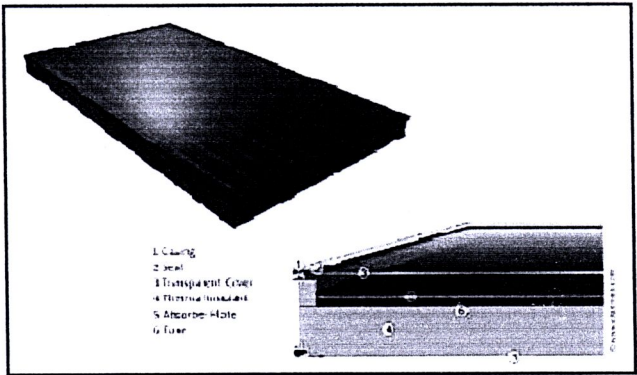


บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

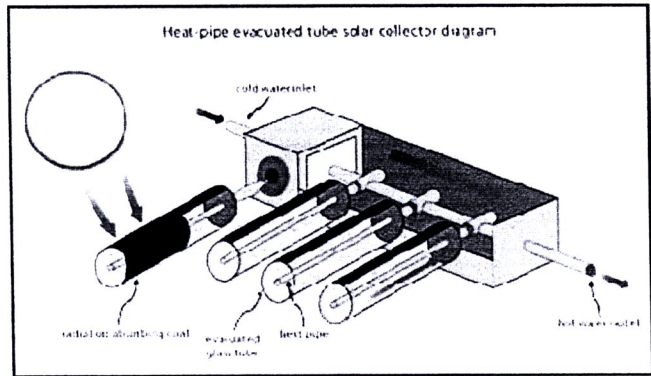
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นความร้อนถ่ายเทให้กับของไหลทำงานให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อนที่จะถูกดึงนำไปใช้งานต่อไป ทั้งนี้สามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้เป็น 2 แบบ คือ

(1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat – Plate Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้จะสามารถผลิตน้ำร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง (40 – 60 °C) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat – Plate Solar Collector)

(2) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนชนิดท่อสุญญากาศ (Heat Pipe Evacuated Tube Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้สามารถผลิตน้ำร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิมากกว่า 80 °C) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนชนิดท่อสุญญากาศ
(Evacuated Tube Heat Pipe Solar Collector)

2.2 แผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (Compound Parabolic Concentrator, CPC)

CPC เป็นตัวเพิ่มความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แบบอยู่กับที่ (Fixed Concentrator) ที่มีอุณหภูมิใช้งานปานกลาง (100 – 300 °C) โดยมีรางสะท้อนรังสีให้มีความเข้มเพิ่มขึ้นไปประมาณ 1.1 – 10 เท่า โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์อย่างเที่ยงตรงตลอดเวลา ต้องการการปรับตำแหน่งเป็นบางครั้งบางคราว เช่น เดือนละครั้ง หรือฤดูกาลละครั้งเท่านั้น นอกจากนี้ CPC ยังมีพื้นที่ผิวสะท้อนรังสีมากกว่าแบบเคลื่อนตามดวงอาทิตย์ (Focusing Concentrator) จึงสามารถยอมให้มีการผิดพลาดของรูปแบบผิวสะท้อนรังสีได้มากขึ้น จึงไม่ต้องการความพิถีพิถันในการสร้างมากเท่าแบบเคลื่อนตามดวงอาทิตย์

CPC มีอัตราส่วนการรวมรังสีตามทฤษฎี (CR) ขึ้นอยู่กับตัวกลาง (Medium) ระหว่างตัวดูดรังสี ผิวสะท้อนรังสี และมุมรับรังสี โดย CPC แบบ 2 มิติ จะมีอัตราส่วนรวมรังสีตามทฤษฎี ดังนี้

