

## บทที่ 2

# การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ และการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์

### 2.1 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์คือทรงกลมขนาดใหญ่ของก๊าซร้อนที่เข้มข้น ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน (Hydrogen) 75 %, ฮีเลียม (Helium) 23 %, และอื่น ๆ อีก 2 % โดยมวล ซึ่งสัดส่วนนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ตามกาลเวลาอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันทางนิวเคลียร์ที่แกนของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 15-19 ล้านเคลวิน โดยอะตอมของไฮโดรเจนจะหลอมรวมตัวกันเพื่อสร้างฮีเลียม แล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสีซึ่งประกอบด้วยแสงและความร้อนออกสู่อวกาศ บริเวณผิวนอกของดวงอาทิตย์หรือที่เรียกว่า “โฟโตสเฟียร์” (Photosphere) จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของวัตถุดำที่ 6000 K นั่นหมายความว่า เมื่อเรามองจากพื้นโลก การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีลักษณะคล้ายกับการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 6000 K (รูปที่ 2-1) ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ คุณสมบัติของวัตถุดำจึงถูกนำมากล่าวถึงในจุดนี้

#### 2.1.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ

วัตถุดำสามารถดูดกลืนและปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยประสิทธิภาพ 100 % ในทุกย่านความถี่ การกระจายของความยาวคลื่นในรังสีที่ออกมาจากวัตถุดำในทางทฤษฎีสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของพลังค์ (Planck's equation) ซึ่งสมการของพลังค์อธิบายว่า ความสว่างของวัตถุดำขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (หรือความถี่) และอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2-1)

$$S(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2-1)$$

เมื่อ

$$S(\lambda) = \text{การแผ่รังสีสเปกตรัม [W/m}^2]$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่น [m]}$$

$$h = \text{ค่าคงที่ของพลังค์ [6.66 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2]$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]}$$

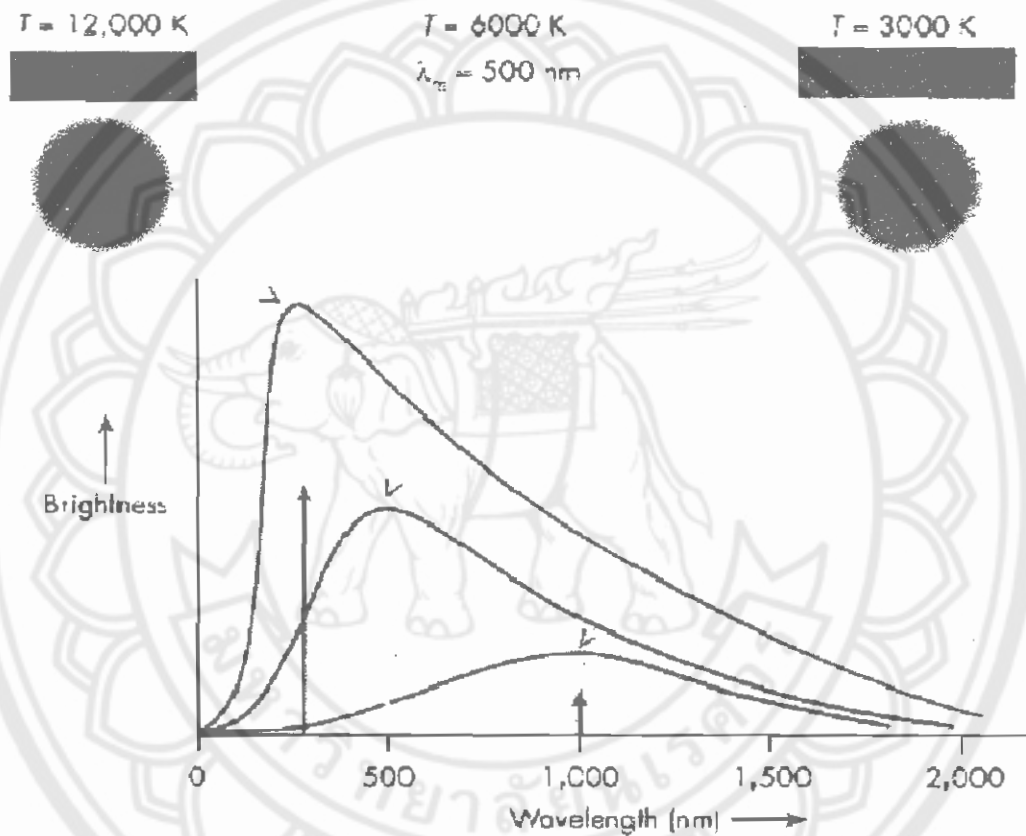
$$c = \text{ความเร็วของแสง [3 \times 10^8 \text{ m/s}^2]$$

$$k = \text{ค่าคงที่โบลทซ์มันน์} [1.38 \times 10^{-23} \text{ W}\cdot\text{s/K}]$$

$$c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 = 3.74 \times 10^{-15} \text{ W}\cdot\text{m}^2$$

$$c_2 = c \cdot h / k = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$$

เมื่อทำการวาดกราฟระหว่างความเข้มแสง (ความสว่าง) กับความยาวคลื่น (รูปที่ 2-1) กราฟที่ได้จะมียอดอยู่ที่ค่าของความยาวคลื่นค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หมายความว่าถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดจุดยอดของกราฟจะมีค่าน้อยลง แต่ความเข้มแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกความยาวคลื่น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2-1 การกระจายของการแผ่รังสีจากวัตถุดำ (ที่มา: <http://zebu.uoregon.edu>)

ผลที่ได้ตามมาจากสมการของแพลงค์ คือกฎของวีน (Wien's Law) ซึ่งวีนค้นพบว่า พลังงานของรังสีที่แผ่ออกมาต่อช่วงความยาวคลื่น (ความสว่าง) จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนค่าหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุด ณ จุดนี้จะเลื่อนไปหาความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ดังสมการที่ (2-2)

$$\lambda_{\max} = \frac{3000}{T} \quad (2-2)$$

เมื่อ  $\lambda_{\max}$  = ค่าความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดพลังงานสูงสุด [mm]  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำจะสามารถคำนวณได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann)

