



บทที่ 2

## ระบบพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.1 ดวงอาทิตย์และการแผ่รังสี

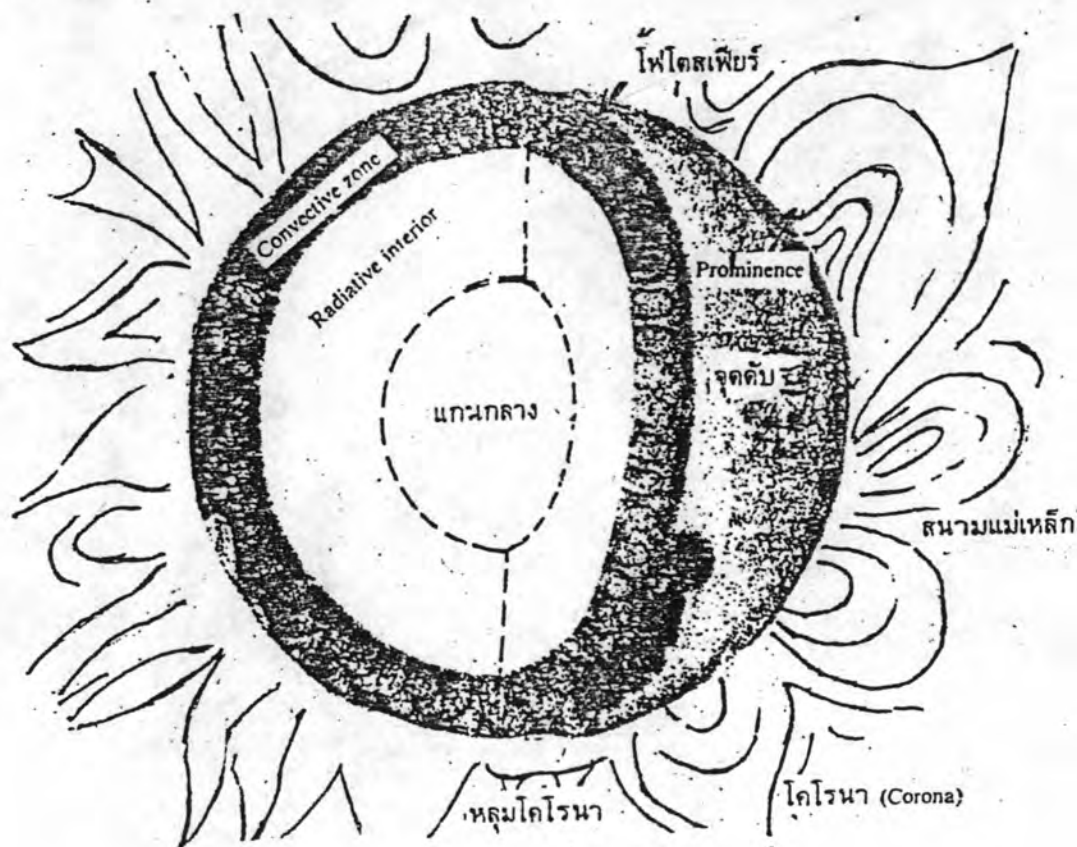
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเรื่องราวเบื้องต้นทั่วไปเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดพลังงานที่โลกได้รับคือ ดวงอาทิตย์และปริมาณรังสีที่โลกได้รับในลักษณะต่าง ๆ

#### 2.1.1 ดวงอาทิตย์ (2, 3, 4)

ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยมวลที่เป็นก๊าซ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย  $1.39 \times 10^6$  กิโลเมตร มีมวลเท่ากับ  $1.99 \times 10^{30}$  กิโลกรัม มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1410 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระยะทางเฉลี่ยจากโลก  $1.5 \times 10^8$  กิโลเมตร ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนประมาณ 75 % ที่เหลือเป็นธาตุฮีเลียม และธาตุหนักอื่น เช่น เหล็ก ที่ผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5762 องศาเซลวินซึ่งถือเป็นอุณหภูมิที่ดวงอาทิตย์แผ่ออกมายังโลก อุณหภูมิภายในมีการประมาณว่าอยู่ระหว่าง  $8 \times 10^6 - 40 \times 10^6$  องศาเซลวิน ความหนาแน่นประมาณ 80 - 100 เท่าของน้ำ ดวงอาทิตย์ทำตัวคล้ายเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน (fusion reactor) อย่างต่อเนื่อง อะตอมของธาตุไฮโดรเจนถูกอัดเข้าหากันโดยมวลของอะตอมนับล้าน ๆ ตันที่ทับถมโดยแรงโน้มถ่วง นิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนจะรวมกันหรือหลอมเข้าด้วยกันเป็นธาตุฮีเลียมที่หนักกว่า แต่โดยที่มวลของธาตุไฮโดรเจนที่รวมกันหนักกว่ามวลของนิวเคลียสฮีเลียม มวลที่เหลือจึงกลายเป็นพลังงานมหาศาลถ่ายเทออกสู่ผิวของดวงอาทิตย์ โครงสร้างของดวงอาทิตย์คงแสดงในรูปที่ 2.1 ดังได้กล่าวมาแล้วว่าดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ผิว 5762 องศาเซลวิน ซึ่งถือกันว่าเป็นดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดของวัตถุดำ (black body) ซึ่งอุณหภูมิที่ผิวถือเป็นแหล่งกำเนิดการแผ่รังสีส่วนใหญ่

### 2.1.2 พลังงานแสงอาทิตย์เหนือบรรยากาศโลก (2.3, 4)

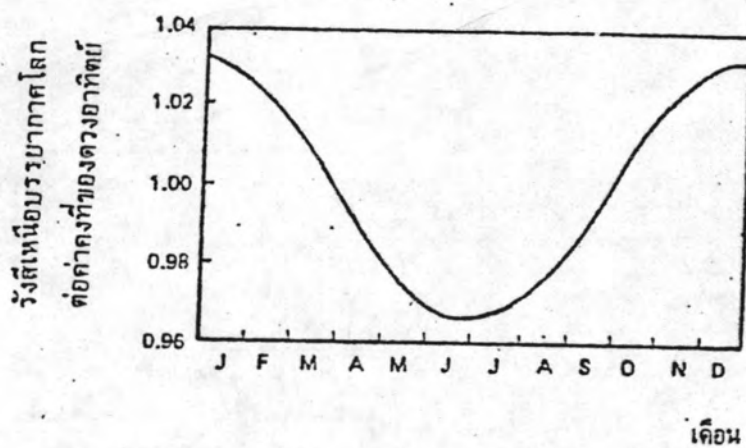
โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี ดังนั้นระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกันแปรอยู่ในช่วง  $1.5 \times 10^7 \pm 1.7 \%$  กิโลเมตร พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับเหนือบรรยากาศโลกมีค่าสูงสุด  $1400 \text{ W/m}^2$  ในช่วงเดือนธันวาคมและเดือนมกราคม และมีค่าต่ำสุด  $1305 \text{ W/m}^2$  ในช่วงเดือนมิถุนายนและเดือนกรกฎาคมโดยเฉลี่ยแล้วพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับรายปีที่ระยะทางเฉลี่ยเหนือบรรยากาศโลกเท่ากับ  $1353 \text{ W/m}^2$  เรียกว่าค่าคงที่สุริยะ (The solar constant) ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ในการนำเอาไปใช้มักพิจารณาถึงการแผ่รังสีในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ด้วย มีการหาเส้นโค้งมาตรฐานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ระยะทางเฉลี่ยของดวงอาทิตย์ เมื่อทำให้เส้นโค้งเรียบ พื้นที่ใต้เส้นโค้งจะเป็นค่าคงที่สุริยะ เส้นโค้งดังกล่าวทำโดย NASA (ค.ศ. 1971) ดังรูปที่ 2.3



