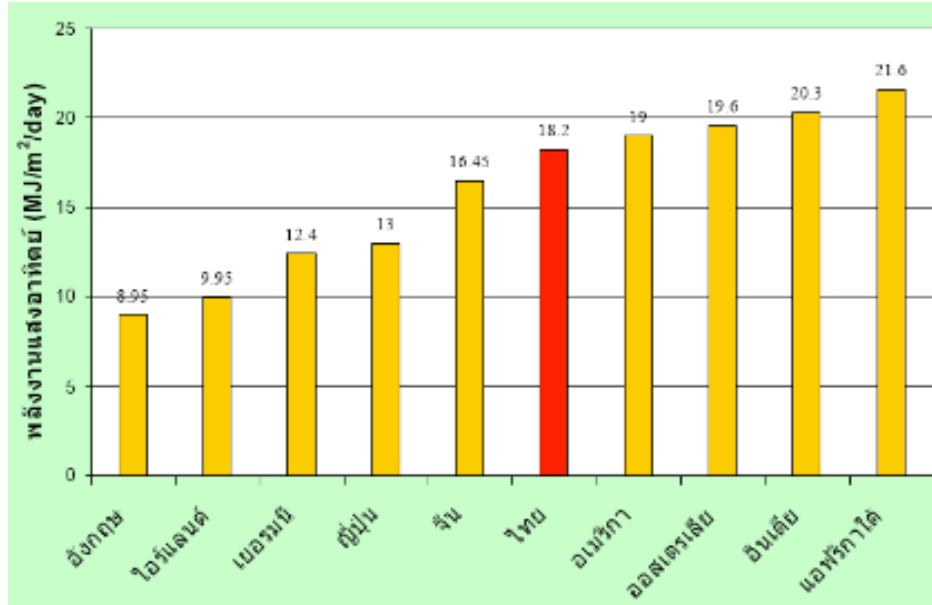
$I$  = รังสีอาทิตย์รวมบนในแนวระดับ ( $W/m^2$ )

$I_d$  = รังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ ( $W/m^2$ )

$\rho_g$  = สภาพการสะท้อนรังสีของพื้น

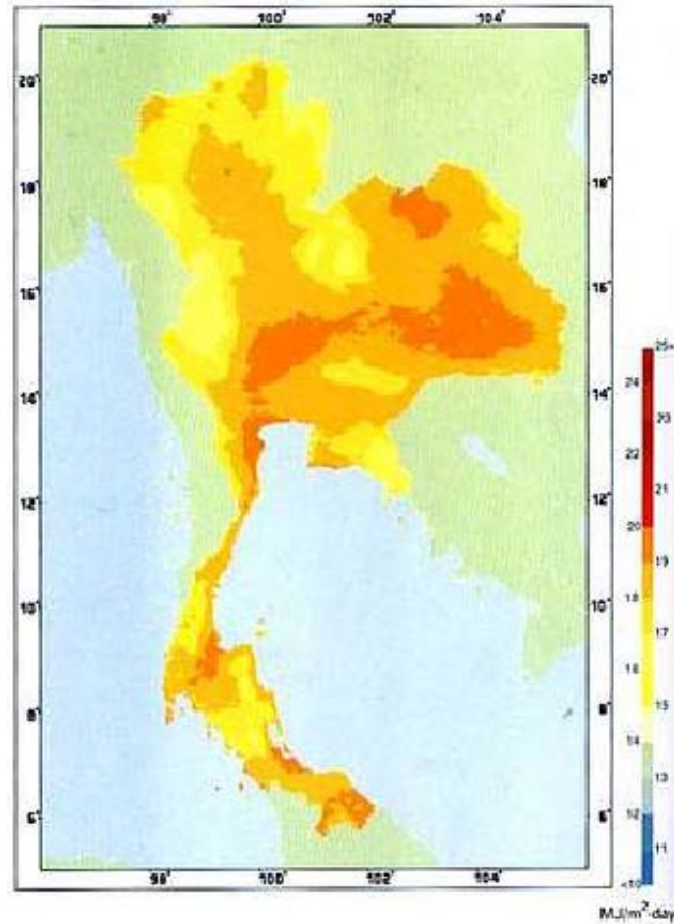
#### 2.1.4 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m<sup>2</sup>day หรือ 5.05 kWh/m<sup>2</sup>/day จัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหลายๆ ประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเมื่อเทียบกับประเทศต่างๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

การกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศไทย ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m<sup>2</sup>day เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่า บริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัด นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อัญญา และลพบุรี โดยได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m<sup>2</sup>day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18 ถึง 19 MJ/m<sup>2</sup>day โดยแสดงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นแผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยของ พ.ศ. 2542 โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)



รูปที่ 2.4 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

### 2.1.5 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์

แนวโน้มการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับแนวโน้มการใช้ของโลก คือ จะมีการขยายตัวในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มาก แต่จะเป็นเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการเป็นหลัก สำหรับในภาคเกษตรก็จะมีการรวมกลุ่มโดยจะมีส่วนปกครองส่วนท้องถิ่น เช่น องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) หรือหัวหน้ากลุ่มในท้องถิ่นเป็นผู้ประสานงานนำเทคโนโลยีที่ต้องการเข้ามาในท้องถิ่น ซึ่งหน่วยงานที่รับผิดชอบเรื่องการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) โดยให้มีเอกชนเข้ามามีโอกาสในการผลิตไฟฟ้าแล้วขายไฟฟ้า ต่อให้กับ EGAT และการผลิตไฟฟ้านี้ก็มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย โดยการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ (ชาดา วรณโชติกุล และคณะ, 2551)

### 2.1.5.1 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ส่วนมากใช้ซิลิคอน (Silicon) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบ พื้นผิวจะถูกเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ไปต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าและสามารถทำงานได้ โดยการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็น 3 ระบบ โดยแบ่งตามลักษณะการใช้และการนำไฟฟ้ามาใช้ ได้แก่

- ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดติดตั้งอิสระ (Stand-alone solar system) สามารถใช้ผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลหรือในที่ซึ่งไม่มีไฟฟ้าใช้ หรือใช้ในพื้นที่ที่ระบบสายส่งไฟฟ้าหลักไปไม่ถึง
- ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่อเชื่อมระบบสายส่ง (Grid connected solar system) สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้าที่ผลิตได้และจากระบบสายส่ง หรือขายคืนไฟฟ้าที่เกินความต้องการกลับสู่สายส่งการไฟฟ้าได้
- ระบบประจุแบตเตอรี่พลังงานแสงอาทิตย์ (Battery charging system) มีการเก็บไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน เพื่อไปใช้ในเวลากลางคืน โดยการนำไปเพิ่มการประจุของชุดแบตเตอรี่เก็บไฟที่ผลิตได้ไว้ในแบตเตอรี่ หลังจากนั้น จึงนำไฟฟ้าไปใช้งานตามความต้องการ (ชาดา วรุณ โชติกุล และคณะ, 2551)

2. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการรวมแสงอาทิตย์ให้มีความเข้มกว่ารังสีเดิมหลายๆเท่า แล้วทำการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังส่วนที่รับรังสีอาทิตย์เพื่อส่งความร้อนไปยังตัวรับความร้อนซึ่งบรรจุของเหลวเพื่อดูดซับพลังงานความร้อนไว้เพื่อส่งไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันหรือนำไปกักเก็บไว้เพื่อใช้งานต่อไป โดยการรวมแสงจะใช้ทั้งระบบ Parabolic troughs ซึ่งมีลักษณะเป็นรางยาวโค้งมีติเดียว หรือ แบบ Power Tower โดยมีใช้แผงกระจกขนาดใหญ่จำนวนมากสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังหอคอยรับความร้อน และแบบสุดท้ายเป็นแบบ Parabolic Dishes ประกอบด้วยตัวรับแสงรูปแบบจานพาราโบลาที่มีจุดศูนย์รวมแสงตรงกลางสะท้อนไปยังตัวรับความร้อน (อโศก ศรีทองธรรม, 2551)

### 2.1.5.2 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน ปัจจุบันมีการใช้งาน 2 ลักษณะคือ

1. พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนสำหรับการอบแห้ง เป็นระบบที่เครื่องอบแห้งทำงานโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ การหมุนเวียนของอากาศอาศัยหลักการขยายตัวของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศเพื่อช่วยถ่านเทาอากาศขึ้น (Passive) หรือมีเครื่องมือที่ช่วยให้อากาศไหลเวียนตามทิศทางที่ต้องการ (Active) ให้มีการไหลของอากาศผ่านระบบอากาศที่ไหลผ่านห้องอบจะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นของวัสดุจึงสามารถพาความชื้นจากเครื่อง

อบแห้งออกสู่ภายนอกทำให้วัสดุที่อบไว้แห้งได้ และยังมีการพัฒนาให้มีการอบแห้งระบบผสมผสาน (Hybrid) คือระบบที่อาศัยพลังงานในรูปแบบอื่นๆ เข้าช่วยเพื่อให้ระยะเวลาในการอบวัสดุเร็วขึ้น (อโศก ศรีทองธรรม, 2551)

2. พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนสำหรับผลิตน้ำร้อน เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยอาศัยพื้นผิวหรือของเหลวที่สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นความร้อน จากนั้นก็เก็บไว้และนำความร้อนที่ผลิตได้เพื่อใช้ต่อไป สำหรับการผลิตไฟฟ้า ความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็จะถูกทำให้กลายเป็นไอเพื่อจ่ายให้เครื่องจักรหรือจ่ายความร้อนโดยตรงเพื่อทำให้เครื่องจักรร้อนและทำการผลิตไฟฟ้า เทคโนโลยีนี้จะให้กำลังไฟฟ้าสูงมากแต่ต้องใช้พื้นที่มาก ในการติดตั้ง Reflector แล้วยังขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์ที่ส่องตรงยังตัวรับพลังงานด้วยระบบผลิตความร้อนจากแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ตัวเก็บรังสีความร้อน (Solar collector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมพลังงานจากดวงอาทิตย์และแปลงความร้อนที่สามารถนำไปใช้งานอื่นๆ ต่อไป และ ถังเก็บน้ำ (Water storage) (ธาดา วรณ โชติกุล และคณะ, 2551)

ในปัจจุบันประเทศไทยผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ 30 MW แต่ตามแผนพัฒนาทางด้านพลังงานของประเทศ ประเทศไทยมีเป้าหมายจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ 45 MW ภายในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วยกันแล้ว ว่า พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจไม่มากนักจากแผนพัฒนาการใช้พลังงานของรัฐบาล (ธาดา วรณ โชติกุล และคณะ, 2551)

**ตารางที่ 2.4** เป้าหมายของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2011

Energy Type	Current Renewable Energy Generation (MW)	Target of Renewable Energy Generation (MW)	Amount of Increased Capacity (MW)
Biomass	1,977	2,800	823
Municipal Solid Waste	4	100	96
Biogas	5	30	25
Hydro	44	156	112
Wind	1	115	114
Solar	30	45	15
<b>Total</b>	<b>2,061</b>	<b>3,246</b>	<b>1,185</b>