$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (2-3)$$

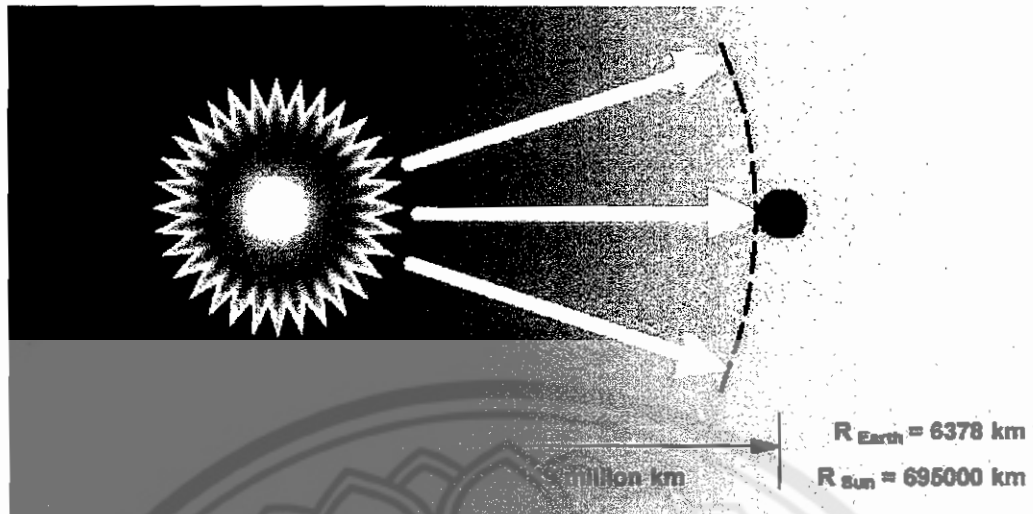
เมื่อ  $\dot{q}$  = ค่าความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\sigma$  = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ [ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]

ความเข้มของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ถูกวัดในหน่วยของวัตต์ (Watt: W) หรือกิโลวัตต์ (Kilowatt: kW) คือตารางเมตร ( $\text{W}/\text{m}^2$ ,  $\text{kW}/\text{m}^2$ ) พลังงานของการแผ่รังสีซึ่งเป็นปริพันธ์ของกำลังในช่วงเวลาที่แน่นอน จะได้ค่าออกมาเป็นวัตต์-ชั่วโมง (Watt-hour: Wh) หรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง (Kilowatt-hour: kWh) หรือจูล (Joule: J) คือตารางเมตร

### 2.1.2 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ภายนอกชั้นบรรยากาศโลก

ความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากจุดศูนย์กลางจนถึงผิวของดวงอาทิตย์ เส้นแรงการแผ่รังสี (Radiant Flux) ที่พุ่งออกมาจะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของผิวทรงกลม ทำให้ค่าความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมาอ่อนลงตามค่าระยะทางจากดวงอาทิตย์ยกกำลังสอง เนื่องจากระยะทางเฉลี่ยจากดวงอาทิตย์ถึง โลกนั้นมีค่าสูงมาก ทำให้ลำแสงของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ผิวโลกได้รับนั้นค่อนข้างเป็นเส้นขนาน นอกจากนี้ผลที่ได้จากเครื่องวัดบ่งบอกว่า เส้นแรงการแผ่รังสีที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศนั้นมีค่าคงที่ ซึ่งมีชื่อเฉพาะว่า “Solar constant” มีค่าเท่ากับ  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$  ค่านี้บ่งบอกถึงค่าพลังงานเฉลี่ยที่โลกได้รับต่อหนึ่งหน่วยเวลาบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวการแผ่รังสีที่นอกชั้นบรรยากาศของโลก ณ ระยะทางเฉลี่ยของวงโคจรโลก ซึ่งค่า Solar constant นี้จะเปลี่ยนแปลง 2-3 % อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี

เนื่องจากค่าระยะทางของวงโคจรโลก ( $R_{\text{Earth orbit}}$ ) มีค่าไม่คงที่ ดังนั้นค่า Solar constant จึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในรอบปี ( $1300 \text{ W}/\text{m}^2 < S_0 < 1390 \text{ W}/\text{m}^2$ )



รูปที่ 2-2 ภาพแสดงระยะทางเฉลี่ยระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก

### 2.1.3 ความเข้มแสงอาทิตย์บนพื้นผิวของโลก

ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งสอดคล้องกับค่า Solar constant มีชื่อเฉพาะว่า “Extraterrestrial Radiation” เนื่องจากเมื่อแสงตกกระทบบนผิวของกระจก แสงบางส่วนถูกสะท้อน ( $\rho$ ) บางส่วนถูกดูดกลืน ( $\alpha$ ) ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่าน ( $\tau$ ) ซึ่งสอดคล้องตามสมการที่ (2-4)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2-4)$$

ทำนองเดียวกัน ขณะที่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศ รังสีจะถูกทำให้เบี่ยงลงด้วยการสะท้อน การกระจัดกระจาย และการดูดกลืนของชั้นบรรยากาศ

จากเหตุผลดังกล่าวความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่ามากที่สุดที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกในช่วงเวลากลางวันเมื่อท้องฟ้าโปร่งมีค่า  $1000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเรียกว่า “Global radiation” ซึ่งประกอบด้วย Direct radiation, Diffuse radiation และ Albedo radiation (Reflected radiation) Direct radiation แผ่โดยตรงจากดวงอาทิตย์โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ขณะที่ Diffuse radiation คือผลจากการกระจัดกระจายของลำแสงของแสงอาทิตย์ หรือการลดค่าของลำแสงอันเนื่องมาจากอนุภาคในชั้นบรรยากาศ ซึ่งตกกระทบจากทุกทิศทางบนท้องฟ้า ดังนั้นท้องฟ้าจะสว่างเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง เมื่อท้องฟ้าถูกปกคลุมหรือตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่ต่ำกว่าระดับเส้นขอบฟ้า รังสีเฉพาะส่วนที่เป็น Diffuse radiation เท่านั้นที่มาถึงพื้นผิวโลก (ตารางที่ 2-1)