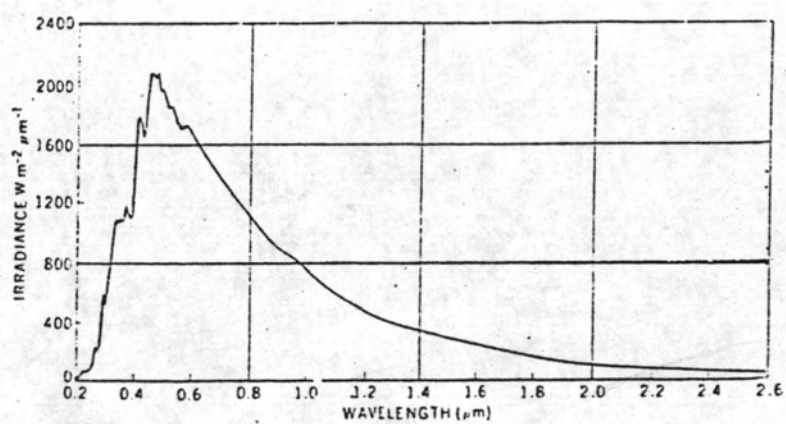
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

วัน	ระยะทางจากโลกไป ดวงอาทิตย์ต่อค่าเฉลี่ย	ปริมาณรังสี ต่อค่าคงที่สุริยะ	ปริมาณรังสี (kW/m <sup>2</sup> )
Jan. 1	0.9832	1.034	1.399
Feb. 1	0.9853	1.030	1.394
Mar. 1	0.9908	1.019	1.379
Apr. 1	0.9993	1.001	1.354
May 1	1.0076	0.985	1.333
June 1	1.0141	0.972	1.312
July 1	1.0167	0.967	1.308
Aug. 1	1.0149	0.971	1.312
Sep. 1	1.0092	0.982	1.329
Oct. 1	1.0011	0.998	1.350
Nov. 1	0.9925	1.015	1.373
Dec. 1	0.9860	1.029	1.392

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงตลอดปีของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์  
เนื่องจากระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์เปลี่ยนไป (2)



รูปที่ 2.2 อัตราส่วนของการแผ่รังสีมายังโลกต่อค่าคงที่สุริยะ  
ในช่วงเวลาหนึ่งปี



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งมาตรฐานแสดงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์  
ที่ระยะทางเฉลี่ยโลกและดวงอาทิตย์  $1353 \text{ W/m}^2$

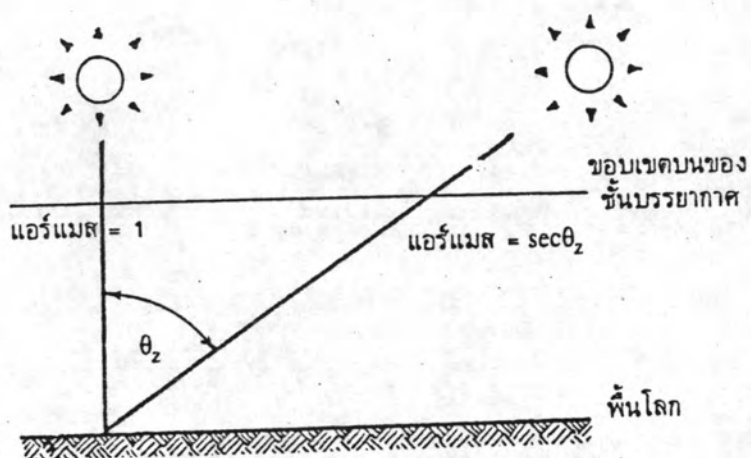
### 2.1.3 พลังงานแสงอาทิตย์บนผิวโลก ( 3, 4 )

เนื่องจากบรรยากาศโลกประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ ไอน้ำ ฝุ่น และอนุภาคอื่น ๆ อีกจำนวนมากมาย จึงทำให้รังสีที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์บางส่วนถูกดูดกลืน กระจัดกระจายมีทิศทางเบี่ยงเบนไป จึงเหลือรังสีปริมาณหนึ่งมาถึงโลก พลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยรังสีคือรังสีตรงและรังสีกระจาย พลังงานแสงอาทิตย์ประเภทรังสีตรงเป็นรังสีที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์โดยตรง เป็นรังสีขนาน พลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีกระจายเป็นรังสีที่ออกจากตัวกลางอื่นที่ดวงอาทิตย์ส่งรังสีมาให้ เช่น ท้องฟ้า ซึ่งรังสีมีทิศทางแบบกระจาย

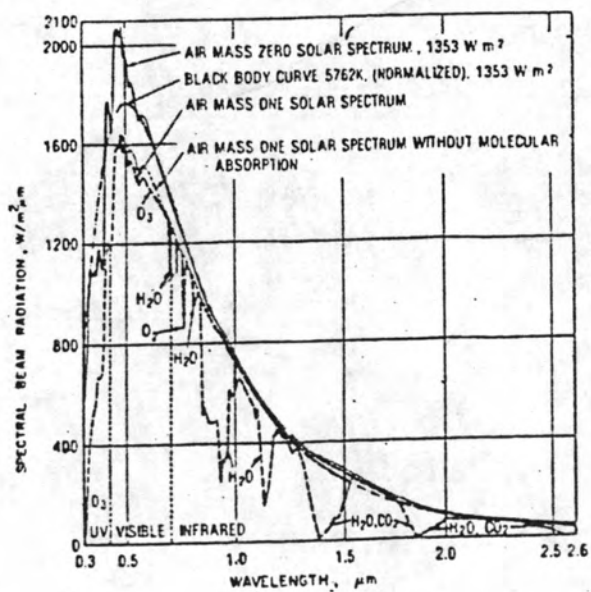
ในการศึกษาผลของบรรยากาศที่มีต่อการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้น เราต้องพิจารณาถึงความหนาของบรรยากาศที่ขวางกั้นทางเดินของรังสีด้วย จึงนิยามคำว่า "แอร์แมส" (Air mass) ขึ้นเพื่อใช้ระบุระยะทางลัมพันธ์ที่แสงอาทิตย์ฉายผ่านบรรยากาศ โดยกำหนดว่าถ้าแสงมาในแนวตั้งที่ระดับน้ำทะเลถือว่ามีความ  $m = 1$  ที่ตำแหน่งอื่น แอร์แมสมีค่าเท่ากับ  $\sec \theta_z$  เมื่อ  $\theta_z$  คือมุมที่แนวแสงทำกับแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.4 หัวข้อนี้เราพอแยกศึกษาได้เป็นข้อย่อยดังนี้

#### 2.1.3.1 การทะลุผ่านบรรยากาศของลำแสง

รังสีที่ได้รับบนผิวโลก เนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไปบ้างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโลก และดวงอาทิตย์ การกระจัดกระจาย (scattering) ของแสงเมื่อกระทบบรรยากาศ ซึ่งมีโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำและการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการดูดกลืน  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$  และ  $CO_2$  ดังรูปที่ 2.5 แสดงปริมาณแสงที่ผ่านบรรยากาศเข้าสู่ผิวโลกกรณี  $m = 0$  รังสีเอกซ์และรังสีความยาวคลื่นสั้นถูกดูดกลืนโดยบรรยากาศของโลกชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ถึงชั้นนอกบรรยากาศโดยมี  $N_2$  และ  $O_2$  เป็นตัวดูดกลืน ส่วนรังสีอุลตราไวโอเล็ตถูกดูดกลืนโดย  $O_3$  รังสีความยาวคลื่นมากกว่า  $2.5 \mu m$  ถูกดูดกลืนไว้มากโดย  $CO_2$ ,  $H_2O$  จึงทำให้เหลือรังสีน้อยมากมาถึงโลก ดังนั้นการนำรังสีมาใช้จึงพิจารณาในช่วง  $0.29 - 2.5 \mu m$



รูปที่ 2.4 คำจำกัดความของแอร์แมส



รูปที่ 2.5 กราฟเปรียบเทียบความเข้มที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เมื่อแสงผ่านบรรยากาศในแนวตั้งและแสงไม่ผ่านบรรยากาศ

เพราะเป็นช่วงที่เหลือจากการกระจัดกระจาย (scattering) และถูกคลื่นมาถึงโลกมากกว่าส่วนอื่น