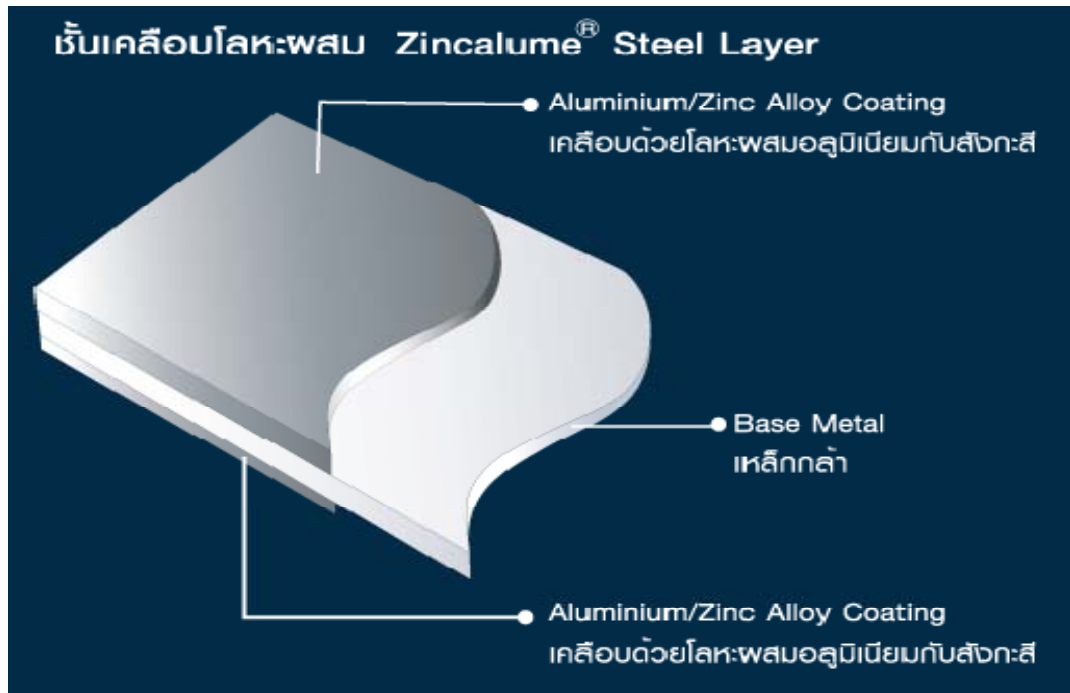
ที่มา : Narupat Amornkosit, 2007

## 2.2 หลังคามทัลชีท

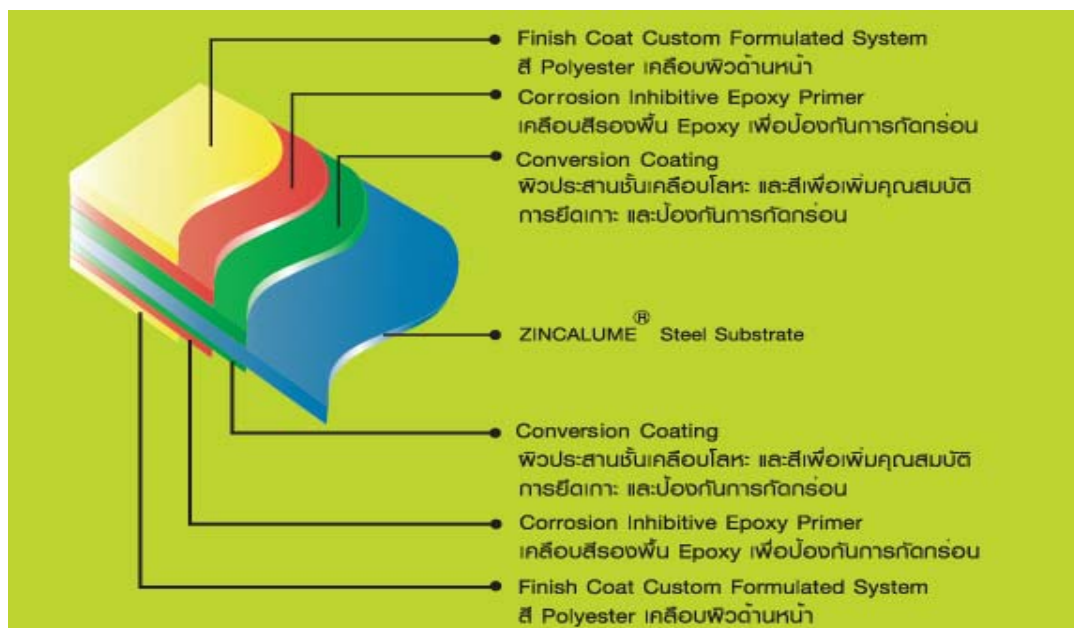
เมทัลชีท (Metal sheet) คือ แผ่นโลหะหรือแผ่นเหล็กโดยทั่วไป ซึ่งในงานหลังคานั้น จะหมายถึง แผ่นเหล็กที่มีลอนที่ใช้ทำหลังคา (Corrugate metal sheet) นั่นก็คือแผ่นหลังคาเหล็กนั่นเอง โดยแผ่นหลังคาเมทัลชีทมีคุณสมบัติเด่นๆเช่น เหนียว แข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี ติดตั้งง่าย คัดโค้งได้ อายุการใช้งานยาวนานมากกว่า 20 ปีและที่สำคัญราคาถูก จึงมีการนำแผ่นหลังคาเมทัลชีทมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันแทนสังกะสีและกระเบื้องหลังคา แผ่นหลังคาเมทัลชีทที่ใช้กันทั่วไปในประเทศไทย มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. แผ่นเหล็กอบสังกะสีหรือแผ่นเหล็กเคลือบกัลวาไนซ์ (Galvanized) เป็นการนำแผ่นเหล็กมาเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียว
2. แผ่นเหล็กเคลือบอะลูซิงค์ (Aluzinc, AZ) เป็นการนำแผ่นเหล็กมาเคลือบด้วยอะลูมิเนียม (Al) และสังกะสี (Zn) บนแผ่นหลังคาเมทัลชีททำให้ได้แผ่นหลังคาเหล็กที่ทนทานต่อสภาพอากาศ สามารถป้องกันสนิมและป้องกันการกัดกร่อนได้ดี โดยอะลูมิเนียมจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเนื้อเหล็ก ส่วนสังกะสีช่วยป้องกันการกัดกร่อนบริเวณขอบตัดและรอยขีดข่วนด้วยปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic reaction) สารประกอบสังกะสีจะสละตัวเอง เพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก

หลังคาเมทัลชีทถูกผลิตให้มีค่า Minimum Yield Strength สูงถึง 550 MPa ผ่านการชุบร้อนแบบต่อเนื่อง โดยเคลือบผิวเหล็กด้วย Zinalume โดยเป็นสารผสมประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) 55% สังกะสี (Zn) 43.5 % และซิลิกอน (Si) 1.5 % โดยมีปริมาณการเคลือบต่ำสุดคือ 150 g/m<sup>2</sup> ตามมาตรฐานออสเตรเลีย AS – 1397 ชั้นเคลือบเหล็กเคลือบโลหะผสม Zinalume Steel Layer Aluminium/Zinc Alloy Coating เคลือบด้วยโลหะผสมอะลูมิเนียมกับสังกะสี แล้วนำไปเคลือบสารรองพื้นชั้นแรก (Conversion coating) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ผิวเคลือบต่อไปติดแน่นขึ้น เพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะ และป้องกันการกัดกร่อน แล้วจึงเคลือบสีรองพื้น (Primer coating) โดยส่วนมากนิยมใช้สีอีพ็อกซี (Epoxy) และชั้นสุดท้ายจึงเคลือบสีที่มีคุณภาพและความทนทานสูงบนตัวแผ่นตามมาตรฐาน AS - 2728 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ดังนั้นหลังคาเมทัลชีทจึงมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับหลังคากระเบื้องทั่วไป ตามตารางที่ 2.5 (บริษัท เจริญพรอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, 2555; บริษัท แผ่นหลังคาเมทัลชีท.com, 2555)



รูปที่ 2.5 ชั้นเคลือบโลหะผสมอลูซิงค์ของหลังคาเมทัลชีท (บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด)



รูปที่ 2.6 ชั้นเคลือบเหล็กเคลือบสี Clean Colorband® Steel Layer (บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด)

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติของหลังคาเมทัลชีทกับกระเบื้องคอนกรีต

หัวข้อ	แผ่นหลังคาเมทัลชีท	กระเบื้องคอนกรีต
ราคา (เปรียบเทียบโดยทั่วไป)	ถ้าพื้นที่มากจะถูกกว่า เมื่อคิดรวม โครงหลังคาแล้ว	แพงกว่า เพราะใช้โครงหลังคา และฐานรากมากกว่า
ความลาดชัน	1 - 5°	ไม่น้อยกว่า 15°
น้ำหนัก	4.2 - 6.2 kg/m <sup>2</sup>	49 kg/m <sup>2</sup>
ความร้อนและเรื่อง อุณหภูมิ	สะท้อนความร้อนได้ดีกว่า ทำให้ ภายในอาคารเย็นลงทันทีในตอนค่ำ	สะสมความร้อน ตอนค่ำตัวอาคาร เย็นช้ากว่าเมทัลชีท
ความคงทน	มากกว่า 15 ปี	เริ่มแตกร้าวหลังการใช้งาน 5 ปี
การกันฝนและการรั่ว	กันฝนได้ดีเนื่องจากรอยต่อน้อยและ สนิทกว่า	มักมีปัญหาเรื่องน้ำรั่ว จากหลาย สาเหตุ
ด้านสี	สีสม่ำเสมอ	สีและขนาดไม่สม่ำเสมอ
ส่งผลต่อสุขภาพ	ไม่มี	อาจมีอันตรายจากเชื้อราและสี ลอก
เสียงขณะฝนตก	ดังกว่าเล็กน้อย	เบากว่า

ที่มา : บริษัท เจริญพรอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, 2555

### 2.3 ฉนวนกันความร้อน

ฉนวน (Insulator) คือ วัสดุที่ต้านทานหรือป้องกันมิให้พลังงานความร้อนส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีก  
ด้านหนึ่งได้สะดวก ฉนวนกันความร้อนที่ดีจะเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งประกอบไปด้วยฟองอากาศ  
เล็กๆ จำนวนมาก ฟองอากาศดังกล่าว มีคุณสมบัติในการต้านทานกันความร้อน โดยสกัดกั้นความร้อนให้  
อยู่ในบริเวณฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมากนี้ จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการพาความร้อนด้วย โดยฉนวนแต่ละ  
ชนิดจะมีค่าการต้านทานความร้อนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องต้านทานความร้อนที่ผ่าน  
จากด้านหนึ่ง ไปอีกด้านหนึ่งให้ลดลงเหลือน้อยที่สุด ทั้งนี้ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อน (k)  
ยิ่งน้อย แสดงว่าเป็นฉนวนที่สามารถต้านทานความร้อนดีกว่า ซึ่งจากตารางเปรียบเทียบค่าความ  
ต้านทานค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆจะพบว่า โฟมชนิดมีค่าการนำความร้อน  
น้อยกว่าโฟมแผ่น ฉนวนใยแก้ว ไม้อัด แผ่นยิปซัม และกระเบื้องแผ่นเรียบ (บริษัท บางกอกอินชูลัท  
จำกัด)

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k; W/m <sup>2</sup> )
โฟมฉนวน	0.023
โฟมแผ่น	0.031
ฉนวนใยแก้ว	0.035
ไม้ฉนวน	0.123
แผ่นยิปซัม	0.191
กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.288

ที่มา : บริษัท บางกอกอินซูลเลท จำกัด

ฉนวนกันความร้อนที่ใช้อยู่ทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฉนวนกันความร้อนแบบมีมวล (Mass insulation) หมายถึง วัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยความเป็นฉนวนของวัสดุที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อนที่สูงของตัววัสดุเอง วัสดุส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย มีโพรง หรือช่องกลาง เช่น ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass) ฉนวนใยหิน (Rock fiber) ฉนวนใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene foam/PS) โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam/PU) และ โฟมพอลิเอทิลีน (Polyethelene foam/PE)
2. ฉนวนแบบสะท้อนความร้อน (Reflective sheet) หมายถึง วัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนของวัสดุเพื่อที่จะลดค่าพลังงานความร้อนไม่ให้ถูกดูดซับและทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือมีผิวที่มีการสะท้อนสูง เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) เซรามิกโค้ทติ้ง (Ceramic coating) (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554) โดยฉนวนที่มีการนำมาใช้งานกับหลังคาเมทัลชีท มีหลักๆดังต่อไปนี้