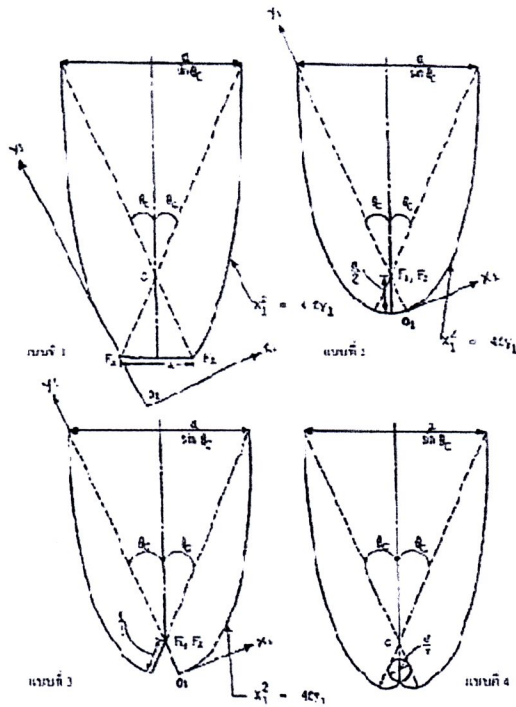
$$CR_{2-Dimension} = \frac{n}{\sin \theta_c} \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์การหักเหแสง (Index of Refraction) ของตัวกลางที่อยู่ระหว่างตัวรับรังสีกับรางสะท้อนรังสี
 θ_c คือ ครึ่งมุมรับรังสี (Acceptance Half Angle)

CPC แบบ 2 มิติ สามารถแบ่งตามลักษณะของเป้ารับรังสีได้ 4 แบบ ดังนี้

- แบบ 1 เป้ารับรังสีแบบแผ่นราบ (Flat Type)
- แบบ 2 เป้ารับรังสีแบบครีป (Fin Type)
- แบบ 3 เป้ารับรังสีแบบรูปวีคว่ำ (Inverted Vee Type)
- แบบ 4 เป้ารับรังสีแบบท่อ (Tubular Type) (แบบที่ทำการศึกษา)

ความสัมพันธ์ของความสูงทั้งหมดของรางสะท้อนรังสี (H) ความยาวโฟกัส (f) กับครึ่งมุมรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี) (a) ทั้ง 4 แบบ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบ และลักษณะเป้ารับรังสีของ CPC แต่ละแบบจะเห็นว่าเป้ารับรังสีแบบ 2 และแบบ 4 นั้น เป้ารับรังสีอยู่ภายในรางสะท้อนรังสีทั้งหมด จึงไม่ต้องมีฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนด้านหลังของเป้ารับรังสี และยังสามารถรับรังสีได้รอบตัวอีกด้วย ทำให้พื้นที่ของเป้ารับรังสีมีพื้นที่น้อยลง จึงสามารถตอบสนองต่อพลังงานที่ได้รับเร็วขึ้น ในการพิจารณานำ CPC มาใช้เป็นตัวรับรังสีของระบบน้ำร้อนนั้น เลือกใช้ CPC ที่มีครีปและท่อเป็นเป้ารับรังสี โดยให้น้ำซึ่งเป็นของไหลใช้งานไหลผ่านท่อรับรังสี เพื่อถ่ายโอนความร้อนจากตัวรับรังสีไปใช้งาน



รูปที่ 2.3 ชนิดและส่วนประกอบของ CPC แต่ละแบบ

รูปแบบรางสะท้อนรังสีของเป้ารับรังสีทั้ง 4 แบบ ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.3 นั้น มีพื้นผิวสะท้อนรังสีมาก และลักษณะโครงสร้างสะท้อนรังสีชันมาก ทำให้สามารถดัดรางสะท้อนรังสีส่วนเกินออกได้มากถึงร้อยละห้าสิบ โดยทำให้อัตราเพิ่มความเข้ม (Concentration Ratio, CR) ลดลงเพียงร้อยละสิบเท่านั้น โดยในรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเพิ่มความเข้มกับอัตราส่วนของความสูงต่อหน้าตัดรับรังสี (High / Aperture) และอัตราส่วนของผิวสะท้อนรังสีต่อหน้าตัดรับรังสี (Reflector / Aperture) ตามลำดับ นอกจากนี้การดัดรางสะท้อนรังสีออกยังช่วยลดความสูญเสียในการสะท้อนกลับมา และทำให้เหมาะสมในเชิงปฏิบัติมากขึ้น