ตารางที่ 2-1 ความเข้มของการแผ่รังสีของสภาพอากาศที่ต่างกัน

สภาพอากาศ	ท้องฟ้าโปร่ง	ท้องฟ้ามีเมฆฉัว	ท้องฟ้ามีเมฆครึ้ม
Global radiation	600-1000 W/m <sup>2</sup>	200-400 W/m <sup>2</sup>	50-140 W/m <sup>2</sup>
สัดส่วนของ Diffuse radiation	10-19 %	20-80 %	80-100 %

เนื่องจากปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแต่ละพื้นที่ มีค่าแตกต่างกันและการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในแต่ละพื้นที่โดยปกติต้องทราบค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในบริเวณนั้น ๆ ดังนั้นการวัดความเข้มแสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งจำเป็น

## 2.2 การวัดความเข้มแสงอาทิตย์

โดยปกติรังสีแสงอาทิตย์ถูกวัดค่าด้วยเครื่อง Pyranometer หรือ Pyrheliometer รูปที่ 2-3 แสดงตัวอย่างของ Pyranometer ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับวัดค่า Global radiation โดยหลักการวัดจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแถบสีดำและแถบสีขาว อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับจะถูกป้องกันจากปัจจัยภายนอกด้วยโคมแก้ว ทำให้ผลจากการวัดไม่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิรอบข้าง เมื่อเครื่องมืออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแถบสีดำและแถบสีขาว ความแตกต่างของอุณหภูมินี้จะถูกตรวจจับโดยเทอร์โมพาย (Thermopile) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ภายในเครื่องมือวัด ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าขนาดเล็ก ท้ายที่สุดแล้ว ตัวประกอบปรับเทียบ (Calibration Factor) จะเปลี่ยนสัญญาณเป็นค่าเส้นแรงพลังงานการแผ่รังสีต่อตารางเมตร หรือค่าความเข้มแสงอาทิตย์นั่นเอง



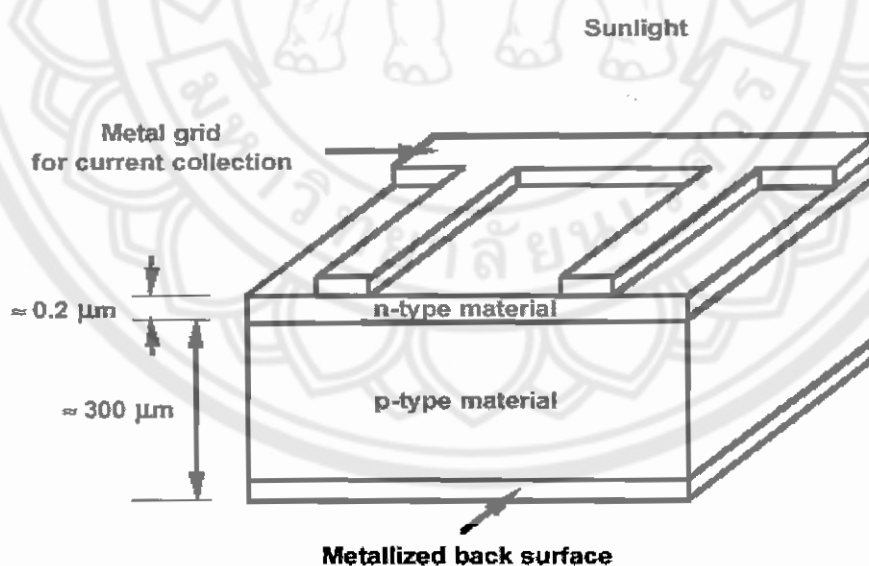
รูปที่ 2-3 ไพราโนมิเตอร์ Model 240-8101 Star Pyranometer (ที่มา: Nova Lynx Corporation)

## 2.3 พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานทางไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าเสียก่อน ซึ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถรับบทบาทที่หลากหลายชนิด โดยผู้ดำเนินโครงการได้เลือกนำมาพิจารณาในที่นี้ 4 ชนิดคือ เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโวลตาอิก ตัวต้านทานไวแสง และเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไปตามลำดับ

### 2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเวเฟอร์ (Wafer) ของซิลิกอนแบบ Monocrystalline หรือ Polycrystalline ที่มีความหนาประมาณ 0.2-0.3 มม. ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งถูกผลิตด้วยการเจืออะตอมของโบรอน (Boron) และของฟอสฟอรัส (Phosphorous) ระหว่างรอยต่อของชั้นพี (p-type ขั้วบวก) และเอ็น (n-type ขั้วลบ) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น (แม้จะไม่มีแสงตกกระทบก็ตาม) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและประจุบวกขึ้น นั่นคืออิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบ และทำให้โฮลไหลไปที่ขั้วบวก ด้วยเหตุนี้ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับภาระ (Load) ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้ (รูปที่ 2-4) [12]



รูปที่ 2-4 โครงสร้างโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.3.2 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