### 2.3.1. ฉนวนเยื่อกระดาษ

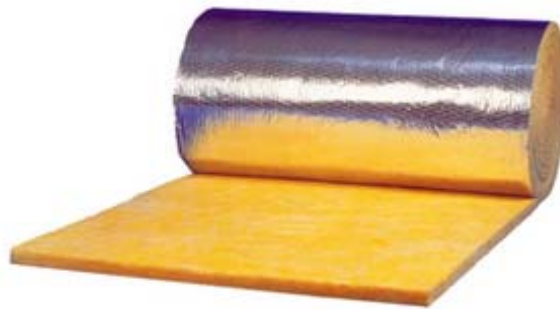
ฉนวนเยื่อกระดาษเป็นฉนวนประเภทเซลลูโลส เป็นฉนวนที่ผลิตจากเยื่อไม้กระดาษ ดังนั้นจึงต้องใส่สารป้องกันการลามไฟ ส่วนใหญ่มักเป็นชนิดพันได้ช่องว่างหรือฝ้าเพดาน มีสมบัติในการกันความร้อนดีพอๆกับฉนวนใยแก้ว แต่การติดตั้งค่อนข้างยุ่งยาก เพราะต้องพันเข้าไปในหลังคาให้มีความหนาแน่นกว่า 2 นิ้ว และมีวัสดุหุ้มปิดป้องกันเศษกระดาษร่วงหล่นจากอายุการใช้งาน (บริษัท เทคโนโลยี มีเดีย จำกัด, 2553)



รูปที่ 2.7 ฉนวนเยื่อกระดาษ (บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

### 2.3.2. ฉนวนใยแก้ว

ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass) เป็นฉนวนผลิตจากการหลอมแก้วแล้วปั่นออกมาเป็นเส้นใยสีขาว จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนเซลล์ปิด ใยแก้วมีความหนาแน่น  $10 \text{ kg/m}^3$  ไปถึงมากกว่า  $64 \text{ kg/m}^3$  โดยทั่วไปจะใช้ที่ความหนาแน่น  $16 \text{ kg/m}^3$  อาจผลิตในรูปแบบแผ่นแข็ง แบบม้วน หรือขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆ กัน ใยแก้วจะถูกเคลือบไว้ด้วยตัวประสาน (Binder) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใยโดยมากจะเป็นฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งจะติดไฟได้ ฉนวนใยแก้วมีข้อดีคือ มีค่าความต้านทานความร้อนสูง หาซื้อได้ง่าย ติดตั้งง่ายแต่ความต้านทานร้อนของใยแก้วจะลดลงเมื่อได้รับความชื้นจึงต้องมีวัสดุห่อหุ้ม เช่น อลูมิเนียมฟอยล์ หรือ ฟิล์มพลาสติก ซึ่งต้องพิจารณาเรื่องการติดไฟของวัสดุที่นำมาห่อหุ้มด้วย การติดตั้งฉนวนใยแก้ว ส่วนมากจะวางบนฝ้าเพดาน (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)



รูปที่ 2.8 ฉนวนใยแก้ว (บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

### 2.3.3. ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน

ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน (Polyethylene foam, PE foam) เป็นฉนวนแบบแผ่น มีฟองละเอียดของก๊าซอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มของฉนวนแบบเซลล์ปิด มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง  $33 - 45 \text{ kg/m}^3$  มีลักษณะอ่อนนุ่มจึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ ไม่ค่อยดูดซึมน้ำ แต่มีการเสื่อมสภาพจากรังสี UV

จึงควรมีวัสดุปิดผิว ข้อดีของฉนวนนี้คือ ค่าการนำความร้อนต่ำ เบา ติดตั้งง่าย อาจใช้ติดวัสดุผนังหลังคา ด้านใน หรือวางบนฝ้าเพดานก็ได้ (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)



รูปที่ 2.9 ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน ((บริษัท สติลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

#### 2.3.4. ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน

ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam, PU foam) เป็นพลาสติกพอลิเมอร์ประเภทหนึ่ง ฟองให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตาม การนำความร้อนของฉนวนประเภทนี้เพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งาน เนื่องมาจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์ โดยเฉพาะกรณีที่สัมผัสกับรังสี UV จะทำให้สีของฉนวนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเสื่อมสภาพลง โดยเฉพาะโฟมที่ไม่ได้ปิดผิว การดูดซับน้ำจะมีบ้างเนื่องจากไม่ใช่เซลล์ปิดทั้งหมด และในกรณีเกิดเพลิงไหม้แม้ว่าจะมี การผสมสารป้องกันการติดไฟแล้ว แต่ก็ยังก่อให้เกิดก๊าซซึ่งเป็นอันตราย เนื่องจากฉนวนมีการขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หากใช้โครงสร้างปิด เช่น วัสดุปิดผิวที่แข็งแรงพอ ก็จะเป็นฉนวนที่ดีมาก (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)



รูปที่ 2.10 ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน (บริษัท สติลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

ตารางที่ 2.7 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเยื่อกระดาษ ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโฟม  
พอลิเอทิลีน และ ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน

คุณสมบัติ	ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน	ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน	ฉนวนใยแก้ว	ฉนวนเยื่อกระดาษ
โครงสร้างเซลล์	เซลล์กึ่งปิด-เปิด	เซลล์ปิด	เซลล์เปิด	เซลล์เปิด
ความหนาแน่น	15-40 kg/m <sup>3</sup>	33-45 kg/m <sup>3</sup>	16-32 kg/m <sup>3</sup>	38-40
ค่าการนำความร้อน	0.020-0.025	0.030-0.037	0.035-0.038	0.039-0.045
อุณหภูมิใช้งาน	-118 – 100 °C	-80 – 80 °C	-20 – 200 °C	-75 – 250 °C
ความต้านทานต่อสารเคมี	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง
การกลั่นตัวของไอน้ำรอบวัสดุที่หุ้ม	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ
การติดไฟ	ติดไฟแต่สามารถดับเองได้	ไม่ติดไฟ	ตัวประสานไฟติดดี	ติดไฟ
การป้องกันเสียง	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงได้ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี
การขนส่งและเก็บรักษา	เป็นชั้นเดียวกับวัสดุที่ติดตั้งง่ายต่อการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติดตั้ง สั้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติดตั้ง สั้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติดตั้ง สั้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง
การประกอบและติดตั้ง	ติดตั้งเสร็จในชั้นตอนเดียว	ติดตั้งสองขั้นตอน	ติดตั้งสองขั้นตอน	ติดตั้งสองขั้นตอน
ความแข็งแรง	เนื้อโฟมแข็ง สามารถรับแรงกดได้ 2,000 kg/m <sup>2</sup>	อ่อนนุ่ม ต้องหลีกเลี่ยงในงานที่มีลักษณะกดทับ	อ่อนนุ่ม ยุบตัวง่าย	อ่อนนุ่ม ยุบตัวง่าย
ความสามารถในการป้องกันสนิม	สามารถป้องกันสนิมได้ดี	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้
ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม	มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม

ที่มา : บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน)

## 2.4 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Flat plate solar collector) เป็นรูปแบบหนึ่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน โดยเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปยังของไหล ซึ่งตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำหน้าที่รับรังสีรวม (Total radiation) ที่ตกกระทบ โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ นอกจากนี้แล้วตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก การนำไปใช้งานส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตน้ำร้อน ทำความร้อนภายในอาคาร ระบบปรับอากาศ และกระบวนการที่ใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เป็นต้น (กัณยรัตน์ เรืองเดช, 2544; ชีระ นนทะภา, 2550; จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

### 2.4.1 ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

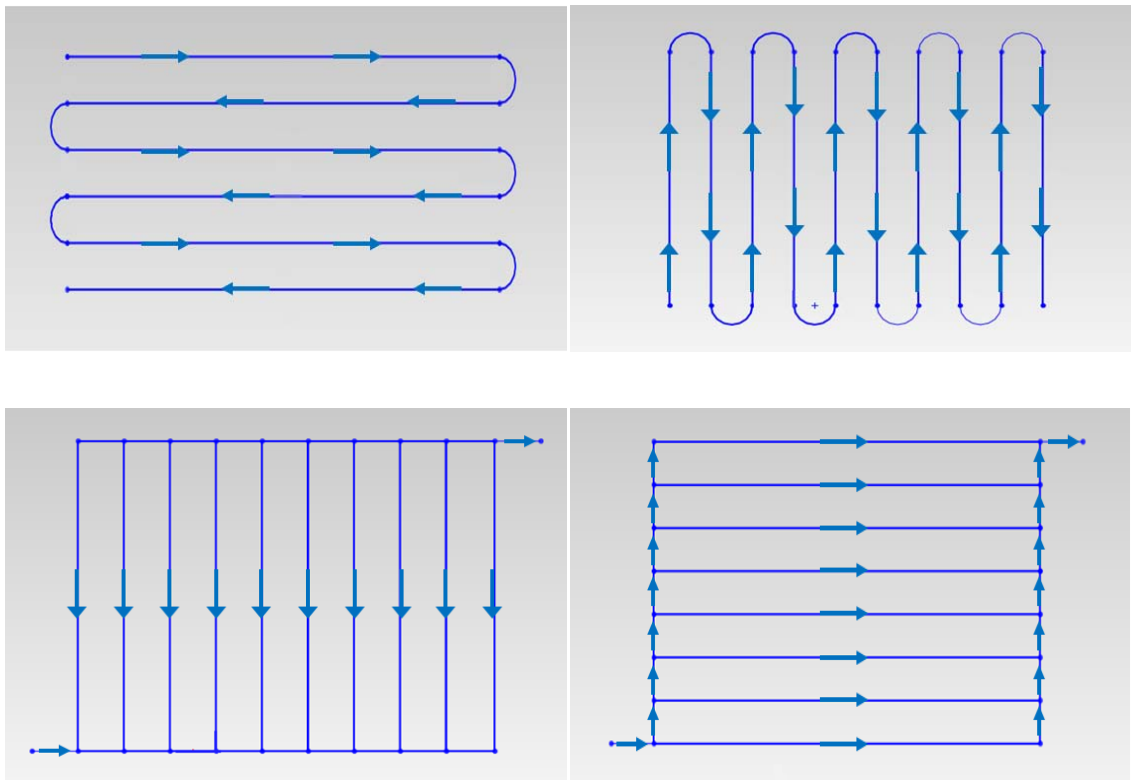
ระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 2.4.1.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โคนเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับของไหลภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. แผ่นปิดใส (Transparent cover) จะวางไว้เหนือแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศโดยการพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสี (Radiation) และทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปในแผงรับแสงอาทิตย์ด้วย โดยประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังขึ้นกับจำนวนชั้นของแผ่นปิดใสด้วย จึงต้องดูตามความเหมาะสมและควบคู่ไปกับการสามารถในการดูดกลืนความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ เช่น กระจก (Glass) แผ่นพลาสติกใส (Plastic film) (กัณยรัตน์ เรืองเดช, 2544; ชีระ นนทะภา, 2550)
2. แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorber plate) ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์แล้วถ่ายเทความร้อนที่สะสมในแผ่นดูดกลืนไปยังของไหลที่อยู่ภายในท่อ มีลักษณะเป็นแผ่นราบ (Flat) ลอนลูกฟูก (Collugated) ท่อ (Tube) แผ่นครีป (Fin) เป็นต้น โดยทั่วไปจะฉาบไว้ด้วยสีดำ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่จะต้องมีค่าสภาพการดูดกลืนรังสีที่สูง และถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของของเหลวและที่อุณหภูมิสูงได้ ซึ่งอาจจะเป็นทองแดง (Copper) อะลูมิเนียม (Aluminium) และเหล็กกล้า (Steel) (กัณยรัตน์ เรืองเดช, 2544; ชีระ นนทะภา, 2550)

3. ฉนวน (Insulation) จะอยู่ทางด้านข้างและด้านล่าง ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนอันเนื่องจากการนำความร้อน (Conduction) โดยทั่วไปจะใช้เซรามิกส์ (Ceramic fiber) ใยแก้ว (Fiber glass) และโฟมพลาสติก (Plastic foam) (ธีระ นนทะภา, 2550)
4. กรอบโลหะรีดขึ้นรูป (Metal frame box) ทำหน้าที่เป็นที่เก็บรวบรวมของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ช่วยป้องกันฝุ่นละออง และความชื้นของอากาศ (ธีระ นนทะภา, 2550)
5. ท่อภายในแผง (Tube) ท่อภายในแผงส่วนใหญ่จะใช้เป็นท่อทองแดง ท่อเหล็กอาบสังกะสี ท่อเหล็กไร้สนิม วัสดุที่เป็นสื่อไฟฟ้าที่ดีมักเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เช่น เงิน ทองแดง ซึ่งทองแดงเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดีกว่าอลูมิเนียม 2 เท่า ดีกว่าเหล็ก 10 เท่า ดีกว่าเหล็กไร้สนิม 10 เท่า และนอกจากนี้ยังมีความคงทนต่อแรงกดดัน ทนต่อการกัดกร่อนของสนิม และการเกิดหินปูนได้ดีมาก ท่อที่ใช้มักจะใช้เป็นท่อผนังบางๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3/8$  " -  $1/2$  " วางห่างกัน 3 - 6 " บนแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ลักษณะการหมุนเวียนของน้ำภายในท่อบนแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีหลากหลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 (นฤมล สมพลเดช, 2535; กัญยรัตน์ เรืองเดช, 2544.)