รางสะท้อนรังสีที่มีมุมรับรังสีต่างกัน (อัตราเพิ่มความเข้มตามทฤษฎีต่างกัน) สามารถมีค่าอัตราเพิ่มความเข้มทางปฏิบัติเท่ากันโดยการตัด (Truncation) โดยที่

$$CR_{2-Dimension} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดแผงรับรังสี} (A_c)}{\text{พื้นผิวเป้ารับรังสี} (A_r)} \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของความสูง (H) ความยาวโฟกัส (f) ครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี, a) ของ CPC [1]

เป้ารับรังสี	ความสูงทั้งหมด (H)	ความยาวโฟกัส (f)	สมการส่วนโค้งรูปพาราโบลา
1. แบบแผ่นราบ (Flat Type)	$H = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{\tan \theta_c} + \frac{1}{\tan \theta_c \sin \theta_c} \right)$	$f = \frac{a}{2} (1 + \sin \theta_c)$	$x^2 = 4 fy$
2. แบบครีบ (Fin Type)	$H = \frac{a}{2} \left(1 + \frac{1}{\tan \theta_c \sin \theta_c} \right)$	$f = \frac{a}{2}$	$x^2 = 4 fy$
3. แบบรูปวีคว่ำ (Inverted Vee Type)	$H = \frac{a}{2} \left(\cos \theta_c + \frac{1}{\tan \theta_c \sin \theta_c} \right)$	$f = \frac{a}{2}$	$x^2 = 4 fy$
4. แบบท่อ (Tubular Type)	$H = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi \sin \theta_c} + \frac{1}{\tan \theta_c \sin \theta_c} \right)$	$f = \frac{a}{r}$	$BC = \beta \left(\frac{d}{2} \right)$ สำหรับ $\beta \leq \theta_c + \frac{\pi}{2}$ $BC = \frac{\left(\frac{d}{2} \right) \left[\left(\beta + \theta_c + \frac{\pi}{2} \right) - \cos(\beta - \theta_c) \right]}{1 + \sin(\beta - \theta_c)}$ สำหรับ $\theta_c + \frac{\pi}{2} \leq \beta \leq 3\frac{\pi}{2} - \theta_c$

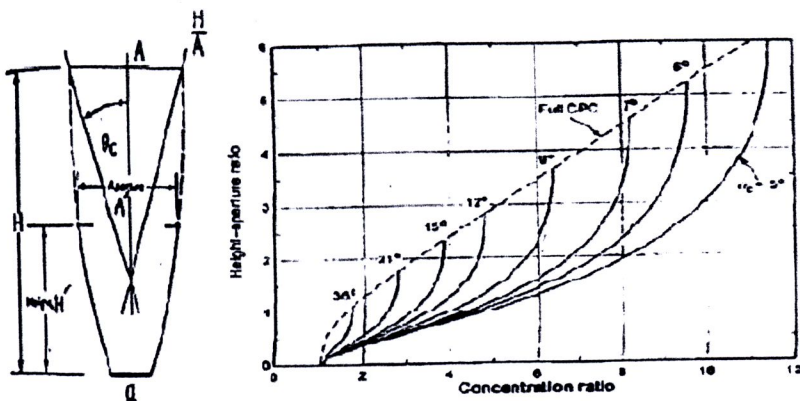
โดยที่ BC คือ ส่วนโค้งรูปพาราโบลา
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
r คือ รัศมีของท่อ (m)