### 2.1.3.2 ทิศทางของพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทรังสีตรง

แผ่นวัตถุที่ใช้รับแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งใด ๆ ให้พิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงแผ่นรับแสงอาทิตย์ที่ทำมุมเอียงกับระนาบระดับเป็นมุม  $\delta$  และดวงอาทิตย์ทำมุมกับเส้นตั้งฉากของแผ่นรับแสงเป็นมุม  $\theta$  แผ่นรับแสงหันหน้าเฉียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้เป็นมุม  $\alpha$  จากทิศใต้ ดังนั้นถ้าลำแสงที่ผิวโลกมีความเข้ม  $I_b$  ดังนั้นความเข้มลำแสงดังกล่าวจะกระทบแผ่นรับแสงในรูปที่ 2.6 ตามแนวตั้งฉากกับแผ่นรับแสงมีค่าตามสมการ

$$I_{b,c} = I_b \cos \theta \quad (2.1)$$

$\cos \theta$  หาโดยพิจารณาค่าแห่งของดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของแผ่นรับแสงที่ผิวโลกว่าอยู่ที่ใด ละติจูด (latitude) เท่าใด และตอนนั้นดวงอาทิตย์ขึ้นจากขอบฟ้าห่างจากเวลาเที่ยงวันเป็นเวลาเท่าใด มุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับมุม  $\theta$  ให้ดู รูปที่ 2.7

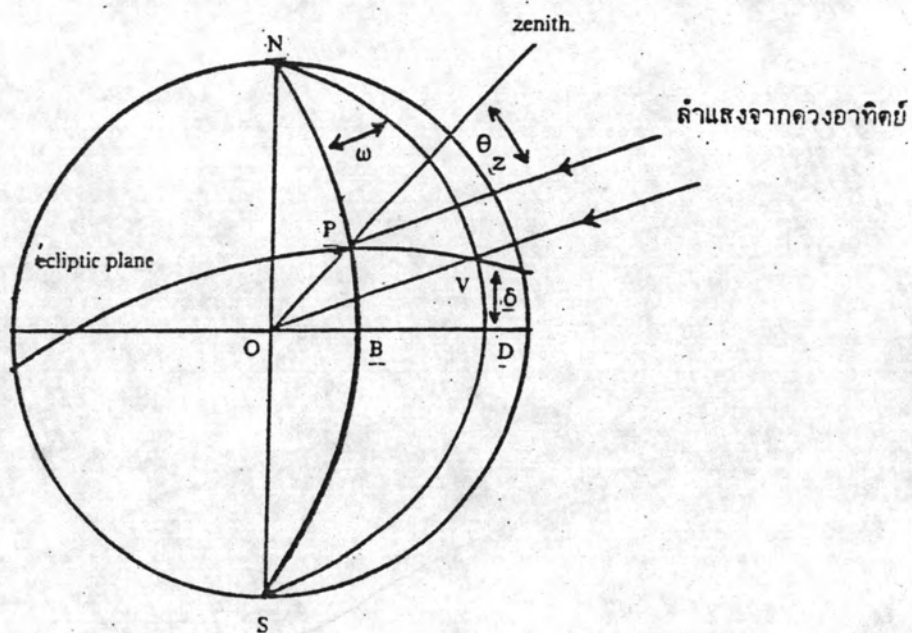
ในการหาความสัมพันธ์ของมุมชั่วโมง สุริยะ  $\omega$ , เคคิลเนชัน  $\delta$  และละติจูด  $POB(\varphi)$  อาศัยกฎของโคไซน์ สำหรับสามเหลี่ยมทรงกลม เราได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\theta$  และมุมอื่น ๆ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos S - \sin \delta \cos \varphi \sin S \cos r + \cos \delta \cos \varphi \cos S \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \varphi \sin S \cos r \cos \omega + \cos \delta \sin S \sin r \sin \omega \quad (2.2)d \end{aligned}$$

โดยที่  $\varphi$  = ละติจูด (ไปทางทิศเหนือคิดเป็นค่าบวก)







รูปที่ 2.7 มุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งแผ่นรับแสงที่จุด p ซึ่งอยู่ที่ละติจูด POB

- δ = เคคลิเนชัน หมายถึงมุมของดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันเทียบกับ  
ระนาบอิกเวเตอร์ (ถ้าไปทางทิศเหนือให้มีค่าเป็นบวก)
- S = มุมเอียงของแผ่นรับแสงกับแนวระดับ
- r = มุมของการหันหน้าของแผ่นรับแสงไปทางทิศใต้ ถ้าหันไปทางทิศ  
ตะวันออกมีค่าเป็นบวก หันไปทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นลบ
- ω = มุมชั่วโมง โดยตอนเที่ยงมีค่าเป็นศูนย์ ตอนเช้ามีค่าเป็นบวก  
ตอนบ่ายมีค่าเป็นลบ แต่ละชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15 องศาของ  
ลองจิจูด (longitude)

สำหรับ δ ดังกล่าวหาได้จากตารางประมาณของ P.I. Cooper

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \text{ องศา} \quad (2.3)$$

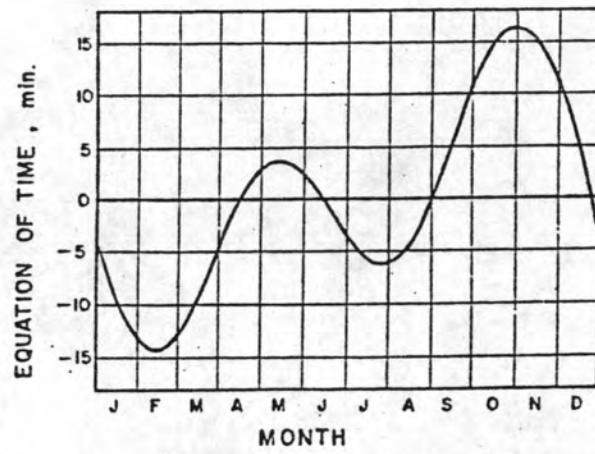
2.1.4 เวลาท้องถิ่นและเวลาสุริยะ (3, 5)

เวลาที่อ่านจากนาฬิกาคือเวลาท้องถิ่น ซึ่งกำหนดขึ้นโดยเทียบจากเวลาที่เมืองกรีนิช ประเทศอังกฤษ กับเส้นลองจิจูดมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่นั้น ๗ ชั่วโมง โดยเทียบเวลาที่แตกต่างกัน 4 นาที สำหรับ 1 เส้นแวง สำหรับประเทศไทยใช้เส้นลองจิจูด 105 ตะวันตกเป็นเส้นลองจิจูดมาตรฐานในการเทียบเวลา

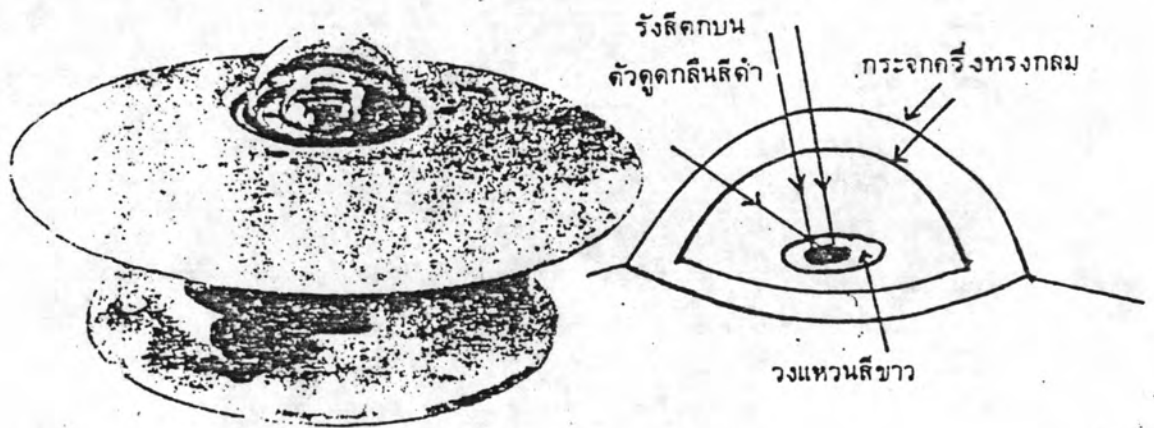
เวลาที่กล่าวถึงดวงอาทิตย์อยู่ที่ใดนั้นใช้เวลาสุริยะ ที่เวลาสุริยะเป็นเที่ยงวันดวงอาทิตย์จะอยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะในทิศทางเหนือใต้ของผู้สังเกตการณ์ ความสัมพันธ์ของเวลาสุริยะและเวลาท้องถิ่นคือ