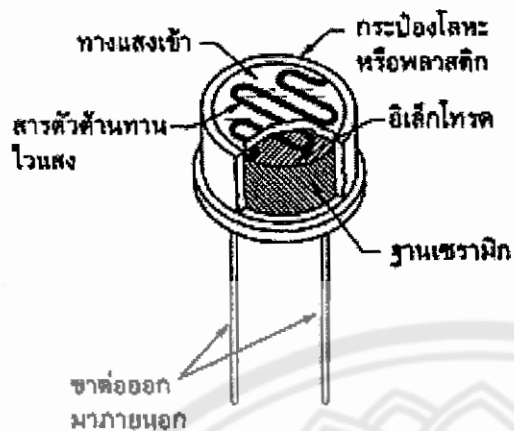
โฟโตไดโอด (รูปที่ 2-5) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวของมันเองเมื่อได้รับพลังงานแสงจากภายนอก [13] โฟโตไดโอดประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์แต่มีลักษณะบางอย่างที่แตกต่างกันคือ การนำโฟโตไดโอดไปใช้งานจะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าในลักษณะไบอัสย้อนกลับ ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อของสารพีเอ็นในโฟโตไดโอดจะมีค่าสูงมากเนื่องจากขอบเขตของดีพลีชันรีเอียนถูกขยายให้กว้างขึ้นจึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโฟโตไดโอดได้ เราสามารถทำให้ค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อพีเอ็นลดลงได้โดยการใช้แสงส่องไประหว่างรอยต่อพีเอ็น พลังงานแสงจะเข้าไปยังเขตของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) และสร้างอิเล็กตรอนอิสระขึ้นมาทำให้ค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อลดลง กระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลผ่านโฟโตไดโอดได้ สภาพการนำไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ถ้าความเข้มของแสงมากจำนวนอิเล็กตรอนอิสระก็จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโฟโตไดโอดได้มากขึ้นตามไปด้วย [14][15]



รูปที่ 2-5 ภาพตัวอย่างของโฟโตไดโอด (ซ้าย) และสัญลักษณ์ (ขวา)

### 2.3.3 ตัวต้านทานไวแสง (LDR)

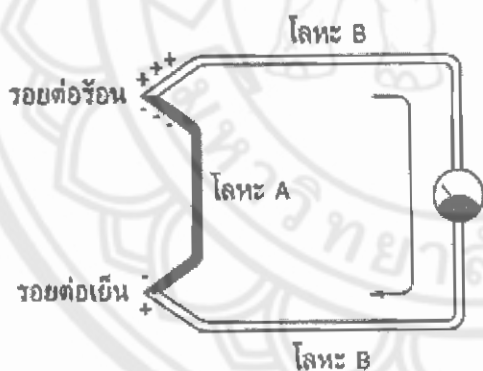
LDR เป็นคำย่อของคำว่า Light Dependent Resistor หรือตัวต้านทานที่แปรค่าได้กับแสง ตัวต้านทานไวแสงส่วนใหญ่จะทำด้วยสารแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) หรือไมก็แคดเมียมซีนิไนด์ (CdSe) ซึ่งทั้งสองตัวนี้เป็นสารประเภทกึ่งตัวนำเอามาฉาบลงบนแผ่นเซรามิกที่ใช้เป็นฐานรองแล้วต่อขาจากสารที่ฉาบไว้ออกมา ตัวต้านทานไวแสงเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับสารที่ฉาบอยู่ ทำให้เกิดการแตกตัวชนกันระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอน การที่มีโฮลกับอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากนี้ทำให้ความต้านทานของตัวต้านทานไวแสงลดลง นั่นหมายความว่ายิ่งความเข้มของแสงที่ตกกระทบมีค่ามากเท่าไร ความต้านทานของตัวต้านทานไวแสงก็ยิ่งลดลงมากเท่านั้น [16]



รูปที่ 2-6 โครงสร้างของตัวต้านทานไวแสง

โครงสร้าง โดยสังเขปของตัวต้านทานไวแสงแสดง ได้ดังรูปที่ 2-6 ส่วนที่ขดเป็นแนวเล็ก ๆ สีดำ ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานไวแสง และแนวสีดำนั้นจะแบ่งพื้นที่ของตัวต้านทานออกเป็น 2 ข้าง ซึ่งถ้าดูของจริงจะเห็นว่า ส่วนที่เป็นสีทองนั้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สัมผัสกับตัวต้านทานไวแสง และเป็นที่สำหรับต่อขาค้อออกมาภายนอก หรือเรียกว่าอิเล็กโทรด (Electrode) ส่วนที่เหลือจะเป็นฐานเซรามิก และอุปกรณ์สำหรับห่อหุ้มตัวต้านทานไวแสง [17]

#### 2.3.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

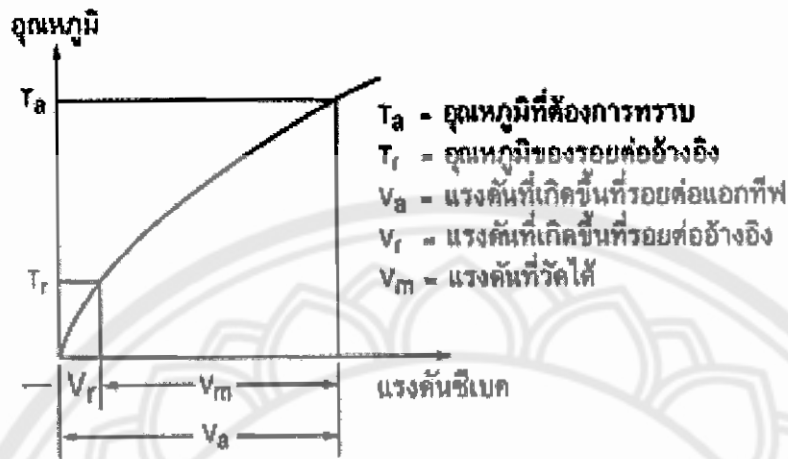


รูปที่ 2-7 วงจรพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล (รูปที่ 2-7) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับวัดอุณหภูมิที่เกิดจากการนำเอาลวดโลหะ 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกันมาเชื่อมปลายด้านหนึ่งเข้าด้วยกันให้มีรอยต่อระหว่างโลหะ 2 ชนิดนี้ 2 แห่งแล้ว ทำให้รอยต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่รอยต่อแต่ละแห่งและมีขั้วตรงข้ามกัน โดยที่แรงดันที่ขั้วรอยต่อร้อนจะสูงกว่าแรงดันที่ขั้วรอยต่อเย็น ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนรอย



ต่อของโลหะนี้มีชื่อเฉพาะเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าซีเบค (Seebeck EMF) ผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย ๆ ไหลภายในวงจร [18]



รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ และแรงดันซีเบค

ในการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะต้องควบคุมอุณหภูมิที่รอยต่อด้านหนึ่งไว้ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ในขณะที่รอยต่ออีกด้านหนึ่งอยู่ในอุณหภูมิที่ต้องการวัด ถ้าต้องการความเที่ยงตรงสูงจะต้องแช่รอยต่อด้านหนึ่งไว้ในกระติกน้ำแข็งที่  $0^{\circ}\text{C}$  แต่หากไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนักก็ปล่อยให้รอยต่อด้านเย็นไว้ที่อุณหภูมิปกติได้ จากนั้นทำการวัดแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลแล้วนำมาหาค่าอุณหภูมิที่แท้จริงจากสมการ (2-5)

$$V_a = V_m + V_r \quad (2-5)$$

เมื่อ

- $V_a$  = แรงดันซีเบคที่เกิดขึ้นที่รอยต่อแอคทีฟ
- $V_m$  = แรงดันที่วัดได้
- $V_r$  = แรงดันซีเบคที่เกิดขึ้นที่รอยต่ออ้างอิง (ในอุณหภูมิกิ่งที่)

## 2.4 ข้อดี-ข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงชนิดต่าง ๆ

### 2.4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells)

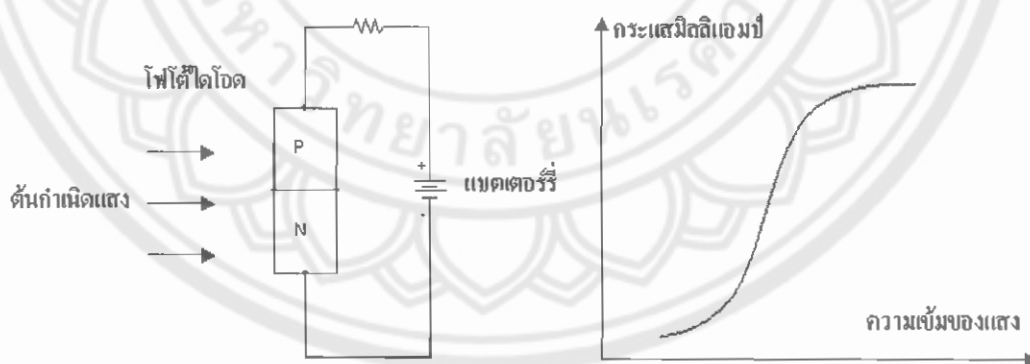
ข้อดี คือค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short-Circuit Current) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแปรผันตรงกับความเข้มของแสงอาทิตย์ นั่นคือหากปริมาณแสงที่ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์มีความเข้มแสงมาก ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังดูแลรักษาง่ายและมีอายุการใช้งานยาวนานคุ้มค่ากับราคา [12]

ข้อเสีย คือเซลล์มีราคาแพง เนื่องจากกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต้องใช้ต้นทุนสูง โดยเฉพาะในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline) ซึ่งเป็นที่นิยม ใช้อยู่ในปัจจุบัน

### 2.4.2 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

ข้อดี คือมีค่ากระแสแปรผันตรงกับความเข้มแสง มีสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่ำและมีผลตอบสนองต่อแสงไว สามารถควบคุมผลตอบสนองต่อความถี่ของแสงและความเร็วในการตอบสนองได้โดยรูปร่างลักษณะ และการเจือสาร (Doping) อีกทั้งยังมีราคาไม่แพง

ข้อเสีย คือมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อแสงต่ำ ดังนั้นการใช้งานของโฟโตไดโอดจึงต้องมีตัวขยายกระแสเพิ่มเติม กระแสไฟฟ้าที่ได้แม้จะเพิ่มขึ้นเป็น สัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสงจนถึงจุด ๆ หนึ่งแล้ว ค่ากระแสที่ได้จะคงที่หรือเรียกว่าถึงจุดอิ่มตัวของกระแส (รูปที่ 2-9) [15]

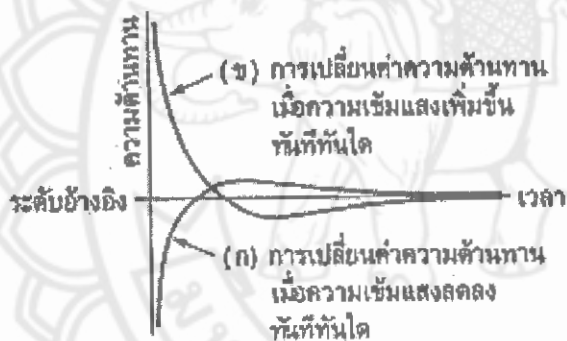


รูปที่ 2-9 วงจร โฟโตไดโอดและกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับความเข้มของแสง

### 2.4.3 ตัวต้านทานไวแสง (LDR)

ข้อดี คือมีราคาถูก และมีขนาดเล็ก ทำให้สะดวกในการนำไปใช้งาน

ข้อเสีย คือมีผลตอบสนองต่อแสงที่ต่ำในช่วงแคบ คือในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 4,000 – 10,000 Å ( $1 \text{ Å} = 1 \text{ อังสตรอม} = 10^{-10} \text{ เมตร}$ ) เมื่อเทียบกับอุปกรณ์รับแสงอื่น ๆ ถ้าตัวต้านทานไวแสงได้รับแสงที่มีความเข้มสูงดังแสดงด้วยเส้น (ก) ในรูปที่ 2-10 ความต้านทานจะมีค่าต่ำ และทันทีที่ความเข้มแสงลดลงเหลือเพียงเท่ากับระดับอ้างอิง ความต้านทานจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความต้านทานที่ควรจะเป็นในระดับอ้างอิง แต่แทนที่จะหยุดอยู่ระดับอ้างอิงกลับเพิ่มขึ้นไปแล้วจึงจะลดลงมาอยู่ในระดับอ้างอิง ในทำนองเดียวกัน ถ้าตัวต้านทานไวแสงอยู่ในที่ที่มีความเข้มแสงน้อย ๆ แล้วเปลี่ยนความเข้มแสงเป็นระดับอ้างอิงทันทีดังแสดงด้วยเส้น (ข) ความต้านทานจะลดลงต่ำลงมาจากระดับอ้างอิงแล้วจึงขึ้นไปใหม่ นอกจากนี้ยังมีความเร็วในการเปลี่ยนระดับความต้านทานจากค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่งช้ามาก โดยปกติจะอยู่ในช่วงของมิลลิวินาที หรืออาจเป็นวินาทีจึงทำให้ตัวต้านทานไวแสงใช้ได้กับงานที่ความถี่ต่ำเท่านั้น [17]