2.3 ข้อจำกัดของ CPC ในการรับรังสี

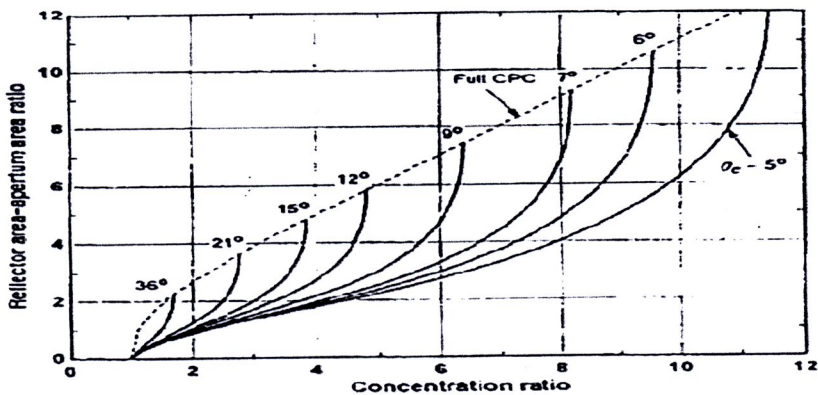
2.3.1 สำหรับ CPC ที่มีพื้นที่เปิดดูรังสีเท่ากันแล้ว แบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีน้อยกว่าจะมีความสูง (H) มากกว่า และมีพื้นที่รับรังสี (A_c) และอัตราส่วนรวมรังสีมากกว่าแบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่โตกว่า แต่ถ้ามีการตัดความสูงของ CPC ลงให้มีหน้ากว้างพื้นที่รับรังสีเท่ากัน หรือให้มีอัตราส่วนรวมรังสีที่เท่ากันแล้ว แบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่น้อยกว่าจะมีความสูงน้อยกว่า

2.3.2 CPC ที่มีครึ่งมุมรับรังสีน้อยกว่าจะมีอัตราส่วนเพิ่มความเข้มที่มากกว่า แต่จะมีระยะเวลาในการรับรังสีต่อวัน หรือต่อฤดูกาลได้น้อยกว่า CPC ที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่โตกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการปรับมุมรับรังสีบ่อยครั้งกว่า

หมายเหตุ: การตัดความสูงของ CPC จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและน้ำหนักลง



รูปที่ 2.4 อัตราส่วนความสูงต่อหน้าตัดรับรังสี (H/A) ของ CPC
แบบเต็มและแบบที่ถูกตัดบางส่วน



รูปที่ 2.5 อัตราส่วนของผิวสะท้อนรังสีต่อพื้นที่หน้าตัดแผงรับรังสีของ CPC
แบบเต็มและแบบที่ถูกตัดบางส่วน

2.4 ความร้อนนำไปใช้ประโยชน์จากตัวรวมรังสี

พิจารณาตัวเก็บรังสีอาทิตย์: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อน โดยถ่ายเทให้กับของไหลที่ไหลภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำให้ของไหลดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_u = A_c FR \left[s - \frac{U_L}{CR} (T_{f,i} - T_a) \right] = ICR \times \rho \gamma (\tau \alpha)_e - U_L (T_s - T_a) \quad (2.3)$$

จะได้
$$\frac{U_L}{\rho \gamma (\tau \alpha)_e} = \frac{ICR}{(T_s - T_a)} \quad (2.4)$$