$$\text{เวลาสุริยะ} = \text{เวลาท้องถิ่น} \pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.4)$$

$$E = \text{ค่าที่ได้จากสมการของเวลา ตามรูปที่ 2.8}$$



รูปที่ 2.8 สมการของเวลาเป็นฟังก์ชันกับเวลาของปี



รูปที่ 2.9 ไพราโนมิเตอร์รูปขวามือแสดงส่วนนรับการแผ่รังสี

$L_{sc}$  = เส้นลองกิจจุดมาตรฐาน

$L_{100}$  = เส้นลองกิจจุดท้องถิ่น

ค่า  $\pm$  นั้นถ้าตำแหน่งที่สังเกตอยู่ลองกิจจุดตะวันออกได้ค่าลบ ถ้าอยู่ลองกิจจุดตะวันตกได้ค่าบวก

#### 2.1.5 พลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ย

อัตราพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งตกบนพื้นโลกวัดได้โดยอุปกรณ์ที่ชื่อว่า ไพราโนมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ด้านบนของไพราโนมิเตอร์ซึ่งอยู่ภายใต้ครอบแก้วใสมีลักษณะเป็นวงแหวนสีดำชิดกับวงแหวนสีขาว ภายใต้วงแหวนทั้งสองเชื่อมติดอยู่กับปลายลวดเทอร์โมคัปเปิล เพราะวงแหวนสีดำเป็นตัวกลางซึ่งดูดแสงอาทิตย์ที่ติดขณะวงแหวนสีขาวเป็นตัวกลางสะท้อนแสงที่ดี ดังนั้นเมื่อนำไพราโนมิเตอร์ไปติดตั้งรับแสงแดด วงแหวนสีดำจะมีอุณหภูมิสูงกว่าวงแหวนสีขาว ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ทั้งสองซึ่งแสดงออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าจากลวดเทอร์โมคัปเปิลจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มของแสงอาทิตย์ได้

สำหรับประเทศไทยอัตราพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยซึ่งรับได้ที่ภาคต่าง ๆ มีค่าตามที่แสดงในตารางที่ 2.2

### ตารางที่ 2.2(3)

อัตราพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน บนระนาบระดับ กิโลจูล/ตารางเมตร วัน

สถานที่	ช่วงเวลา							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ภาคกลาง (ที่กรุงเทพฯ)	16789	19468	17793	16621	15491	16161	16370	16663
ภาคเหนือ (ที่เชียงใหม่)	16747	19259	20138	17249	15826	16830	16998	15575
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ที่ขอนแก่น)	16872	18045	19348	17500	16454	16370	17500	16495
ภาคใต้ (ที่สงขลา)	17877	19343	17458	16705	16998	16328	15072	14821

ช่วงเวลาที่ 1 คือช่วงเวลาระหว่าง 14 ม.ค. - 26 ก.พ.  
 - 2 - 27 ก.พ. - 12 เม.ย.  
 - 3 - 13 เม.ย. - 28 พ.ค.  
 - 4 - 29 พ.ค. - 15 ก.ค.  
 - 5 - 16 ก.ค. - 31 ส.ค.  
 - 6 - 1 ก.ย. - 15 ต.ค.  
 - 7 - 16 ต.ค. - 29 พ.ย.  
 - 8 - 30 พ.ย. - 13 ม.ค.

## 2.2 การถ่ายโอนความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง สามารถถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยมีรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนอยู่ 3 แบบได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

### 2.2.1 การนำความร้อน (6, 7)

การนำเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบหนึ่ง เกิดขึ้นได้คิโนของแข็ง เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิแตกต่างกันความร้อนจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณอุณหภูมิต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ  $Q$  อธิบายได้โดยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ดังต่อไปนี้

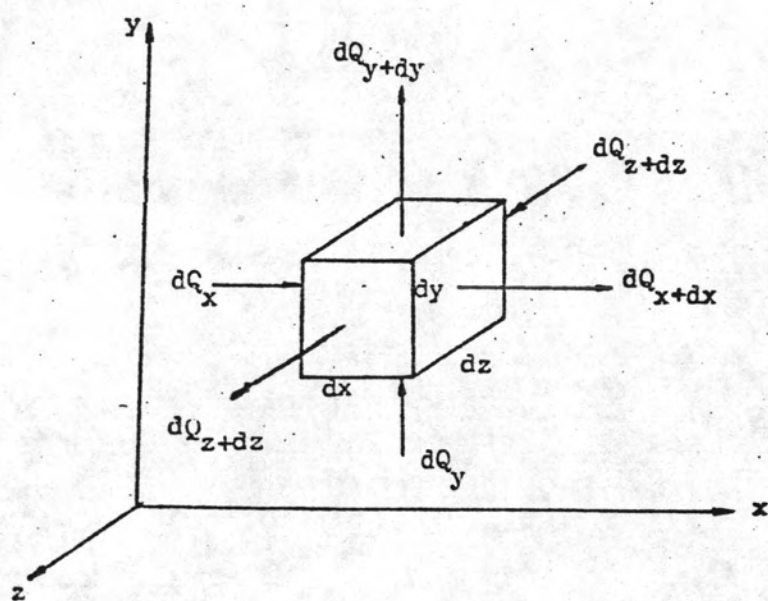
$$Q = -KA \frac{dT(x)}{dx} \quad (2.5)$$

- $T(x)$  คือ อุณหภูมิซึ่งขึ้นอยู่กักระยะทาง  
 $x$  คือ ระยะทางในทิศทางที่ความร้อนไหลผ่าน  
 $A$  คือ พื้นที่ที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน  
 $k$  คือ สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)

พิจารณาการนำความร้อนของตัวกลางที่มีขนาด  $dx$ ,  $dy$ , และ  $dz$  ในพิกัดฉาก โดยพิจารณาขณะสภาวะไม่คงที่ สำหรับตัวกลางไอโซทรอปิก ( $k_x = k_y = k_z$ ) ดังรูปที่ 2.10

อัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่รูปลูกบาศก์ในทิศทาง  $x$

$$dQ_x = -k dy dz \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.10 การนำความร้อนในลูกบาศก์

อัตราการไหลของความร้อนออกจากรูปลูกบาศก์ในทิศทาง  $y$

$$dQ_{x+dx} = -kdydz \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \quad (2.7)$$

อัตราของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในรูปลูกบาศก์จากการไหลในทิศทาง  $x$  มีค่า  $dQ_x - dQ_{x+dx}$  ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} dQ_x - dQ_{x+dx} &= kdydz \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \right] \\ &= kdx dy dz \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะเขียนอัตราการเพิ่มความร้อนอันเกิดจากทิศ  $y$  และ  $z$  ได้ดังนี้

$$dQ_y - dQ_{y+dy} = kdx dy dz \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.9)$$

$$dQ_z - dQ_{z+dz} = kdx dy dz \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนทั้งหมดจะมีค่า

$$= kdx dy dz \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.11)$$

เราเขียนอัตราการเพิ่มความร้อนของลูกบาศก์ให้อยู่ในรูปของปริมาตร ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) อุณหภูมิและเวลา ( $t$ ) ได้ดังนี้



$$\text{อัตราการเพิ่มความร้อน} = (\rho dx dy dz) C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

สมการ (2.11) และ (2.12) ต้องเท่ากัน ดังนั้น

$$k dx dy dz \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = dx dy dz C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{C_p \rho}{K} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\text{หรือ } \nabla^2 T = \frac{C_p \rho}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