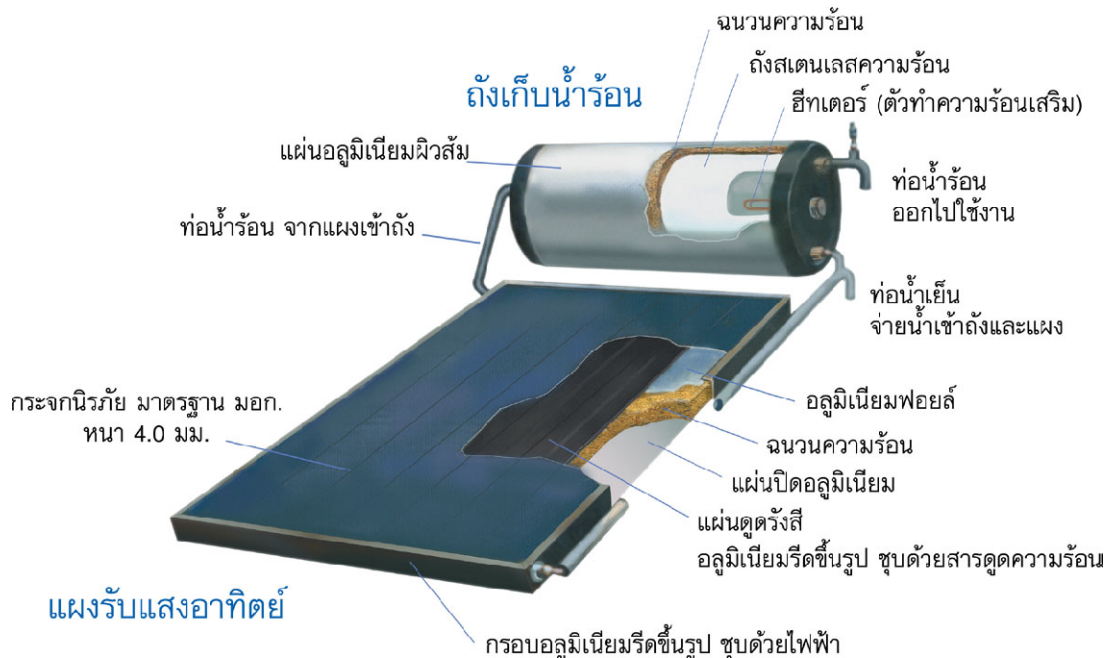
รูปที่ 2.11 ลักษณะการหมุนเวียนน้ำภายในแผงท่อบนแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์  
(นฤมล สมพลเดช, 2535)

**2.4.1.2 ท่อน้ำของระบบ**

ท่อน้ำของระบบ (Piping) มีหน้าที่เป็นทางเดินของน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังถังเก็บน้ำร้อน แล้วนำน้ำที่อุณหภูมิต่ำจากถังเก็บน้ำร้อนกลับเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นทางเดินของน้ำที่จะนำไปใช้งานและนำน้ำเย็นเข้าสู่ถังอีกด้วย (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

**2.4.1.3 ถังเก็บน้ำร้อน**

ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) มีความสำคัญมากต่อระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะเป็นตัวเก็บน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้งานให้ได้ตามความต้องการ ถังเก็บน้ำร้อนไว้ใช้ยามที่ไม่มีแสงแดดและช่วยให้แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างเต็มที่ ไม่ร้อนจัดจนเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง มักจะเป็นถังแบบปิดทำด้วยสแตนเลสอย่างดีที่ไม่เป็นสนิม มีฉนวนหุ้มป้องกันการสูญเสียความร้อนหรือให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ถังเก็บน้ำร้อนนี้จะถูกออกแบบภายในให้สามารถเก็บและจ่ายน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำร้อนจะอยู่ด้านบนของน้ำเย็นตามหลักของเทอร์โมไซฟอน ดังนั้นท่อน้ำร้อนเข้าถังจะต้องอยู่ส่วนบนของถังและท่อน้ำเย็นออกจากถังจะอยู่ส่วนล่างของถัง ทุกชิ้นส่วนจะถูกประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกันเป็นดังรูปที่ 2.12 (เกษม โพธิ์งาม, 2545; กัญยรัตน์ เรืองเดช, 2544)



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน, 2551)

## 2.4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

### 2.4.2.1. สมดุลพลังงานบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ในสภาวะคงที่ สมรรถนะของตัวเก็บรังสีสามารถอธิบายโดยสมดุลพลังงานซึ่งชี้ให้เห็นถึงการกระจายของพลังงานแสงอาทิตย์ไปอยู่ในรูปของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ การสูญเสียทางความร้อนและการสูญเสียเชิงแสง รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีต่อหน่วยพื้นที่ของแผ่นดูดกลืน  $S$  จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบและการสูญเสียเชิงแสง พลังงานความร้อนสูญเสียจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้แก่สิ่งแวดล้อมโดยการนำ การพา และการแผ่รังสีในช่วงคลื่นอินฟราเรด สามารถเขียนอยู่ในรูปผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $U_L$  กับค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืน  $T_{pm}$  กับอุณหภูมิแวดล้อม  $T_a$  ในสภาวะคงที่ พลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ของตัวเก็บรังสีที่มีพื้นที่  $A_c$  คือผลต่างระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนกับความร้อนที่สูญเสีย (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2.26)$$

เมื่อ

- $Q_u$  คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)
- $A_c$  คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี ( $m^2$ )
- $S$  คือ รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน ( $W/m^2$ )
- $U_L$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )
- $T_{pm}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืน ( $^\circ C$ )
- $T_a$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม ( $^\circ C$ )

ในส่วนสมรรถนะของตัวเก็บรังสี (Collector performance) จะหาได้จากประสิทธิภาพการเก็บรังสี (Collector efficiency) ซึ่งกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ในช่วงเวลาที่พิจารณาต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีในช่วงเวลานั้นๆ

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.27)$$

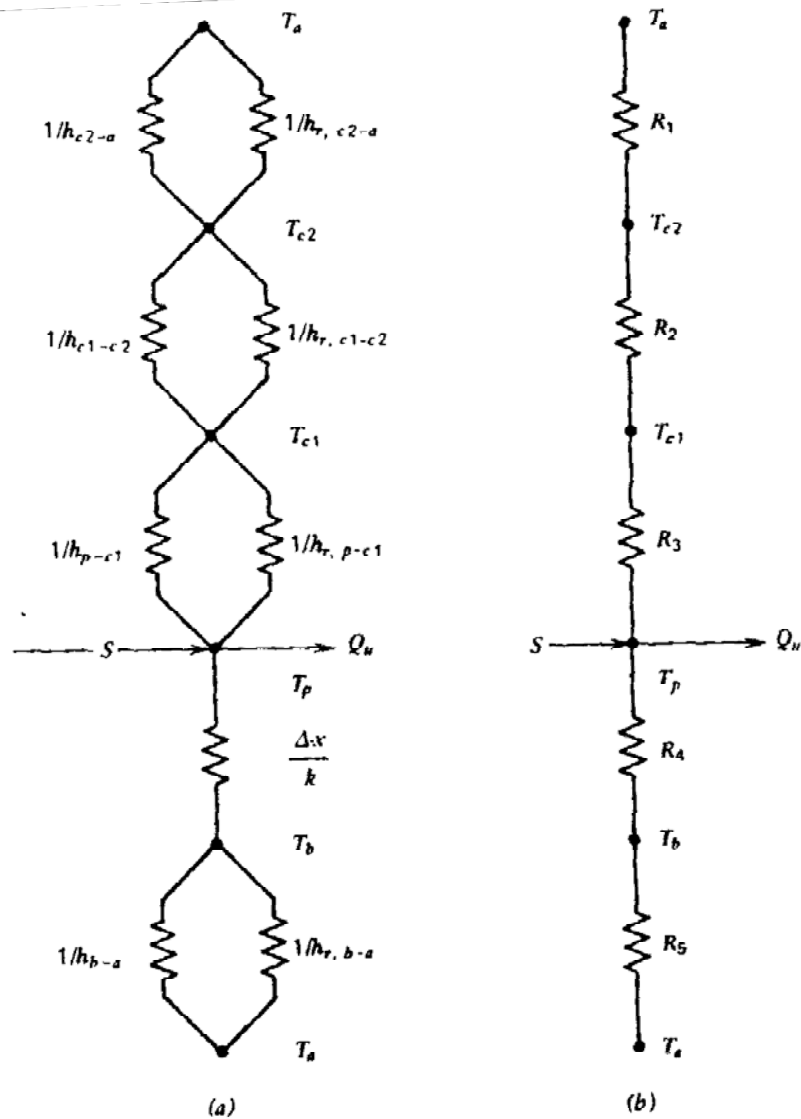
เมื่อ

- $\eta$  คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
- $G_T$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลานั้น ( $W/m^2$ )

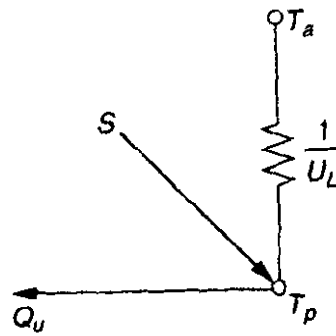
### 2.4.2.2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

พิจารณาวงจรความร้อนสำหรับระบบที่มีแผ่นปิดใส 2 ชั้น ดังรูปที่ 2.13 โดยจะทำการแปลงวงจรความร้อนในรูปที่ 2.13 ให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.14 (จงจิตร หิรัญลาก, 2541) กำหนดให้

- $T_p$  คือ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนรังสี
- $S$  คือ พลังงานที่ถูกดูดกลืน โดยแผ่นดูดกลืนรังสี
- $T_{c1}$  คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 1
- $T_{c2}$  คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 2
- $T_b$  คือ อุณหภูมิของฉนวน
- $T_a$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.13 วงจรความร้อนของตัวเก็บรังสีที่มีแผ่นปิดใส 2 ชั้น (Duffie and Beckman, 1991)



รูปที่ 2.14 วงจรความร้อนสมมูลของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Duffie and Beckman, 1991)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบน ( $U_i$ ) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการพาและการแผ่รังสีระหว่างแผ่นปิดใสทั้งสอง โดย

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \quad (2.28)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,c1-c2} + h_{r,c1-c2}} \quad (2.29)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (2.30)$$

ดังนั้นจะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนได้จากสมการ

$$U_i = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.31)$$

แต่จากสมการด้านบนนั้นมีความยุ่งยากในการหาค่าดังกล่าว ดังนั้นอาจใช้สมการที่ 2.31 หาค่าหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนแทนได้ ซึ่งง่ายและเหมาะกับการคำนวณ โดยใช้คอมพิวเตอร์มากกว่า Duffie&Beckman (1991) ได้เสนอรายละเอียดของสมการเอ็มไพริคัล (Empirical) ซึ่งพัฒนาโดย Klein ในปี ค.ศ. 1979 ดังต่อไปนี้

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[ \frac{(T_{pm} - T_a)}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (2.32)$$

โดย

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$$C = 520(1 - 0.00005\beta^2)$$

$$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$$

เมื่อ

$N$  คือ จำนวนกระจก

$\beta$  คือ มุมเอียง

$\varepsilon_g$  คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นกระจก

$\varepsilon_p$  คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนรังสี

$h_w$  สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยลม ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านหลัง ( $U_b$ ) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการนำความร้อนผ่านทางฉนวนทางด้านหลังของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หาได้จากสมการ