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2.5)$$

เมื่อ	A_c	คือ	พื้นที่รับรังสี (Aperture Area, m^2)
	C_p	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg - K)
	CR	คือ	อัตราส่วนรวมรังสี
	FR	คือ	ตัวประกอบการนำความร้อนมาใช้ (Heat Removal Factor)
	I	คือ	ความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (W/m^2)
	$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (W)
	Q_u	คือ	พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)
	s	คือ	อัตราการรับความร้อนต่อพื้นที่ของแผงรับรังสี (W/m^2) ($s = \tau \alpha \rho G_T$)
	T_a	คือ	อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (K)
	T_s	คือ	อุณหภูมิสมดุล (K)
	$T_{f,i}$	คือ	อุณหภูมิของน้ำขณะไหลเข้าแผงรับรังสี (K)
	$T_{f,o}$	คือ	อุณหภูมิของน้ำขณะไหลออกจากแผงรับรังสี (K)
	U_L	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ ($W/m^2 - K$)
	ρ	คือ	สภาพสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวสะท้อนรังสี
	$(\tau \alpha)_e$	คือ	ค่าผลคูณประสิทธิภาพของสภาพส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (τ) และสภาพดูดกลืนรังสีของตัวรับรังสี (α)
	γ	คือ	อัตราส่วนการตกกระทบเป้ารับรังสี

2.5 ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีรูปประกอบพาราโบลา

ในการวิเคราะห์ตัวรวมรังสีรูปประกอบพาราโบลา โดยทั่วไปถือว่าประสิทธิภาพแปรเปลี่ยนไปตามการสูญเสียเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Losses) และการสูญเสียเชิงความร้อน (Thermal Losses) ตามสมการของ Hottel – Whillier – Bliss กล่าวคือ

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_T A_c} \quad (2.6)$$

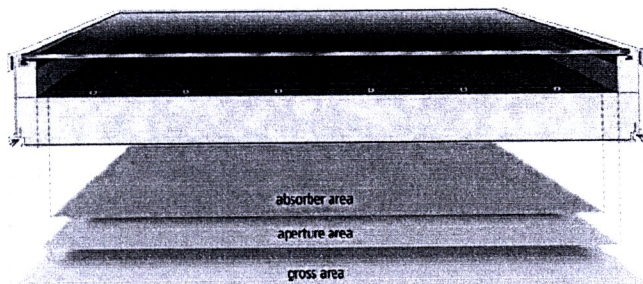
หรือ
$$\eta_c = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{G_T A_c} \quad (2.7)$$

หรือ
$$\eta_c = \frac{A_c FR \left[s - \frac{U_L}{CR} (T_{f,i} - T_a) \right]}{(G_T A_c)} \quad (2.8)$$

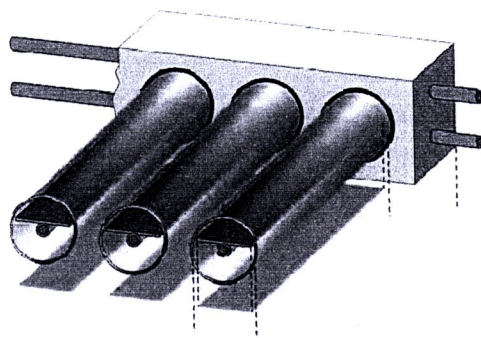
หรือ
$$\eta_c = FR \left[\eta_{opt} - \frac{U_L}{CR} \frac{(T_{f,i} - T_{f,i})}{G_T} \right] \quad (2.9)$$

2.6 ความแตกต่างของพื้นที่ในการคำนวณความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

การคำนวณความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำคัญอย่างมากที่จะต้องกำหนดว่าใช้พื้นที่ใดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาเป็นฐานในการคำนวณพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ คำจำกัดความที่ถูกต้องของพื้นที่เหล่านี้อยู่ในภาคผนวกของมาตรฐาน EN 12975 (23) และตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน EN 12975-2 ค่าลักษณะเฉพาะ (Characteristic values) สัมพันธ์กับพื้นที่ช่องเปิดรับรังสีอาทิตย์ (Aperture area) แต่ในมาตรฐาน ISO 9806-1 (1994) (ISO9806) ระบุว่าค่าลักษณะเฉพาะสัมพันธ์กับพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorber area)