รูปที่ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของตัวต้านทานไวแสงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในทันทีทันใด

### 2.4.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

ข้อดี คือใช้วัดค่าประสิทธิผลของกระแสสลับได้โดยไม่คำนึงถึงรูปสัญญาณ พิสัยความถี่กว้างนั้นคือสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความถี่เท่ากับศูนย์ (กระแสตรง) จนถึงความถี่หลายเมกะเฮิรตซ์ (MHz) มีเสถียรภาพในการทำงานขณะทำการวัดอุณหภูมิค่าสูง ๆ โดยที่วัสดุที่ใช้ประกอบเป็นเทอร์โมคัปเปิลจะยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ หรือไม่เกิดเป็นออกไซด์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอุณหภูมิที่วัด

ข้อเสีย คือเปราะแตกง่าย มีความสามารถกินภาระต่ำ โดยปกติเมื่อภาระเกินมากกว่า 50 % จะทำให้ตัวทำความร้อนหลอมละลาย สเกลไม่เป็นเชิงเส้น คืออุณหภูมิของตัวทำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับกระแสยกกำลังสอง ความไวของเทอร์โมคัปเปิลมีค่าไม่คงที่ คือจะมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างตามช่วงอุณหภูมิที่วัด ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลจึงไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอุณหภูมิอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 2-8) [19]

## 2.5 แนวคิดในการเลือกอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงอาทิตย์

จากการศึกษาข้อมูลในรายละเอียดการทำงานข้อดี และข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ นั้นทำให้กลุ่มโครงการนี้ตัดสินใจเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสง เนื่องจากค่ากระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วงที่กว้าง ดังนั้นหากนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับแสงแล้วค่าที่ได้ย่อมจะให้ความแม่นยำกว่าอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะมีราคาแพงกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็มีอายุการใช้งานนานกว่ามาก

เหตุผลที่ไม่เลือกอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงชนิดอื่น ๆ มีดังนี้ ในกรณีของโฟโตไดโอดนั้นมีข้อเสีย คือให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อความเข้มแสงต่ำและเมื่อเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นแล้วจะทำให้เกิดภาวะอิ่มตัว จึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าให้กระแสมีค่าเท่าไรแน่นอนสำหรับตัวต้านทานไวแสงนั้น มีช่วงการทำงานที่จำเพาะ คือตอบสนองต่อความถี่ของแสงได้ดีในช่วงแคบ และมีความเร็วในการเปลี่ยนระดับความต้านทานจากค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่งช้ามาก ดังนั้นหากนำอุปกรณ์นี้ไปวัดความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแตกต่างกันในช่วงระยะเวลาที่ใกล้กัน อุปกรณ์ชนิดนี้ จะไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่ามากกว่าอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงชนิดอื่น ๆ กรณีของเทอร์โมคัปเปิลนั้นมีความสามารถต่ำในการวัดกินภาระที่เครื่องจะวัดได้ ทำให้มีความเปราะแตกหักง่าย แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าอุณหภูมิอย่างสมบูรณ์

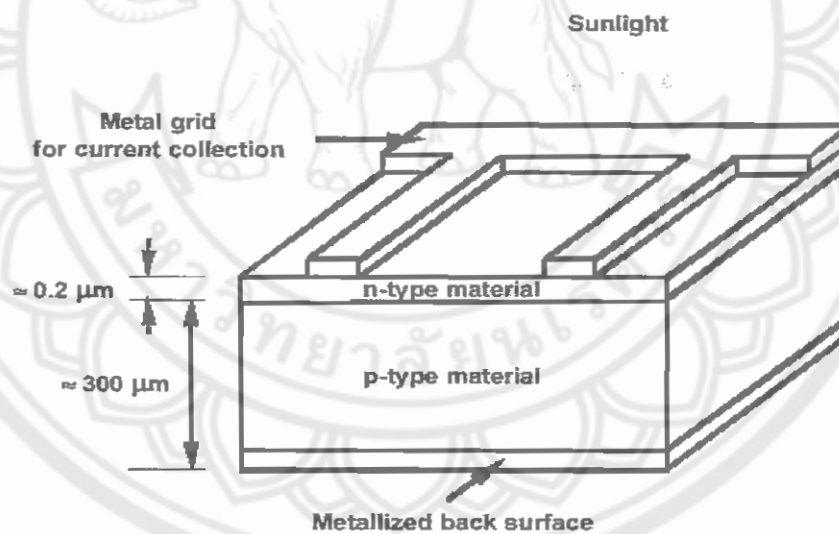
ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้ดำเนินโครงการจึงตัดสินใจเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนแรกของเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ที่ผู้ดำเนินโครงการจะสร้างขึ้น ดังจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3

## 2.6 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.6.1 พื้นฐานของโฟโตโวลตาอิก (Fundamentals of Photovoltaics)

การเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถเป็นจริงได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) คำว่า "Photovoltaic" มักจะถูกเขียนย่อด้วย "PV" พลังงานการแผ่รังสีถูกส่งผ่านโดยตรงไปยังอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก (Photoeffect) ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกระตุ้น

วัสดุพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันคือ ซิลิกอน โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนถูกแสดงอย่างคร่าว ๆ ได้ดังรูปที่ 2-11 เวเฟอร์ซิลิกอนหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากถูกเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ ในขณะที่ด้านหน้าซึ่งเป็นส่วนรับแสงที่จะมาตกกระทบ จะใช้เพียงกริดโลหะ 1 ชั้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติผิวของเซลล์จะถูกเคลือบด้วยสารด้านการสะท้อน (Antireflection Coating) เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดจากการสะท้อนให้เหลือน้อยที่สุด