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (2.33)$$

เมื่อ

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน

$L$  คือ ความหนาของฉนวน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านข้าง ( $U_b$ ) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการนำความร้อนผ่านทางฉนวนทางด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หาได้จากสมการ

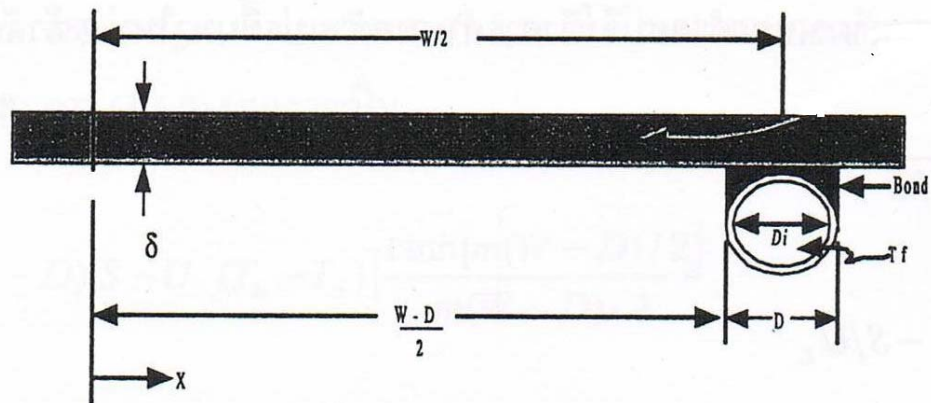
$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (2.34)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $U_L$ ) เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบน ด้านหลัง และด้านข้าง

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.35)$$

#### 2.4.2.3 การกระจายอุณหภูมิระหว่างท่อและประสิทธิภาพมาตรฐานของครีป

การกระจายของอุณหภูมิระหว่างท่อของไหลสองท่อที่สถานะหนึ่งๆ สามารถหาค่าได้โดยสมมติว่าไม่มีผลของเกรเดียนต์อุณหภูมิในทิศทางกรไหล โดยมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผ่นรับรังสีอาทิตย์และท่อ (Duffie and Beckman, 1991)

โดยหาพลังงานที่นำเข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางกรไหล ( $q'_{fin}$ ) จากสมการ

$$q'_{fin} = (W - D)F [S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.36)$$

เมื่อประสิทธิภาพมาตรฐานของครีป ( $F$ ) หาได้จากสมการ

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (2.37)$$

โดย

$$m = \sqrt{U_L/k\delta} \quad (2.38)$$

เมื่อ

$W$  คือ ระยะห่างระหว่างท่อ (mm)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)

$\delta_p$  คือ ความหนาแผ่นคูคกลินมี (mm)

$T_b$  คือ อุณหภูมิ ณ แผ่นคูคกลิน ( $^{\circ}\text{C}$ )

และยังสามารถหาพลังงานที่ใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะรวมถึงพลังงานที่สะสมเหนือบริเวณท่อ ( $q'_{tube}$ )

$$q'_{tube} = D[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.39)$$

และพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้จากท่อของไหลต่อหน่วยความยาวในทิศทางกรไหล สามารถหาได้จากสมการ

$$q'_u = [(W - D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.40)$$

#### 2.4.2.4 แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector efficiency factor,  $F'$ ) แสดงถึงอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานที่ได้รับ เมื่อผิวของแผ่นคูคกลินรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของของไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งของตัวเก็บรังสี โดยเป็นค่าคงที่เมื่อออกแบบตัวรับรังสีแบบต่างๆ และอัตราการไหลของของไหล อัตราส่วนของ  $U_L$  ต่อ  $C_b$  อัตราส่วนของ  $U_L$  ต่อ  $h_f$  และประสิทธิภาพของครีป ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการหาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยหาได้จาก (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_1 h_f} \right]} \quad (2.41)$$

เมื่อ

- $F'$  คือ แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์  
 $U_L$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม  
 $W$  คือ ระยะห่างระหว่างท่อ (mm)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)  
 $D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)  
 $C_b$  คือ ความต้านทานรอยต่อ  
 $h_{fi}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

#### 2.4.2.5 แฟกเตอร์การดึงความร้อนและแฟกเตอร์การไหล

แฟกเตอร์การดึงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector heat removal factor,  $F_R$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริงต่อพลังงานใช้ประโยชน์เมื่อแผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่เข้าสู่ท่อ หาได้จาก (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (2.42)$$

แฟกเตอร์การไหลของตัวเก็บรังสี (Collector Flow Factor,  $F''$ )

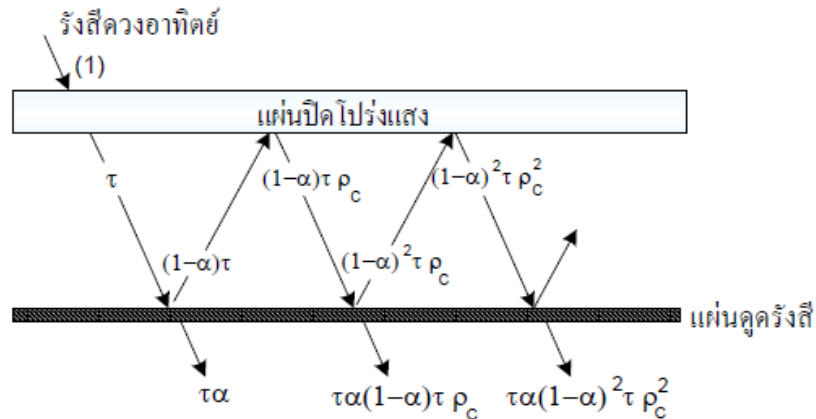
$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L F'} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.43)$$

เมื่อ

- $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลแต่ละตัวของตัวเก็บรังสี (kg/s)  
 $C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะ ( $kJ/kg \text{ } ^\circ C$ )  
 $A_c$  คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี ( $m^2$ )  
 $S$  คือ รังสีอาทิตย์ที่ถูดูดกลืน ( $W/m^2$ )  
 $U_L$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )  
 $T_{fo}$  คือ อุณหภูมิของไหลขาออก ( $^\circ C$ )  
 $T_{fi}$  คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้า ( $^\circ C$ )  
 $T_a$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $^\circ C$ )

2.4.2.6 ผลของการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นปิดโปร่งแสง ค่ารังสีอาทิตย์บางส่วนจะทะลุผ่านแผ่นปิดโปร่งแสงซึ่งมีค่าดูดกลืนรังสี ( $\alpha$ ) และเมื่อตกกระทบผิววัตถุด้านล่าง บางส่วนจะถูกดูดกลืน ( $\tau\alpha$ ) และบางส่วนจะสะท้อนกลับไปแผ่นปิดโปร่งแสงอีก  $(1-\alpha)\tau$  ซึ่งจะมีการสะท้อนกลับไปมา ดังรูปที่ 2.16 (เกษม โพธิ์งาม, 2545)



รูปที่ 2.16 ระบบการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดโปร่งแสง (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

ดังนั้น ผลคูณระหว่างค่าการส่องผ่านและค่าการดูดกลืนรังสี คิดเป็น

$$\begin{aligned} \tau\alpha_c &= \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} ((1-\alpha)\rho_c)^n \\ &= \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_c} \cong 1.01\tau\alpha \end{aligned} \tag{2.44}$$

เมื่อ

- $\tau$  คือ ค่าการส่องผ่านรังสี
- $\alpha$  คือ ค่าการดูดกลืนรังสี
- $\rho_c$  คือ ค่าการสะท้อนรังสี

เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแผ่นปิดโปร่งแสง จะทำให้อุณหภูมิของแผ่นปิดโปร่งแสงสูงขึ้น ทำให้การสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ลดลง ดังนั้นผลคูณของค่าส่องผ่านและค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกค่านี้ว่า ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่องผ่านและค่าดูดกลืนรังสี (Effective transmittance – absorption Product;  $(\tau\alpha)_c$ ) ซึ่งค่า  $(\tau\alpha)_c$  นี้จะสูงกว่า  $(\tau\alpha)$  ประมาณ 1 – 2 % สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ทั่วไปที่มีแผ่นปิดโปร่งแสง 1 ชั้น และ 2 % สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีแผ่นปิดโปร่งแสง 2 ชั้น

ค่าประสิทธิภาพของการส่องผ่านและการดูดกลืนในกรณีแผ่นปิดโปร่งแสงเป็นกระจก สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้กระจกแบบธรรมดาจะมีค่าประมาณ (Duffie and Beckman, 1991)

$$(\tau\alpha)_c \approx 1.02(\tau\alpha) \quad (2.45)$$

สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้กระจกแบบธรรมดาจะมีค่าประมาณ

$$(\tau\alpha)_c \approx 1.01(\tau\alpha) \quad (2.46)$$

### 2.4.3 ประโยชน์และระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน

สำหรับประโยชน์ของน้ำร้อนที่นำมาใช้สามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

1. การใช้น้ำอุ่น อุณหภูมิของน้ำอุ่นจะถูกผสมระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็นหรือน้ำอุ่นที่ไหลออกมาจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำจะอยู่ในช่วง 32 °C – 48 °C ซึ่งสามารถใช้อาบน้ำ ล้างหน้า และข้อดีสำหรับการอาบน้ำหรือการแช่น้ำอุ่นนานๆจะทำให้รู้จุ่มขนขยายตัวมากขึ้น ทำให้การขับถ่ายของเสียออกจากร่างกายได้ดีและผ่อนคลายความตึงเครียดของกล้ามเนื้อ เส้นประสาททำให้ไม่เมื่อยหรืออ่อนเพลียง่าย การไหลเวียนของเลือดในร่างกายดีขึ้น นอนหลับสบาย จะเห็นได้ว่าการอาบน้ำอุ่นมีผลดีต่อสุขภาพ สำหรับประเทศไทยในเขตร้อน หรือแม้แต่ในเมืองหนาวก็ตาม
2. การใช้น้ำร้อน ถูกนำมาใช้กับระบบทำความร้อนภายในอาคาร เฉพาะในเขตที่มีอากาศหนาว อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 °C ขึ้นไป ประโยชน์ที่ได้เช่น ชักผ้า ล้างจาน ฆ่าเชื้อโรค หรือแม้แต่การประกอบอาหารและกิจกรรมอื่นตามความต้องการ โดยระดับของอุณหภูมิในการใช้งานของน้ำร้อนเพื่อเหมาะสมแสดงในตารางต่อไปนี้ (ปรีดา จันทวงษ์, 2542)

#### ตารางที่ 2.8 ระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน

ประเภทของการใช้	อุณหภูมิของน้ำร้อน (°C)
ฝักบัวใช้อาบ	32-40
อ่างน้ำใช้อาบ	40-48
ห้องครัว	60
ล้างจาน	60-77
ซักผ้า	82

ที่มา : ปรีดา จันทวงษ์, 2542

## 2.5 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

จุดประสงค์ส่วนใหญ่ของผู้ที่เลือกใช้ระบบผลิตน้ำร้อนคือ การได้ใช้ระบบที่เชื่อถือได้ในราคาที่ประหยัด ในกรณีที่มีการได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างเด่นชัดเช่นราคาระบบที่ถูกกว่า และมีอายุการใช้งานที่นานกว่าด้วยมูลค่าซากที่สูงกว่า ในกรณีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมเพราะเห็นได้ชัดว่าต้องเลือกกระบบดังกล่าวแน่ๆ แต่โดยทั่วไปมักไม่มีระบบใดที่มีความได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างเด่นชัด ระบบหนึ่งอาจมีราคาถูกกว่าแต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในระบบสูงกว่า หรือมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ มีตัวแปรหลายตัวในการตัดสินใจ เช่น ต้นทุนการผลิต ประสิทธิภาพของระบบ อายุการใช้งาน สภาพอากาศของแต่ละท้องถิ่น ราคาพลังงานในท้องถิ่น ค่าบำรุงรักษา ระบบปฏิบัติงาน ซึ่งต้องใช้ในการตัดสินใจ ดังนั้นรายละเอียดของการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จึงขึ้นอยู่กับขอบเขตการศึกษา ซึ่งในเชิงเศรษฐศาสตร์มักจะเปรียบเทียบความได้เปรียบในลักษณะดังต่อไปนี้ (นฤมล สมพลเดช, 2535)