กรณีสภาวะคงที่ สมการ (2.13) จะกลายเป็น

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.14)$$

สมการ (2.13) และ (2.14) จะมีคำตอบที่สมบูรณ์ได้ต้องทราบสมการเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

### 2.2.1.1 การนำความร้อนผ่านผนัง

การนำความร้อนผ่านผนัง คือนำความร้อนใน 1 มิติในพิกัดฉาก ดังรูปที่

2.11 สมการ (2.14) จะกลายเป็น (พิจารณาสภาวะคงที่)

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0 \quad (2.15)$$

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.16)$$

เงื่อนไขขอบเขต  $T(x) = T_1$  ที่  $x = 0$  (2.17a)

$T(x) = T_2$  ที่  $x = L$  (2.17b)

$T(x)$  สอดคล้องกับสมการ (2.15) จะได้

$$T(x) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{L} \quad (2.18a)$$

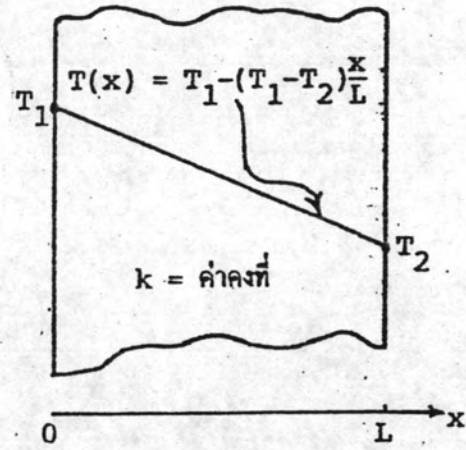
$$Q = -Ak \frac{dT(x)}{dx} \quad (2.18b)$$

$$= \frac{Ak(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.18b)$$

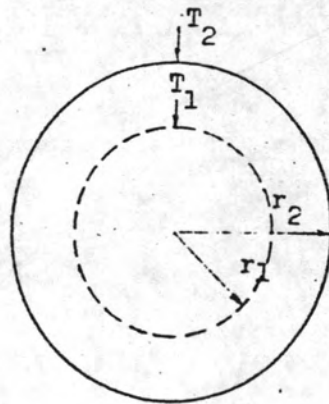
### 2.2.1.2 การนำความร้อนผ่านทรงกระบอก

การนำความร้อนผ่านทรงกระบอก คือ การนำความร้อนใน 1 มิติตามแนวรัศมีในพิกัดทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.12 สมการ (2.14) จะกลายเป็น (พิจารณาสภาวะคงที่)

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r \frac{dT(r)}{dr} \right] = 0 \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.11 การนำความร้อนผ่านผนัง



รูปที่ 2.12 การนำความร้อนผ่านทรงกระบอก

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.20)$$

เงื่อนไขขอบเขต  $T(r) = T_1$  ที่  $r = r_1$  (2.21a)

$$T(r) = T_2 \quad \text{ที่ } r = r_2 \quad (2.21b)$$

$T(r)$  สอดคล้องกับสมการ (2.21) ดังนั้น

$$T(r) = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln r_1/r_2} \ln r + T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln r_1/r_2} \quad (2.22)$$

$$Q = -kA \frac{dT(r)}{dr}, \quad A = 2\pi rL \quad (2.23)$$

$$Q = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln r_1/r_2} \quad (2.24)$$

### 2.2.2 การพาความร้อน (1, 3)

การพาความร้อน เป็นวิธีการถ่ายโอนความร้อนที่อาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุแข็งหรือภายในท่อ เมื่ออุณหภูมิของของไหลและพื้นผิวของของแข็งแตกต่างกัน การถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหล และพื้นผิวของของแข็งจะเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลสัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง ในการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนระหว่างพื้นผิวซึ่งมีอุณหภูมิ  $T_w$  และของไหลบนพื้นผิวซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $T_m$  เราจึงนิยามสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน  $h$  ว่า

$$q = h(T_m - T_w) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $q$  เป็นฟังก์ชันความร้อน

การเคลื่อนที่ของของไหลมีบทบาทสำคัญต่อการถ่ายโอนความร้อนโดยการพา ดังนั้นในการที่จะหาสนามอุณหภูมิในของไหลเราจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการกระจายความเร็วในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาความร้อนซึ่งของไหลไหลภายในท่อแบบกระแสธาร (Laminar flow) เท่านั้น

### 2.2.2.1 การกระจายความเร็ว

รูปที่ 2.13 ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ  $u_0$  ที่จุดแรกเข้าในท่อ เมื่อเข้ามาในท่อแล้วความหนืดทำให้ความเร็วที่ติดกับผนังท่อลดลงเป็นศูนย์ ในขณะ que เพิ่มขึ้นมากกว่า  $u_0$  ในบริเวณส่วนกลาง ดังนั้นชั้นความเร็ว (velocity layer) จะเริ่มก่อตัวตามแนวพื้นผิวผนังจนกระทั่งถึงจุดกลางท่อบริเวณ จากจุดเข้าที่ปากท่อจนถึงจุดกลางท่อดังกล่าวเรียกว่า hydrodynamic entry length ซึ่งในช่วงบริเวณดังกล่าวความเร็วจะเปลี่ยนแปลงทั้งในแนวรัศมี และแนวแกน บริเวณที่ตัดจากบริเวณดังกล่าว เราเรียกว่าเป็นบริเวณที่ความเร็ว พัฒนาเต็มที่แล้ว (fully developed velocity) ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.13

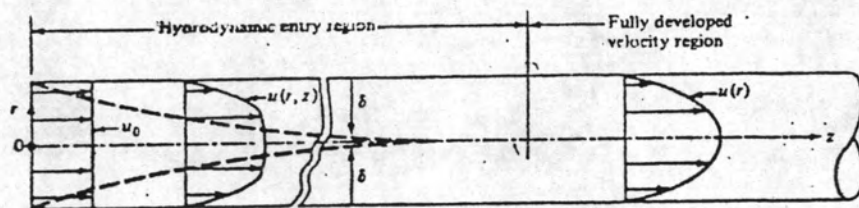
เนื่องจากการไหลในท่อกลมเป็นการไหลแบบสมมาตรรอบแกน (axisymmetric) เราจึงใช้พิกัดทรงกระบอกดังรูปที่ 2.14 เราจะสร้างทรงกระบอกเล็ก ๆ หนา  $dr$  ยาว  $dz$  หุ้มชั้นของของไหล ต่อไปเราจะพยายามหาผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อทรงกระบอกอันนี้ในแนวแกน  $z$  แรงนี้ประกอบด้วยแรงจากความดันด้านซ้ายและขวาของทรงกระบอก และแรงสัมผัส (แรงเฉือน) ที่ผิวด้านในและด้านนอกของทรงกระบอก

ถ้าความดันที่กึ่งกลางของทรงกระบอกคือ  $P$  แรงกระทำที่ด้านซ้ายมือคือ

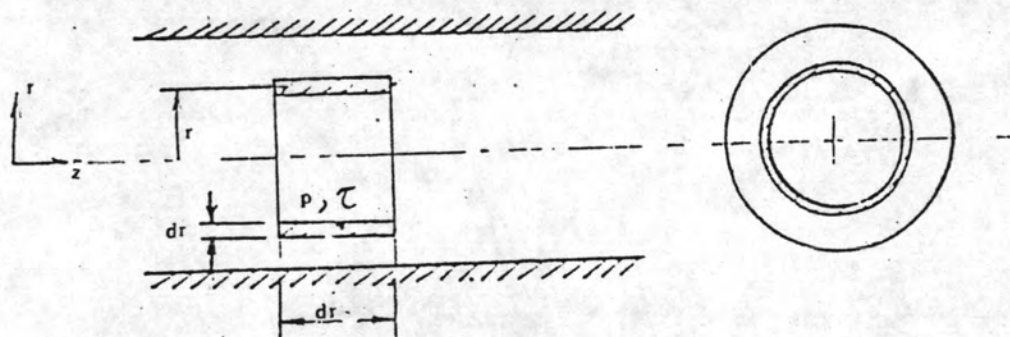
$$\left( p - \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) 2\pi r dr \quad (2.26a)$$