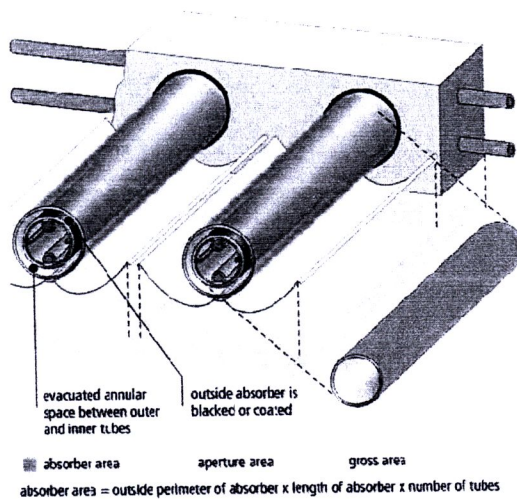


(ก) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-Plate Collector)



■ absorber area aperture area gross area

(ข) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน (Heat-Pipe Evacuated Collector)



(ค) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (Heat-Pipe Evacuated Tube Collector)

รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางแสดงความแตกต่างของพื้นที่ สำหรับนำมาคำนวณความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

(ก) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-Plate Collector)

(ข) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน (Heat-Pipe Evacuated Collector)

(ค) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (Heat-Pipe Evacuated Tube Collector)

2.6.1 พื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (พื้นที่ทั้งหมด) (Gross collector area, A_G) หมายถึง พื้นที่ซึ่งอยู่ระหว่างขอบเขตด้านนอกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยทั่วไปคือขอบเขตด้านนอกของโครงหรือกรอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2.6.2 พื้นที่ช่องรับรังสีอาทิตย์ (Aperture area, A_a) หมายถึง พื้นที่ช่องเปิด (กระจก) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่แสงอาทิตย์ส่องผ่านในแนวตั้งฉากหรือรังสีตกกระทบในมุมใดๆ โดยทั่วไปหมายถึงพื้นที่กระจกที่มองเห็นภายในแผงที่เชื่อมปิดกันไว้ภายในกรณีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดไม่มีตัวสะท้อนแสง (Reflector) พื้นที่ช่องรับรังสีอาทิตย์ คำนวณจากผลคูณของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับความยาวภายในของท่อทรงกระบอกที่แสงสามารถส่องผ่านได้กับจำนวนท่อและในกรณีที่มีตัวสะท้อนแสงติดตั้งอยู่ด้านหลังหรือภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พื้นที่ช่องรับรังสีอาทิตย์คำนวณได้จากพื้นที่ฉาย (Projected area) ที่เกิดจากตัวดูดกลืนและตัวสะท้อนแสง (ใช้ในมาตรฐาน EN 12975-2 (01.1998) (23))

2.6.3 พื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorber area, A_A) หมายถึง พื้นที่ทั้งหมดของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบมีครีปในตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ และเช่นเดียวกันกับกรณีตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อซึ่งจะรวมกับพื้นที่ฉายของส่วนข้อต่อและหัวท่อซึ่งอาจจะรับรังสีอาทิตย์ด้วย (ใช้กับมาตรฐาน ISO 9606-1 (1994) (24))

2.6.4 พื้นที่ใช้งานของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Active absorber area) โดยทั่วไปพื้นที่ใช้งานของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (A_A) แต่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์บางชนิดอาจถูกสร้างในลักษณะที่พื้นที่ตัวดูดกลืนรังสีทางด้านล่างของกรอบใหญ่กว่าพื้นที่ช่องรับรังสีอาทิตย์ หรือกรอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อาจบังรังสีอาทิตย์ พื้นที่ใช้งานของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะต้องเป็นพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกรอบ ซึ่งกรณีนี้จะได้พื้นที่ใช้งานของตัวดูดกลืนที่เท่ากับพื้นที่ช่องรับรังสีอาทิตย์ (A_a)



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	7 S.A. 2555
เลขทะเบียน.....	190953
เลขเรียกหนังสือ.....	