1. มูลค่าปัจจุบัน (Present worth)
2. มูลค่าเทียบเท่ารายปี (Annual equivalent)
3. อัตราผลตอบแทน (Rate of return)
4. ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะใช้วิธีการดังต่อไปนี้

### 2.5.1 ต้นทุนเริ่มแรก

ต้นทุนเริ่มแรก (Initial cost,  $C_i$ ) หาได้จาก

$$C_i = C_c A + C_f b A + C_w A \quad (2.47)$$

เมื่อ

- $C_c$  คือ ค่าใช้จ่ายของแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่ (฿)
- $A$  คือ พื้นที่แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )
- $C_f$  คือ ค่าใช้จ่ายของถังสะสมความร้อนต่อปริมาตร (฿)
- $b$  คือ ปริมาตรของถังสะสมความร้อนต่อพื้นที่แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (L)
- $C_w$  คือ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าติดตั้ง (฿)

## 2.5.2 ค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน

ค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน (Operating cost) คือ ค่าใช้จ่ายที่จ่ายในช่วงเวลา  $n$  ปีที่มีการใช้งาน โดยมูลค่าเทียบเท่ารายปีของค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน (The annual operating cost) ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 2.5.2.1 ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด

การคำนวณหาต้นทุนรายปี สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} C_n &= (C_c A + C_t b A + C_w A) CRF + M \\ &= (C_i \times CRF) + M - S'(SFF) \end{aligned} \quad (2.48)$$

โดย

$CRF$  คือ ค่าการชดเชยต้นทุนในการลงทุน (Capital recovery factor) หาได้จาก

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.49)$$

$SFF$  คือ ตัวประกอบทุนจม (Sink fund factor) หาได้จาก

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (2.50)$$

เมื่อ

$C_n$  คือ ต้นทุนรายปี (฿)

$i$  คือ อัตราดอกเบี้ยต่อหน่วยเวลา

$n$  คือ จำนวนหน่วยเวลา (year)

$M$  คือ ค่าบำรุงรักษาต่อปี (฿)

$S'$  คือ มูลค่าซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน (฿)

### 2.5.2.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

โดยการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนจะทำการวิเคราะห์จากค่าปริมาณความร้อนที่ได้ตลอดปีเปรียบเทียบกับค่าพลังงานชนิดอื่น เช่นการใช้ไฟฟ้า แล้วหาผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งมีค่าเท่ากับราคาพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นลบค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์รายปี หาได้จาก

$$P_1(CRF) - S(SFF) + \alpha = Ca \left[ \frac{365 \times Q}{3.6 \times \eta_E} \right] \quad (2.51)$$

เมื่อ

- $\alpha$  คือ ค่าบำรุงรักษาตลอดปี (฿)
- $\eta_E$  คือ ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า (%)
- $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อปี (MJ/year)
- $Ca$  คือ ราคาของพลังงานไฟฟ้า (฿/kW.hr)

## 2.6 มาตรฐานการทดสอบ

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์และระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 9806-1 และ ISO 9459-2 โดยมีรายละเอียดการทดสอบในแต่ละมาตรฐานดังต่อไปนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

### 2.6.1 การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

#### 2.6.1.1 สภาพะการทดสอบ

1. ไพรานอมิเตอร์จะต้องเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยการวางกลางแจ้งอย่างน้อย 30 นาที ก่อนทำการเริ่มต้นเก็บข้อมูล
2. รังสีอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าอย่างน้อย  $800 \text{ W/m}^2$  ค่ามุมตกกระทบจะต้องไม่น้อยกว่า  $\pm 2\%$  ของค่ารังสีตั้งฉากกับหน้าแผงหรือมุมตกกระทบไม่เกิน  $30^\circ \text{C}$
3. ค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง  $2 \text{ m/s}$  ถึง  $4 \text{ m/s}$
4. อัตราการไหลของสารทำงานควรมีค่าอยู่ประมาณ  $0.02 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  ของพื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 1\%$  ในขณะที่ทำการวัดค่าการทดสอบ และไม่เกิน  $\pm 10\%$  ระหว่างจุดข้อมูลใหม่

#### 2.6.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และมีค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ในขณะที่ทำการทดสอบต้องไม่น้อยกว่า  $800 \text{ W/m}^2$
2. ติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยให้มีมุมเอียงเท่ากับเส้นรุ้งของสถานที่นั้นๆ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์หันหน้าไปทางเส้นศูนย์สูตร (ทิศใต้)
3. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลาประมาณ 09.00 น. โดยเริ่มป้อนน้ำเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในอัตราการไหลคงที่ (ในการทดสอบนี้ใช้อัตราการไหล  $0.02 \text{ kg/s} \times \text{m}^2$  ของพื้นที่รวมหรือประมาณ  $1.20 \text{ Liters/min} \times \text{m}^2$  โดยส่วนมากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ประมาณ  $2 \text{ m}^2$  ดังนั้นค่าอัตราการไหลจะอยู่ประมาณ  $2.4 \text{ Liters/min}$ ) และการควบคุมอัตราการไหลทำได้โดยใช้วาล์วปรับอัตรา

การไหลซึ่งอัตราการไหลต้องคงที่ โดยมีค่าความเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 1\%$  ในขณะที่ทำการวัดค่าการทดสอบ)

4. ปรับอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม โดยอาจจะใช้ฮีตเตอร์หรือเครื่องทำน้ำเย็น และต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ และมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
5. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องเป็นข้อมูลที่ตัวเก็บรังสีอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ดังนั้นการทดสอบจะต้องรอให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวก่อนประมาณ 15 min โดยใน 15 min ค่ารังสีอาทิตย์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงเกิน  $\pm 50\text{ W/m}^2$  จากค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่กำหนดไว้ (ไม่น้อยกว่า  $800\text{ W/m}^2$ )
6. หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (อย่างน้อยประมาณ 15 min) และอยู่ในสภาวะคงตัวอย่างน้อย 15 min จึงเริ่มจดบันทึกค่าที่จุดวัดต่างๆ โดยบันทึกทุก 10 sec ซึ่งค่าที่ถูกบันทึกมีดังตารางที่ 2.9

**ตารางที่ 2.9** รายการที่บันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Tin)	องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )
อุณหภูมิน้ำขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Tout)	องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Tamb)	องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )
ความดันขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	กิโลปาสกาล (kPa)
ความดันขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	กิโลปาสกาล (kPa)
รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ	วัตต์ต่อตารางเมตร ( $\text{W/m}^2$ )
ความเร็วลม	เมตรต่อวินาที (m/s)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

7. ในการทดสอบต้องปรับอุณหภูมิขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อีก 3 ค่า (รวมทั้งหมด 4 ค่า) โดยอาจจะใช้ฮีตเตอร์หรือเครื่องทำน้ำเย็น และต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบและมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 0.1\%$  ซึ่งค่าอุณหภูมิขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบสมควรอยู่ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมไปจนถึงอุณหภูมิทำงานสูงสุดของตัวเก็บรังสีประมาณ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  และค่าที่ใช้้นั้นควรมีระยะห่างระหว่างอุณหภูมิที่เท่ากัน (ซึ่งในการทดสอบนี้สามารถสรุปค่าที่ใช้คือ 40, 50, 60 และ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

8. สำหรับค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแต่ละค่าจะต้องทำการทดสอบตามที่กล่าวมาข้างต้นไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมด 16 ค่า (หมายเหตุ: ควรทำการทดสอบวันละหนึ่งค่าอุณหภูมิ ซึ่งหมายถึงควรทำการทดสอบอย่างน้อยเป็นเวลา 4 วัน และในแต่ละวันต้องได้ข้อมูลชุดที่อุณหภูมิขาเข้าเดียวกัน

### 2.6.1.3 การคำนวณ

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ให้ใช้สูตรการคำนวณดังต่อไปนี้  
การคำนวณหาความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้จากสมการด้านล่าง

$$Q = \dot{m} C_p (t_o - t_{in}) \quad (2.52)$$

โดย

- $Q$  คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kJ)
- $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของของไหล (kg/s)
- $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kgK)
- $t_{in}$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
- $t_o$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

การคำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_G = \frac{Q}{A_G G} \quad (2.53)$$

โดย

- $\eta_G$  คือ ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
- $A_G$  คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)
- $G$  คือ ความเข้มของรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง (W/m<sup>2</sup>)

หาค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชิงแสงและสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_G = \eta_{oG} - U_G (t_{in} - t_a) / G \quad (2.54)$$

โดย

- $\eta_{oG}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
- $U_G$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W / m<sup>2</sup> .K)
- $t_a$  คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (°C)

ทำการทดลองสำหรับอุณหภูมิของของไหลตรงทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หลายๆค่าและพล็อตกราฟระหว่าง  $\eta_G$  และ  $(t_m - t_a)/G$  สามารถหาค่าคงที่  $\eta_{OG}$  และ  $U_G$  ได้ โดย  $\eta_{OG}$  คือจุดตัดบนแกน y และ  $U_G$  คือค่าความชัน

การคำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะทำการคำนวณตามสภาวะที่กำหนด ซึ่งเป็นสภาวะมาตรฐาน ISO 9806-1 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์อื่นๆ

1. ความเข้มรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง มีค่า 800 W/m<sup>2</sup>
2. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม มีค่า 35 °C
3. อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีค่า 50 °C

$$\eta_G = \eta_{OG} - U_G(t_m - t_a)/G \quad (2.55)$$

เมื่อ

$\eta_G$  คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

## 2.6.2 การทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2

### 2.6.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับบ้านพักอาศัย ต้องมีมาตรฐานดังต่อไปนี้

1. ไพรานอมิเตอร์ใช้วัดรังสีรวม สามารถเปลี่ยนการตอบสนองได้มากกว่า  $\pm 1\%$
2. เครื่องมือวัดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมจะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.2$  °C มีความแม่นยำไม่เกิน  $\pm 0.5$  °C
3. เครื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำเข้าจะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.1$  °C มีความแม่นยำไม่เกิน  $\pm 0.1$  °C
4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับวัดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำเข้าและน้ำร้อนทางออกของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์จะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.1$  K และมีความแม่นยำไม่เกิน  $\pm 0.1$  K
5. เครื่องมือวัดอัตราการไหลจะต้องมีความแม่นยำของการวัดเท่ากับหรือไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของการวัดค่ามวลต่อเวลา เมื่อทำการทดสอบระบบกับปั้มน้ำหมุนเวียน เครื่องมือวัดอัตราการไหลควรติดตั้งใน Collector Loop การวัดมีค่าแปรผัน  $\pm 5\%$
6. เครื่องมือวัดมวลควรมีค่าความแม่นยำ  $\pm 1\%$
7. เครื่องมือบันทึกข้อมูล แบบ Analog และ Digital ควรมีค่าความแม่นยำ  $\pm 0.5\%$  ของ Full scale และมี time constant 1 sec หรือน้อยกว่า Peak signal ควรแสดงระหว่าง 50 – 100 % ของ Full scale