แรงกระทำด้านขวามือคือ

$$\left( p + \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) 2\pi r dr \quad (2.26b)$$



รูปที่ 2.13 การไหลแบบกระแสน้ำภายในท่อกลม



รูปที่ 2.14 ทรงกระบอกเล็ก ๆ หนา  $dr$  ยาว  $dz$  หุ้มชั้นของไหล

ถ้าความเค้นเฉือนที่กึ่งกลางขอบทรงกระบอกคือ  $\tau_{rz}$  แรงเฉือนด้านในของผิวทรงกระบอกคือ

$$-(\tau_{rz} - \frac{d\tau_{rz}}{dr} \frac{dr}{2})(r - \frac{dr}{2}) 2\pi dz \quad (2.27a)$$

แรงเฉือนด้านนอกของผิวทรงกระบอกได้แก่

$$(\tau_{rz} + \frac{d\tau_{rz}}{dr} \frac{dr}{2})(r + \frac{dr}{2}) 2\pi dz \quad (2.27b)$$

เมื่อรวมแรงในแนวแกน  $z$  เข้าด้วยกัน ผลลัพธ์ต้องเป็นศูนย์ เพราะชั้นของความเร็วบริเวณพัฒนาเต็มที่แล้วไม่มีความเร่ง เราจะได้สมการใหม่ จากการรวมของสมการ (2.26) และ (2.27) ดังนี้

$$-\frac{\partial p}{\partial z} 2\pi r dr dz + \tau 2\pi dr dz + r 2\pi \frac{d\tau}{dr} dr dz = 0$$

เมื่อหารสมการนี้ด้วย  $2\pi r dr dz$  ตลอดจะได้

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\tau}{r} + \frac{d\tau}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tau)}{dr} \quad (2.28)$$

เนื่องจาก  $\tau = \mu \frac{du}{dr}$  เป็นฟังก์ชันของ  $r$  อย่างเดียว เราสรุปได้ว่าสมการ (2.28) ใช้ได้กับทุก ๆ ค่าของ  $r$  และ  $z$  ก็ต่อเมื่อแต่ละข้างของสมการเท่ากับค่าคงที่ นั่นคือสมการ (2.28) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tau)}{dr} = \text{Constant} \quad (2.29)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.29) จะได้

$$\tau = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{C_1}{r}$$

$$\text{แต่ } \tau = \mu \frac{du}{dr}$$

$$\text{ดังนั้น } \mu \frac{du}{dr} = \frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{C_1}{r}$$

$$u = \frac{r^2}{4} \frac{\partial p}{\partial z} + C_1 \frac{\ln r}{\mu} + C_2 \quad (2.30)$$

เพื่อหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  เราใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ว่า  $u = 0$  ที่  $r = R$  และเงื่อนไขที่ว่า ที่  $r = 0$  ความเร็ว  $u$  ต้องหาค่าได้ทำให้  $C_1 = 0$

จากสมการ (2.30) ดังนั้น

$$u = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \left[ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \quad (2.31)$$

ความเร็วของการไหลเฉลี่ย  $u_m$  ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อหาได้จากค่าจำกัดความว่า

$$u_m = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r u(r) dr = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.32)$$

$$u = 2u_m \left[ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \quad (2.33)$$

#### 2.2.2.2 การกระจายอุณหภูมิ

##### ก. อุณหภูมิไร้มิติ

พิจารณาการไหลแบบกระแสรายภายในท่อ ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม และมีฟังก์ชันความร้อนสม่ำเสมอที่ผนัง อุณหภูมิไร้มิตินิยามว่า



$$\theta(r, z) = \frac{T(r, z) - T_w(z)}{T_m(z) - T_w(z)} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $T(r, z)$  = เป็นอุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งในของไหล  
 $T_w(z)$  = เป็นอุณหภูมิของผนัง  
 $T_m(z)$  = เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ

จะเห็น  $\theta(r, z)$  มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ผนัง และมีค่าหนึ่งที่จุดกลางท่อ ดังนั้นเราจะเห็นภาพแล้วว่าการพัฒนาชั้นความร้อน (boundary layer) ตามแนวผนังจะเกิดขึ้น อุณหภูมิไร้มิติ  $\theta(r, z)$  ในการไหลจะแปรเปลี่ยนต่อไปทั้งในแนวรัศมีและแนวแกน จนกระทั่งความหนาของชั้นความร้อนถึงจุดกลางท่อ บริเวณจากปากท่อถึงจุดที่ความหนาของชั้นความร้อนถึงจุดกลางท่อมีชื่อเรียกว่า Thermal entry length ถัดจากบริเวณดังกล่าวอุณหภูมิไร้มิติจะไม่ขึ้นกับระยะทาง  $z$  เรียกว่าเป็นบริเวณที่อุณหภูมิพัฒนาเต็มที่แล้ว (fully developed temperature profile) จึงเป็นฟังก์ชันของ  $r$  เท่านั้นคือ

$$\theta(r) = \frac{T(r, z) - T_w(z)}{T_m(z) - T_w(z)} \quad (2.35)$$

เนื่องจาก  $\theta(r)$  ไม่ขึ้นกับค่า  $z$  สมการ (2.35) ดิฟเฟอเรนทิเอทเทียบกับ  $z$  และใช้สภาวะฟลักซ์ความร้อนคงตัวที่ผิวผนังท่อ เราพบว่า

$$\frac{\partial \theta(r)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{T(r, z) - T_w(z)}{T_m(z) - T_w(z)} \right] = 0$$

$$\text{จะได้ } \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = \frac{\partial T_m(z)}{\partial z} = \frac{\partial T_w(z)}{\partial z} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.36)$$

#### ข. สมการพลังงาน

การกระจายอุณหภูมิในสนามการไหลถูกควบคุมโดยสมการพลังงาน ซึ่งสามารถหาได้จากเขียนดุลยภาพพลังงานสำหรับปริมาตรดิฟเฟอเรนเชียล  $rdrdzd\theta$

ดังรูปที่ 2.15 คุณภาพของพลังงานบนปริมาตรดิฟเฟอเรนเชียลดังกล่าว เมื่อคิดว่าการสลายตัวของพลังงานเนื่องจากความหนืดมีค่าน้อย และท่อวางอยู่ในแนวระดับ เขียนได้ดังนี้

$$\left( \begin{array}{l} \text{อัตราการเพิ่มความร้อนโดยการนำ} \\ \text{เข้าสู่ปริมาตรดิฟเฟอเรนเชียล} \end{array} \right)_I = \left( \begin{array}{l} \text{อัตราการเพิ่มของพลังงานที่กักเก็บ} \\ \text{ในปริมาตรดิฟเฟอเรนเชียล} \end{array} \right)_{II}$$

(2.37)

ความร้อนที่เพิ่มโดยการนำ

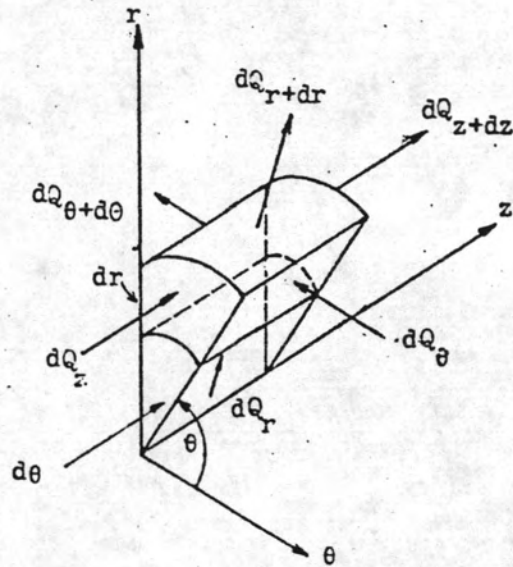
ถ้าให้  $-k\frac{\partial T}{\partial r}$  และ  $-k\frac{\partial T}{\partial z}$  เป็นฟลักซ์ความร้อนในแนวแกน  $r$  และ  $z$  ตามลำดับ อัตราการเพิ่มความร้อนเข้าสู่ปริมาตร  $rdrdzd\theta$  คือ (ในแนว  $\theta$  มีค่าเป็นศูนย์เพราะสมมาตร)

$$I = k \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] drdzd\theta \quad (2.38)$$