### 2.6.2.2 สภาพการทดสอบ

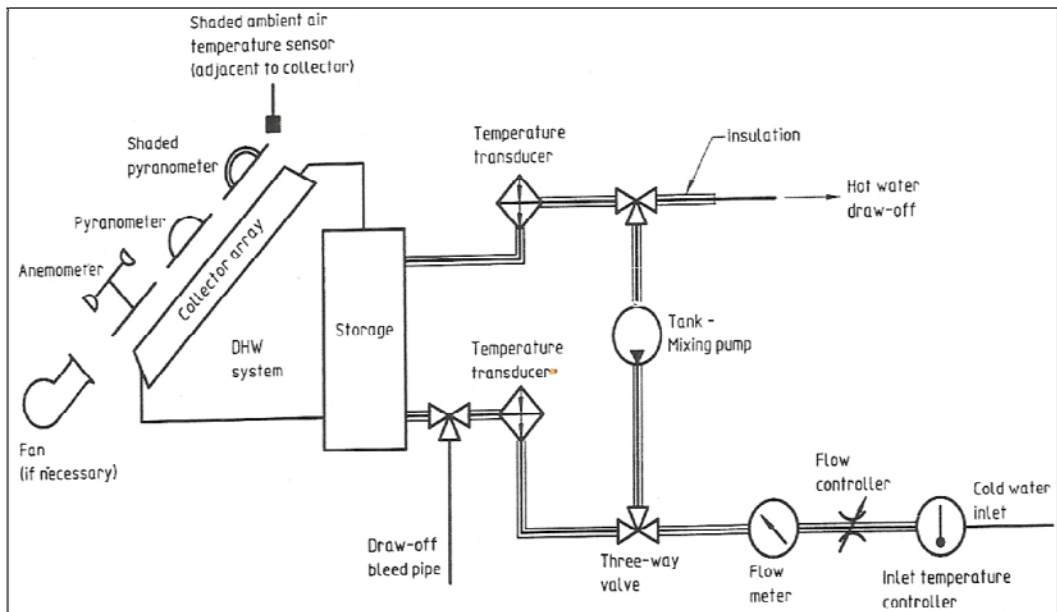
สภาพการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การทดสอบต้องทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ซึ่งมีค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวัน ประมาณ  $8 \text{ MJ/m}^2$  ถึง  $25 \text{ MJ/m}^2$
2. ไม่มีสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุใดๆ มาบังหรือทำให้เกิดเงาบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์

### 2.6.2.3 การเตรียมการทดสอบ

มาตรฐานการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับบ้านพักอาศัย

1. ติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนและเครื่องมือวัดตามรูปวางจรของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ใช้ทดสอบ ตามรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แผนผังการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์และเครื่องมือวัดตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

2. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ควรวัดโดยใช้ Shaded aspirated sampling สูง 1 m จากพื้น และติดตั้งห่างจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างน้อย 1.5 m แต่ไม่เกิน 10 m อุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
3. หุ้มฉนวนที่ทำน้ำร้อนเพื่อลดความร้อนสูญเสียให้น้อยกว่า  $2 \text{ W/K}$
4. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ควรถูกติดตั้งเพื่อให้ลมที่มีความเร็วระดับ  $3 \text{ m/s}$  และ  $5 \text{ m/s}$  ผ่านพื้นที่รับแสงตลอดจนบริเวณด้านข้างและด้านหลังตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยค่าความเร็วลมนี้วัดที่ระยะ  $50 \text{ mm}$  ใน

แนวระนาบเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเร็วสมควรแปรผันได้  $\pm 25\%$  จากค่าเฉลี่ย (ถ้าความเร็วลมที่กำหนดข้างต้นไม่สามารถเกิดได้ตามธรรมชาติสมควรใช้ความเร็วลมที่ใช้จากเครื่องกำหนดลม ควรจะอยู่ในช่วง  $\pm 1$  °C ของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม)

5. ก่อนเริ่มการทดสอบในแต่ละวัน ควรนำสิ่งก้างไปปิดไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อให้ไม่โดนรังสีอาทิตย์ และปรับสถานะเริ่มต้นของระบบ โดยการหมุนเวียนน้ำเย็นที่อุณหภูมิที่กำหนดตาม  $T_{main}$  ให้ไหลเวียนภายในระบบ อย่างน้อย 15 min เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในระบบสม่ำเสมอทั้งหมดและไม่มี การแยกชั้นของอุณหภูมิน้ำในถังเก็บความร้อน เมื่ออุณหภูมิของน้ำในระบบคงที่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งระบบแล้ว ให้หยุดการหมุนเวียนของน้ำ แต่ในกรณีของระบบที่ใช้ปั๊มให้ปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบต่อไป (สำหรับระบบผลิตน้ำร้อนที่ใช้ระบบการไหลเวียนโดยใช้ปั๊ม ให้ใช้ปั๊มของระบบระบบผลิตน้ำร้อนหมุนเวียนน้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกและทางเข้าของระบบน้อยกว่า 1 K น้ำในระบบสามารถสมมติให้สม่ำเสมอเท่ากันทั้งระบบ)

#### 2.6.2.4 วิธีการทดสอบ

1. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 06.00 น. – 18.00 น. (6 ชั่วโมงก่อนและหลังเวลาเที่ยงสุริยะ) รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง โดยให้ระบบทำงานตามปกติ (ถ้าเป็นระบบเทอร์โมโซฟอนปล่อยให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการใช้ปั๊ม ส่วนระบบไหลแบบบังคับให้ใช้ปั๊มตามที่โรงงานที่ผลิตระบบแนะนำ)
2. ในช่วงการทดสอบ จดบันทึกค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกๆ ชั่วโมง ค่าที่จดบันทึกมีดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 2.10** รายการที่จดบันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9459-2

รายการ	หน่วย
รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสง	W/m <sup>2</sup>
รังสีอาทิตย์กระจายที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสง	W/m <sup>2</sup>
อุณหภูมิอากาศแวดล้อมบริเวณทดสอบ	°C
ความเร็วของอากาศรอบๆ (ถ้าใช้อุปกรณ์กำเนิดลม ใช้ค่าที่วัดเพียงครั้งเดียวเป็นค่าเฉลี่ยของวัน)	m/s

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

3. หลังจากการทดสอบ (6 ชั่วโมงหลังเวลาเที่ยงสุริยะ) ควรหาสิ่งก้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีอาทิตย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบ หลังจากนั้นระบายออกจากถังเก็บน้ำโดยให้อัตราการไหลคงที่ที่ 600 Liters/Hr และในเวลาเดียวกันควรมีการป้อนน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิคงที่

เท่ากับ  $T_{main}$  หรือมีค่าเบี่ยงเบนไม่เกิน  $\pm 0.25$  K จาก  $T_{main}$  เข้าไปในระบบ ( $T_{main}$  ที่ป้อนในช่วงเช้าต้องเท่ากับ  $T_{main}$  ที่ป้อนในช่วงเย็นของวันนั้น)

4. ก่อนที่จะทำการระบายน้ำออกเพื่อป้อนน้ำเย็นเข้าสู่ระบบ น้ำเย็นที่ท่อทางเข้าควรถูกปล่อยผ่านท่อ Bleed-off เพื่อที่จะให้แน่ใจว่า น้ำเย็นทางเข้ามีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_{main}$  ตามที่ต้องการ โดยการวัดอุณหภูมินี้ควรทำประมาณ 10-20 min ก่อนการระบายน้ำออก

### 2.6.2.5 การคำนวณสมรรถนะของระบบ

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ได้รับในแต่ละวันคำนวณได้จากสมการ

$$Q_i = \Delta V_i \rho_w C_{pw} (t_{di}(Vi) - t_{main}) \quad (2.56)$$

โดย

$Q_i$  คือ ความร้อนของน้ำที่ปล่อยออกทุกๆ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง (MJ)

$\Delta V_i$  คือ ปริมาตรน้ำ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง ( $m^3$ )

$\rho_w$  คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำร้อน ( $kg/m^3$ )

$C_{pw}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ( $kJ/kg^\circ C$ )

$t_{di}(Vi)$  คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำ ( $\Delta V_i$ ,  $^\circ C$ )

$t_{main}$  คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อคั่นน้ำร้อนในถัง ( $^\circ C$ )

การคำนวณหาความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

$$\dot{Q} = a_1 H + a_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + a_3 \quad (2.57)$$

เมื่อ

$\dot{Q}$  คือ ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อน (MJ/day)

$$Q = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \quad (2.58)$$

เมื่อ

$t_{a(day)}$  คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดวัน ( $^\circ C$ )

$t_{main}$  คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อคั่นน้ำร้อนในถัง ( $^\circ C$ )

$H$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (MJ/day)

$a_1$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )

$a_2$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของการสะสมความร้อน (MJ/ $^\circ C$ )

$a_3$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อน ณ สภาวะเริ่มต้น (MJ)

การหาค่า  $a_1$ ,  $a_2$  และ  $a_3$  หาได้จากผลการทดลองและใช้วิธี Least Squares Fitting

หลังจากคำนวณปริมาณความร้อนตามสมการที่ 1 แล้วทำการคำนวณหาปริมาณน้ำร้อนจากสมการ

$$m = \frac{Q}{C_p(T_{out} - T_{main})} \quad (2.59)$$

เมื่อ

$m$  คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (kg/day)

$Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์  
คำนวณจากสมการ (1) (kJ/day)

$C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.K)

$T_{out}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้ ( $^{\circ}\text{C}$ )

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta_m = \frac{m}{A_G} \quad (2.60)$$

เมื่อ

$\eta_m$  คือ ความสามารถในการผลิตน้ำร้อน (kg/m<sup>2</sup>day)

$A_G$  คือ พื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)

$m$  คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (kg/day)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรีดา จันทพงษ์ (2542) ทำการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนที่มีราคาต้นทุนถูกและสามารถสร้างได้ด้วยตนเอง โดยชุดทดลองชุดแรกใช้วัสดุท่อน้ำดีมพลาสติก (PVC) ขนาด 40 mm เป็นแผงรับรังสีจากรังสีอาทิตย์และใช้เป็นถังสะสมความร้อนขนาดความจุ 35 L โดยใช้ฟางข้าวเป็นฉนวนด้านหลังเครื่องทำน้ำร้อนและฝาปิดถึงสะสมความร้อนในตอนเย็น โดยทดสอบผลความแตกต่างของสีและ ตำแหน่งในการติดตั้ง ชุดทดลองชุดที่สองใช้หลังซีแพคโมเนีย (CPAC) เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนด้านหลังเครื่องทำน้ำร้อน จากการทดลองในชุดที่สองได้อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ 72  $^{\circ}\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 34  $^{\circ}\text{C}$

เกษม โพธิ์งาม (2545) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบน้ำหนักเบาและราคาประหยัด โดยทำการประยุกต์ใช้แผ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นท่อให้น้ำไหลภายในและเป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ โดยมีขนาดแผง  $2.72 \text{ m}^2$  ( $1.172 \text{ m} \times 2.326 \text{ m}$ ) น้ำหนักรวมของตัวเก็บรังสีที่สร้างมีน้ำหนักที่เบากว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำขายตามท้องตลาดทั่วไป 50 % โดยได้อุณหภูมิน้ำที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่า  $100 \text{ }^\circ\text{C}$

ชาญวิทย์ วุฒิวงสานนท์ (2545) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบให้มีราคาประหยัดจากชุดระบายความร้อนของระบบปรับอากาศรถยนต์มาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งใช้ชุดระบายความร้อนขนาด  $0.35 \times 0.53 \text{ mm}^2$  จำนวนทั้งหมด 10 ตัว โดยนำมาต่อแบบผสมผสานเป็นแบบอนุกรมและแบบขนานร่วมกัน โดยกรณีที่ 1 ทำการทดสอบกลางแจ้งตามมาตรฐาน ASHARE 93-77 กรณีที่ 2 ทำการทดสอบกลางแจ้งโดยนำน้ำเย็นป้อนผสมในช่วงที่ต่ออนุกรมของชุดระบายความร้อนที่ 2 กับ 3, 3 กับ 4 และ 4 กับ 5 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การป้อนน้ำเย็นเข้าผสมในตัวเก็บรังสีจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนลดลงจึงทำให้สมรรถนะสูงขึ้น

ลำรวาย ภูบาล (2550) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสีในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบแผ่นดูดกลืนรังสีที่ทำสีดำด้าน จากวัสดุ 3 ชนิด คือ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด แผ่นสังกะสี และแผ่นกระเบื้องยิปซัม โดยจากผลการทดสอบพบว่าแผ่นสังกะสีมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด รองลงมาเป็นแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด และแผ่นกระเบื้องยิปซัม แต่แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมีการสะสมพลังงานความร้อนได้นานที่สุด