อัตราการเพิ่มพลังงานกักเก็บ

พลังงานที่อยู่ในของไหลประกอบด้วยพลังงานภายในจำเพาะ (specific internal energy,  $e$ ) ต่อหนึ่งหน่วยมวล และพลังงานจลน์ ซึ่งมีค่า  $\frac{1}{2} \rho u^2$  ต่อหนึ่งหน่วยมวล ดังนั้นพลังงานภายในของของไหลปริมาตรดิฟเฟอเรนเชียล  $rdrdzd\theta$  คือ  $\rho \left( e + \frac{1}{2} u^2 \right) rdrdzd\theta$  อัตราการเพิ่มพลังงานกักเก็บหาได้โดยดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา

$$II = \frac{d}{dt} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} u^2 \right) rdrdzd\theta \right] \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.15 การนำความร้อนใน cylindrical coordinates

$$= \rho C_p \frac{dT}{dt} r dr dz d\theta ; \frac{de}{dt} \approx C_p \frac{dT}{dt}; C_p = \text{ความจุความร้อนจำเพาะ}$$

$$= \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial T}{\partial r} \frac{dr}{dt} \right) r dr dz d\theta$$

$$\text{II} = \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial z} r dr dz d\theta \quad (2.40)$$

สมการ (2.38) เท่ากับสมการ (2.40) ดังนั้น

$$\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial z} r dr dz d\theta = K \left[ \frac{\partial (r \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] r dr dz d\theta$$

หารด้วย  $r dr dz d\theta$  ตลอด

$$\frac{1}{\alpha} u r \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.36) แทนลงในสมการ (2.41) และได้

$$\frac{1}{\alpha} u \frac{\partial T_m(z)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.42)$$

เมื่อแทนค่าความเร็ว  $u$  จากสมการ (2.33) ลงในสมการ (2.42) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = A r \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.43)$$

$$A = \frac{2v_m}{\alpha} \frac{\partial T_m(z)}{\partial z}$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการ (2.43) คือ

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad r = 0$$

$$T = T_w(z) \quad \text{เมื่อ} \quad r = R$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.43) และใช้เงื่อนไขขอบเขตจะได้

$$T(r,z) - T_w(z) = -AR^2 \left[ \frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{r}{R}\right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \quad (2.44)$$

อุณหภูมิเฉลี่ย  $T_m(z)$  ตลอดพื้นที่หน้าตัดหาได้จาก

$$T_m(z) - T_w(z) = \frac{\int_0^R 2\pi r u [T(r,z) - T_w(z)] dr}{\int_0^R 2\pi r u dr}$$

$$T_m(z) - T_w(z) = -\frac{11}{48} \frac{AR^2}{2} \quad (2.45)$$

### 2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (8.6)

ในการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมีต้องอาศัยตัวกลาง ดังเช่นในการนำและการพา การแผ่รังสีความร้อนเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสีจะอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นได้ดังนี้ คือ ในการแผ่รังสีวัตถุจะเปลี่ยนพลังงานส่วนหนึ่งของตัวเอง (internal energy) ไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งก็เป็นพลังงานรูปหนึ่ง เมื่อคลื่นเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุอื่น พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเหล่านี้จะถูกดูดกลืนไว้แล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน วัตถุที่แผ่รังสีจะสูญเสียพลังงานของตัวเองไป ถ้าไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งอื่น อุณหภูมิของมันจะลดลง อุณหภูมิของมันจะคงที่ก็ต่อเมื่อ อัตราการสูญเสียความร้อนและการรับความร้อนมีค่าเท่ากัน

วัตถุทั้งหมดจะแผ่รังสีออกมาตลอดเวลา แต่มนุษย์เราจะรู้สึกหรือรับรังสีได้เฉพาะรังสีที่แผ่ออกมานั้นมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร รังสีที่แผ่ออกมาและมีความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดความร้อนในวัตถุที่ได้รับรังสีและถ้ามีความยาวคลื่นระหว่าง 0.38 ถึง 0.76 ไมโครเมตร จะมีผล

ต่อประสาทในรูปของแสง ดัง รูปที่ 2.16

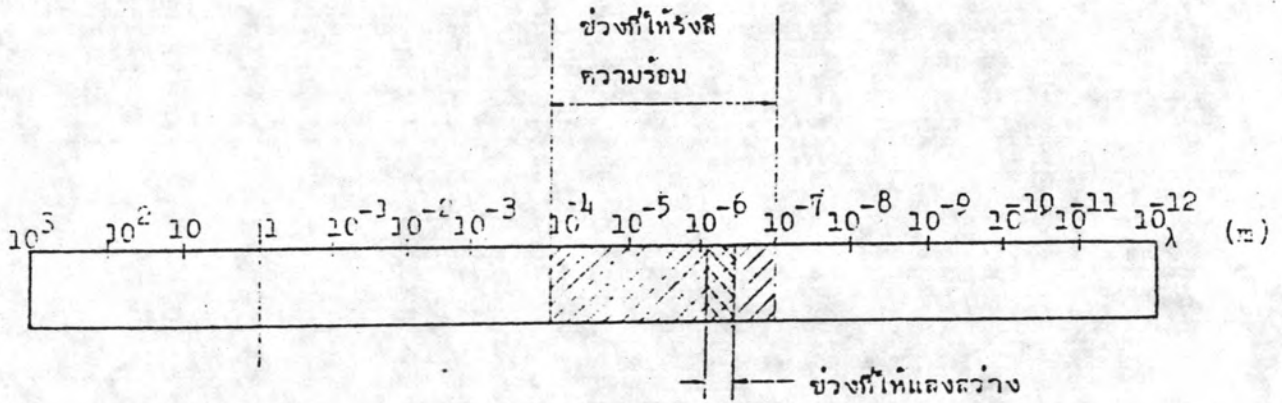
### 2.3 การรับพลังงานแสงอาทิตย์ (2)

การนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ จำเป็นต้องมีตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะทั่วไปของตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียกกันทั่วไปว่าแผ่นรับแสงอาทิตย์ (flat-plate collector) อุณหภูมิของของเหลวในแผ่นรับแสงจะสูงกว่าอุณหภูมิปรกติไม่มากนัก ถ้าต้องการให้มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ ต้องอาศัยตัวรวมแสง (concentration collector) มาช่วย

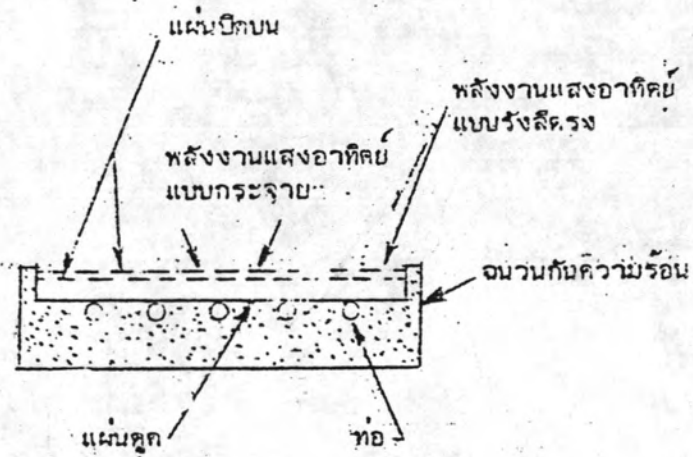
#### 2.3.1 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่น (flat-plate collector)

ส่วนสำคัญของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นคือ แผ่นดูดกลืนพลังงาน (absorbing plate) ทำหน้าที่รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลที่ไหลผ่านแผ่นดูดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ด้านบนของแผ่นดูดปิดด้วยวัสดุโปร่งใส เช่น แก้ว หรือพลาสติกใส เพื่อกันพลังงานความร้อนไม่ให้ไหลจากแผ่นดูดสู่ภายนอก แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นรับได้ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย สามารถเพิ่มอุณหภูมิของไหลได้ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  เหนืออุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อม

แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นมีลักษณะดังรูปที่ 2.17 เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านวัสดุโปร่งใสซึ่งปิดอยู่ด้านบนลงสู่ส่วนล่าง ส่วนนี้ทำด้วยวัสดุมีค่าการนำความร้อนสูง เช่น โลหะและเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการดูดกลืนพลังงาน จึงทำด้วยสีดำ ความร้อนจากแผ่นดูดกลืนจะถ่ายเทให้ของไหล เช่น น้ำหรืออากาศที่อยู่ในท่อ เพื่อลดอัตราการสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนสู่ภายนอก ด้านข้างและด้านล่างบุไว้ด้วยฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่น

### 2.3.2 แผงรับแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (foculing collector)

แผงรับแสงอาทิตย์แบบรวมแสงประกอบด้วยสามส่วนที่สำคัญคือ คอนเซนเทรเตอร์ (concentrator) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รวมแสงอาทิตย์เข้าด้วยกัน ให้มีความเข้มสูงที่รีซีฟเวอร์ (receiver) เป็นส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์ เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน เช่น น้ำร้อน และชุดขับเคลื่อน (driving unit) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้คอนเซนเทรเตอร์หมุนติดตามดวงอาทิตย์

แผงรับแสงอาทิตย์แบบรวมแสงจะรับและนำมาใช้ประโยชน์ได้เฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์แบบรังสีตรง และในทางปฏิบัติลักษณะการทำงานจะยุ่งยากกว่าแบบแผ่นกล่าวคือตัวรวมแสงต้องหมุนเคลื่อนติดตามดวงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อดีคือสามารถเพิ่มปริมาณความร้อน อุณหภูมิ และประสิทธิภาพทางความร้อน โดยการลดพื้นที่สูญเสียความร้อนเทียบกับพื้นที่รับแสง

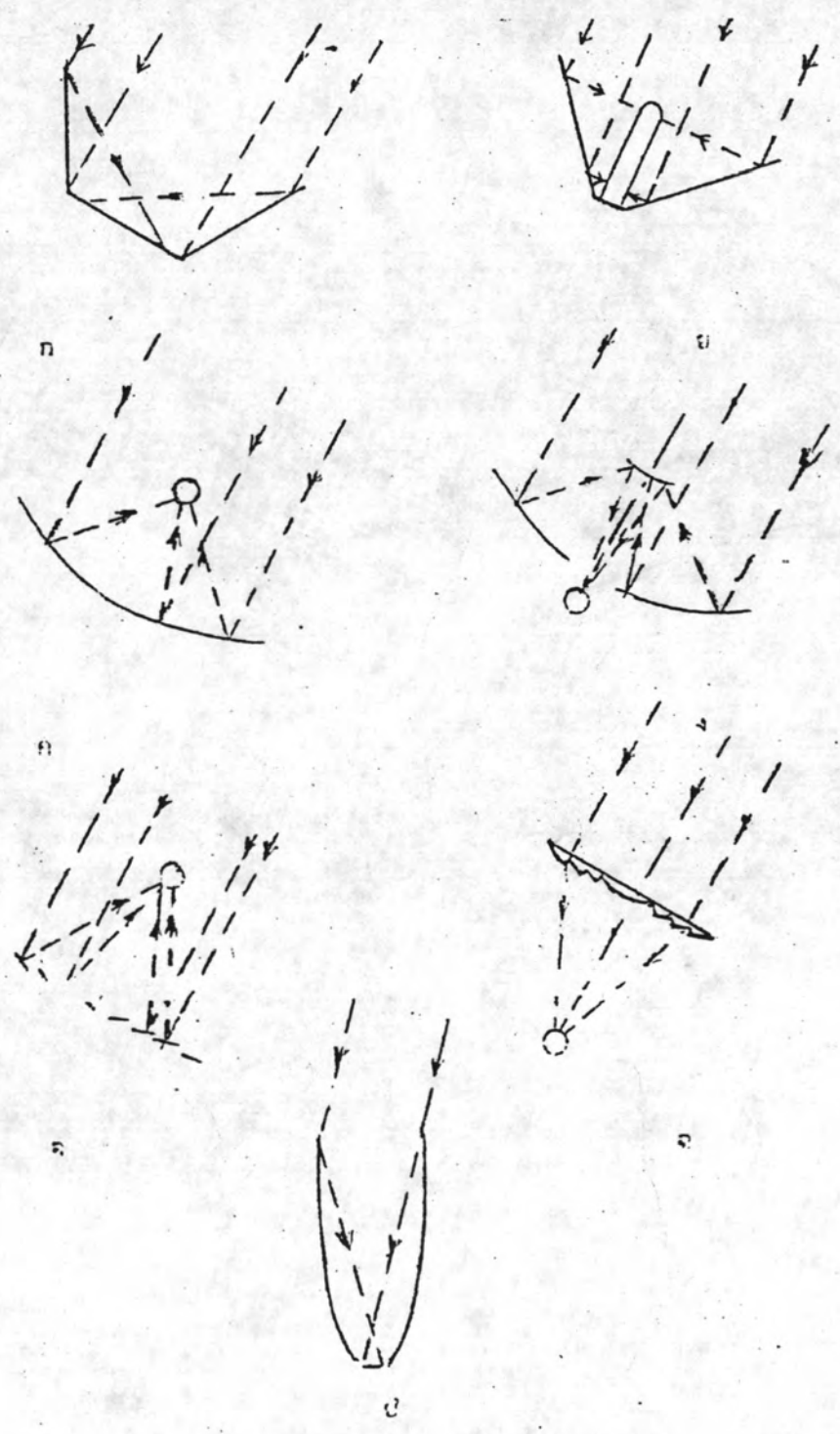
แผงรับแสงอาทิตย์แบบรวมแสงอาจแบ่งได้เป็นสามชนิดตามลักษณะการทำงานของคอนเซนเทรเตอร์ คือ ชนิดหักเหแสง ชนิดสะท้อนและรวมแสง และชนิดสุดท้าย ชนิดสะท้อนและรวมแสงอยู่กับที่ มีลักษณะดังรูปที่ 2.18 แต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

ชนิดหักเหแสง (Refractive Collector Optics) คอนเซนเทรเตอร์ทำด้วยวัสดุโปร่งใส เช่น แก้ว พลาสติกใส รูปร่างของคอนเซนเทรเตอร์ต้องมีลักษณะที่เมื่อแสงอาทิตย์ตกลงบนคอนเซนเทรเตอร์ แล้วหักเหไปรวมกันที่รีซีฟเวอร์ ดังรูปที่ 2.18 ฉ คอนเซนเทรเตอร์มีหลายแบบ เช่น เส้นขนานซึ่งรวมแสงได้ดี เฟรลเนลเลนซ์ขึ้นรูปให้ผิวหน้ามีภาคตัดขวางคล้ายฟันเลื่อย ชนิดนี้โฟกัสไม่ดีแต่เบาและถูกกว่าเส้นขนานซึ่งนิยมใช้กันมากกว่า

ชนิดสะท้อนแสงและรวมแสง (Mirror Collector Optics) คอนเซนเทรเตอร์ทำด้วยวัสดุที่มีผิวหน้าสะท้อนแสง เช่น โลหะผิวขัดมัน กระจกเงา เป็นต้น รูปหน้าตัดทำเป็นรูปโค้ง เช่น โค้งครึ่งทรงกลม พาราโบลา เป็นต้น แสงสะท้อนจากคอนเซนเทรเตอร์ไปรวมกันที่รีซีฟเวอร์ ดังรูปที่ 2.18 ก ข ค ง และ จ



ชนิดสะท้อนแสงและรวมแสงอยู่กับที่ (Fixed Mirror Collector)  
 ชนิดนี้คอนเซนเทรเตอร์และรีซีฟเวอร์ติดตัวอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.18 ข



รูปที่ 2.18 คอนเซนเทรเตอร์ชนิดต่าง ๆ