ธีระ นนทะภา (2550) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อน โดยใช้กระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้วเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ชุดที่หนึ่งจะบรรจุวัสดุเก็บสะสมความร้อนไว้ภายในกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้ว ส่วนชุดที่สองไม่มีการบรรจุวัสดุเก็บสะสมความร้อน ซึ่งอากาศจะไหลผ่านช่องระหว่างแผ่นปิดกับกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้ว จากผลการทดสอบภาคสนามพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบที่มีวัสดุเก็บสะสมความร้อนมีสมรรถนะสูงกว่าแบบที่ไม่มีวัสดุเก็บสะสมความร้อนประมาณ 16.02% หลังจากนั้นได้ทำการสอบโดยทำการเพิ่ม ชุดสารดูดความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นของอากาศก่อนให้ไหลผ่านเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าได้อัตราการกักตัวของซิลิกาเจลสูงสุดเท่ากับ  $221.385 \text{ g/Hr}$  มีประสิทธิภาพของการกักน้ำเท่ากับ 64.81 %

Chaurasia (2543) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่ายโดยใช้แผ่นซีเมนต์คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยท่ออลูมิเนียมที่ถูกหล่อด้วยซีเมนต์ จะอยู่ด้านบนผิวของแผ่นซีเมนต์ การ

ทดลองครั้งนี้ไม่ใช้กระจกคลุมด้านบนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และเปรียบเทียบสีที่ทำหีบคอนกรีตแผ่น โดยเปรียบเทียบสองสีคือ สีดำ และสีขาว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสีดำจะร้อนเร็วกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าสีขาว โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุดคือ 58 °C

Cristofari, et al. (2544) ศึกษาสมรรถนะแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยทำการเปรียบเทียบแผงรังสีที่สร้างขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์และแผงรังสีที่ทำจากโลหะที่ขายตามท้องตลาด โดยจากการสร้างแผงรังสีที่สร้างจากวัสดุพอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบากว่าแผงรังสีที่ทำจากโลหะมากถึง 50% และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของตัวแปรต่าง เช่น ความหนาของฉนวน อัตราการไหลของของไหล และชั้นความหนาของของไหล รวมทั้งมีการหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยประจำปีได้ประมาณ 56.5% ในที่ไม่มีลม และประมาณ 49.0% ในที่มีความเร็วลม 5 m/s

Siqueira, et al. (2554) งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย แนวคิดคือสร้างเครื่องทำน้ำร้อนโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ทั้งหมด ซึ่งใช้ราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าและยังสามารถสร้างได้เอง โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์ PVC เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยไม่ใช้กระจกครอบไว้ ในส่วนของถังเก็บน้ำร้อนจะเป็นถังที่สร้างจากพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยพอลิสไตรีน โดยผลการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ธรรมดาที่ขายตามท้องตลาด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ยอดเยี่ยม แม้ว่าประสิทธิภาพนี้ยังไม่เทียบเท่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดทั่วไปก็ตาม โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 40.2 % อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 43.7 °C และ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดทั่วไปมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 43.8 % อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 45.5 °C

Ilha and Ribeiro (2555) งานวิจัยนี้เป็นแนวทางสำหรับการรวมการผลิต เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายในบ้านอยู่อาศัยที่มีรายได้ต่ำกับการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมของกลุ่มประชากรที่ศึกษา เพื่อแก้ไขให้กลุ่มประชากรรายได้นั้นมาพึ่งพิงเทคโนโลยีที่ประหยัดพลังงานและดีต่อสิ่งแวดล้อม โดยเลือกชุมชน Campinas SP ในประเทศบราซิล เป็นชุมชนที่ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย ซึ่งสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์เกือบทั้งหมด เช่น ถังเก็บน้ำร้อนใช้ถังพอลิเอทิลีน และใช้แถวของท่อ PVC ที่ทำสีดำเป็นตัวรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ แล้วทำการเก็บสถิติการใช้งานรวมทั้งความคิดเห็นของบ้านที่ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนดังกล่าว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทางชุมชนได้ทำการรวมโปรแกรมลดการสูญเสียพลังงานและสร้างแรงจูงใจต่อทางเลือกใหม่ในการผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในบ้านเรือน

พลทรัพย์ บุญวานิช (2523) ศึกษาเปรียบเทียบชุดรับรังสีในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้แผ่นทองแดงพ่นสีดำกับชุดรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมทำอะโนไดซ์สีดำ เป็นแผ่นดुकกลืนรังสีอาทิตย์ โดยขนาดของแผ่นดुकกลืนมีขนาด  $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$  ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้แผ่นรับรังสีทำด้วยทองแดงมีประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าแผ่นรับรังสีที่ทำด้วยอะลูมิเนียมทำอะโนไดซ์สีดำเล็กน้อย ซึ่งอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

นฤมล สมพลเดช (2535) ประยุกต์ใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นเป็นฉนวน โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นฉนวนหุ้มถึงสะสมความร้อนระหว่างแกลบ เส้นใยมะพร้าว และไมโครไฟเบอร์ เพื่อศึกษาอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้และหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ตัวรับรังสีแผ่นเรียบขนาด  $1 \times 2 \text{ m}^2$  ซึ่งทำจากแผ่นสังกะสีและท่อทองแดงพ่นสีดำ ซึ่งมีต้นทุนในการสร้างเครื่องโดยใช้ไมโครไฟเบอร์เป็นฉนวนคิดเป็นเงิน 3,923 บาท และต้นทุนในการสร้างเครื่องโดยใช้เส้นใยมะพร้าวและแกลบเป็นฉนวนคิดเป็นเงิน 3,823 บาท ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า แกลบเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนได้ดีที่สุด และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้มากที่สุดอีกด้วย

กิตติ สถาพรประสาธน์ (2541) การออกแบบผนังทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ผลิตน้ำร้อนในบ้านพักอาศัย ลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้ามาในบ้านพักอาศัย และก่อให้เกิดการระบายอากาศตามธรรมชาติ โคนผนังน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผ่นพลาสติก ช่องว่างอากาศระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์กับแผ่นพลาสติก ถึงสะสมความร้อน และฉนวน โดยจะอยู่รวมไว้เป็นชุดเดียวกันและหันหน้าไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุด ผลิตได้ประมาณ  $40 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังลงได้ประมาณ 60 – 70 % ก่อให้เกิดการระบายอากาศตามธรรมชาติประมาณ 0.001 – 0.018 kg/s

กันยรัตน์ เรืองเดช และคณะ (2544) ศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง โดยตัวกักเก็บความร้อนใช้แผ่นสแตนเลสเงาในการรวมแสงเข้าสู่ท่อที่มีลักษณะ 2 ชั้น ทำจากทองแดง โดยมีพื้นที่รับแสงของเครื่องทำน้ำร้อนทั้งหมด  $0.936 \text{ m}^2$  และถังเก็บน้ำร้อนมีความจุ 63 L จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนขึ้นอยู่กับมุมเอียง และอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าประมาณ  $60 - 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยทั้งวันมีค่าเท่ากับ  $57 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อโศก ศรีทองธรรม (2553) นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติ โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของระบบ การออกแบบการทดลองทำโดยติดตั้งลิ้นเปิด – ปิด ที่ท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบนภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน 5 แบบ โดยจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 34.39 % ซึ่งเป็นการทดสอบในแบบที่ 3

Khalifa and Jabbar (2009) ศึกษาเปรียบเทียบถึงสมรรถนะระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการรวมตัวเก็บรังสีอาทิตย์และถังสะสมน้ำร้อนเป็นชิ้นเดียวกัน เปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไป โดยศึกษาผลของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ความร้อนสะสม และประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 58 °C ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนที่สร้างขึ้นสูงถึง 0.4 – 0.78 มากกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไปซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.21 – 0.35 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมเท่ากับ 7.40 – 8.60 W/m<sup>2</sup>°C สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนที่สร้างขึ้น

Lima et al. (2005) พัฒนาหาต้นแบบของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับบ้านพักอาศัย เนื่องจากเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดนั้นมีขนาดที่เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่าอาคารบ้านเรือน โดยจะทำการหาตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น ขนาดของแผ่นรับรังสี มุมเอียงของแผ่นรับรังสี และปริมาณของน้ำร้อนที่ระบบผลิตได้โดยใช้ถังเก็บน้ำ แนวนอนที่มีลวดความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในถังเก็บน้ำ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (TRNSYS) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้สูงสุดในการผลิตน้ำร้อนให้ได้พลังงานสูงสุดโดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ค่าใช้จ่ายของพลังงานเสริมระหว่างการใช้ของระบบนี้กลับมีค่าสูงกว่าระบบอื่นๆ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งต้องใช้การลงทุนเริ่มแรกที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบต่างๆ ไป โดยขนาดของแผงรับแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ 2.14 – 3.62 m<sup>2</sup> โดยมุมเอียงของแผ่นรับรังสีจะขึ้นอยู่กับละติจูด โดยมีค่ามุมเอียง ( $\beta$ ) = ละติจูด ( $\phi$ ) + 15°

Ho et al. (2005) ศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อขดรูปทรงสี่เหลี่ยมรวมถึงกระบวนการรีไซเคิล โดยทำการค้นหาในหลายๆสิ่ง ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมารีไซเคิลจะถูกออกแบบตรงบริเวณปลายของท่อเพื่อเพิ่มกายถ่ายเทมวลและความร้อน ในกระบวนการรีไซเคิลภายนอกจะเป็นการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ไปยังอากาศร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนสูงขึ้น โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดสอบทั้งทางทฤษฎีและจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการรีไซเคิลพลังงานที่ได้จาก

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบนี้ รวมทั้งค่าต่างๆดังต่อไปนี้ อัตราส่วนการไหลของท่อขรุขระทรงสี่เหลี่ยม ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้าและออก จำนวนการขดของท่อ อัตราส่วนการรีไซเคิล และอัตราการไหลของน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี เป็นต้น จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นถ้าใช้จำนวนขดของท่อหนึ่งขดซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ จะดีกว่าท่อที่ไม่มีขดและเป็นท่อตรงอย่างเดียวซึ่งไม่มีเกิดการรีไซเคิล โดยอัตราการไหลของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน อีกทั้งยังเป็นการความเร็วของๆ ไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แต่อาจทำให้อุณหภูมิน้ำออกลดลงไป

Dagdougui et al. (2010) งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบในกรณีต่างกัน โดยกรณีที่ 1 เป็นการศึกษาแบบจำลองเพื่อหาการสูญเสียความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนจากความแตกต่างของจำนวนและชนิดของแผ่นปิดใสด้านบน ซึ่งเป็นการศึกษาควบคู่ไปกับค่าใช้จ่าย และกรณีที่ 2 เป็นการศึกษาหาตัวเก็บรังสีต้นแบบที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำและพื้นที่ของแผงรังสีควบคู่กันเพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำตรงทางออกที่สูงและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าการสูญเสียความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะลดลงตามจำนวนของแผ่นปิดใส และพบว่าการรวมแผ่นกระจกใสและแผ่นพลาสติกใส (Plexiglas) จะไปเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ผลจากการออกแบบตัวต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้นพบว่าผลของพื้นที่รับแสงนั้นแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ แต่อัตราการไหลของน้ำนั้นกลับมีผลมากกว่า

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านพบว่า มีการศึกษาและมีการพัฒนาอุปกรณ์การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มาอย่างต่อเนื่อง และมีความพยายามที่จะลดต้นทุนของการผลิตเพื่อให้เกิดแรงดึงดูดต่อผู้อยู่อาศัยตามบ้านให้หันมาใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนมากขึ้น แต่ยังมีปัญหาในบางประการ คือ ความคงทนแข็งแรงและอายุการใช้งานที่ต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด รวมทั้งประสิทธิภาพที่ได้ยังไม่เทียบเท่า งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างตัวต้นแบบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกลง และสามารถใช้งานได้จริง อายุการใช้งานที่นานพอๆกับเครื่องเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด รวมทั้งจะมีการพัฒนาให้มีสมรรถนะที่สูงพอๆกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาดอีกด้วย