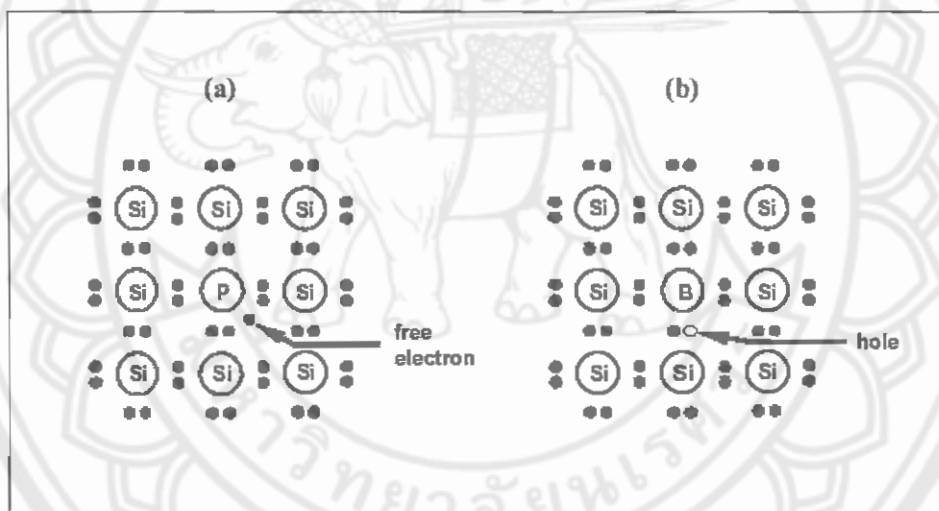


รูปที่ 2-11 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน

## 2.6.2 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะในซิลิกอนที่ถูกรเจือ

### (Charge Transport in the Doped Silicon)

ถ้าพิจารณาการเจือซิลิกอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว (Tetravalent Element) และเป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปใช้งานมากที่สุดรวมถึงการนำไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ การแทนที่อะตอมของซิลิกอน 1 อะตอมด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว (Pentavalent Element) ดังรูปที่ 2-12a เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) หรือ สารหนู (Arsenic: As) 1 อะตอมทำให้เหลืออิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ยึดติดอย่างหลวม ๆ ด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulomb Force) ซึ่งสามารถถูกทำลายด้วยพลังงานประมาณ 0.002 eV ปริมาณอิเล็กตรอน โวลต์ (eV) คือหน่วยของพลังงานซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเมื่อมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1 โวลต์ เนื่องจากธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัวให้อิเล็กตรอนอย่างง่ายดาย จึงถูกเรียกว่า “สารเจือผู้ให้ (Donor)” หลังจากให้อิเล็กตรอนแล้วอะตอมของสารเจือผู้ให้จะมีประจุบวก และเนื่องจากโดยปกติแล้วกระแสที่เกิดขึ้นจะเกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น จึงเรียกดังกล่าวนี้ว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type material)”



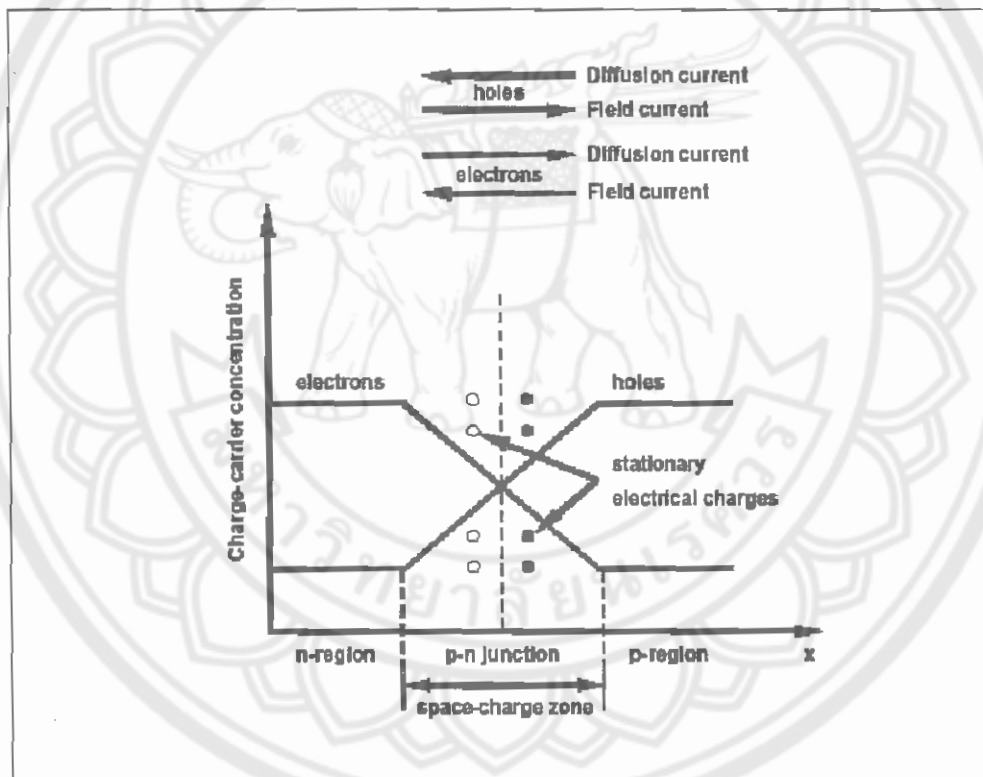
รูปที่ 2-12 การใส่สารเจือลงในซิลิกอน (a) ด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว  
(b) ด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว

ในทางกลับกัน การแทนที่อะตอมของซิลิกอน 1 อะตอมด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว (Trivalent Element) ดังรูปที่ 2-12b เช่น โบรอน (Boron: B) หรือ อลูมิเนียม (Aluminium: Al) หรือ แกลเลียม (Gallium: Ga) 1 อะตอมทำให้ขาดอิเล็กตรอน 1 ตัว หรือพูดได้ว่าเกิดโฮล (Hole) ขึ้น ในขณะนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับโฮลสามารถเข้าไปเติมในช่องว่างดังกล่าวนี้ได้ และทำให้เกิดโฮลที่ตำแหน่งเดิมของมันเป็นลำดับ กระบวนการนี้ก่อให้เกิดการนำกระแสโดยโฮลซึ่งมีประจุบวก ดังนั้นสารนี้จึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type material) และเนื่องจากอะตอมของสารเจือในกรณีนี้รับอิเล็กตรอนอย่างง่ายดาย จึงถูกเรียกว่า “สารเจือผู้รับ (Acceptor)” อะตอมของสารเจือผู้รับ

จะถูกไอออนไนซ์ (Ionized) เป็นประจุลบด้วยการรับอิเล็กตรอน โดยทั่วไปอะตอมของสารเจือผู้ให้ และของสารเจือผู้รับจะถูกไอออนไนซ์แล้วที่อุณหภูมิห้อง

**2.6.3 ผลของรอยต่อพีเอ็น (Effects of p-n junction)**

โดยปกติรอยต่อพีเอ็น ถูกสร้างจากความจริงที่ว่าชั้นชนิดเอ็นเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ด้วยการแพร่เข้าไปของสารเจือผู้ให้ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 850 °C) ในทำนองเดียวกันกับกรณีของ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยต่อพีเอ็นสามารถถูกสร้างได้ด้วยการแพร่เข้าไปของสารเจือชนิดผู้รับ แม้ว่า จะเป็นที่นิยมน้อยกว่าก็ตาม ในบริเวณใกล้ ๆ กับผิวขอบของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพี จะเกิด ปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ ในด้านเอ็น มีอิเล็กตรอนจำนวนมาก ในด้านพีมีโฮลจำนวนมากความแตกต่าง ในด้านปริมาณดังกล่าวนี้ ก่อให้เกิดผลที่ตามมาคือ อิเล็กตรอนจากด้านเอ็นแพร่เข้าไปยังด้านพี และโฮลแพร่จากด้านพีเข้าไปในด้านเอ็น ผลที่ตามมาคือ เกิดกระแสของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ เข้าไปในด้านพี และกระแสจากการแพร่ของโฮลเข้าไปในด้านเอ็น



รูปที่ 2-13 การกระจายประจุพาหะที่รอยต่อพีเอ็น และกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ

การไหลของพาหะประจุลบและบวก ทำให้เกิดการขาดประจุพาหะภายในบริเวณที่เคยเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือ เกิดประจุบวกภายในบริเวณสารเจือผู้ให้ และเกิดประจุลบภายในบริเวณสารเจือผู้รับ ดังนั้นจึงเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นตรงผิวขอบและก่อให้เกิดกระแสจากประจุพาหะทั้งสองชนิด ซึ่งไหลด้านกระแสที่เกิดจากการแพร่ในสภาวะสมดุล ค่าของกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านผิวรอยต่อมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้าชดเชยกระแสที่เกิดจากการแพร่อย่างสมบูรณ์ นั่นคือกระแสโฮลชนิดชดเชยระหว่างกันอย่างสมบูรณ์ และกระแสอิเล็กตรอนก็เช่นกัน ดังรูปที่ 2-13

สนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อนี้ สอดคล้องกับค่าความต่างศักย์  $V_D$  ซึ่งถูกเรียกว่า “กำแพงศักย์ (Potential Barrier)” โดยมีค่าประมาณ 0.8 eV สนามไฟฟ้านี้ทำให้ประจุพาหะที่เป็นผลมาจากแสงที่ตกกระทบเซลล์นั้นแยกออกจากกัน ภายในบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region หรือ Space-Charge Zone) จะไม่มีประจุพาหะอิสระ ซึ่งบริเวณนี้มีค่าความต้านทานสูงมาก

การป้อนแรงดันลบที่ด้านอื่น ซึ่งเรียกว่า ไบอัสตรง (Forward Bias) ทำให้กำแพงศักย์มีค่าลดลง ส่งผลให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าและกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ทำให้ขณะไม่สามารถชดเชยกับกระแสที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้เช่นขณะที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกได้อีกต่อไป ผลที่ตามมาคือ มีกระแสสุทธิที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น ถ้าแรงดันจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปมีค่าเท่ากับค่ากำแพงศักย์ จะไม่มีกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้า และค่ากระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของสารเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม การป้อนแรงดันบวกจากภายนอกเข้าที่ด้านลบ ซึ่งเรียกว่า ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) จะเพิ่มค่าแรงดันของกำแพงศักย์ ทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระแสจากสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า กระแสสุทธิที่มีทิศทางไบอัสย้อนกลับจึงมีค่าน้อยมาก กระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพีเอ็นนำไปสู่สมการไดโอด นั่นคือสมการ (2-6)

$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2-6)$$

โดยที่

$I_D$  = กระแสของไดโอด [A]

$q$  = ค่าประจุของอิเล็กตรอน [ $1.6 \times 10^{-19}$  AS]

$V$  = แรงดันจากภายนอกที่ป้อนเข้าไป [V]

มีค่าเป็นบวกในกรณีไบอัสตรง

และมีค่าเป็นลบในกรณีไบอัสย้อนกลับ

$k$  = ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ [ $8.65 \times 10^{-5}$  eV/K]

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]



ปริมาณ  $I_0$  เรียกว่า “กระแสมืด (Dark Current หรือ Saturated Current)” ของไดโอด ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับไดโอดแต่ละตัว และมีความสำคัญอย่างมากในเรื่องของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.6.4 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ (Physical Processes in Solar Cells)

### 1) การดูดกลืนแสง (Optical Absorption)

ในขณะที่แสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสงบางส่วนถูกสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืน ส่วนที่เหลือสามารถผ่านเซลล์ไปได้ เนื่องจากซิลิกอนมีดัชนีการหักเห (Refractive Index) สูง (มากกว่า 3.5) ทำให้กว่า 30 % ของแสงที่ตกกระทบถูกสะท้อน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมักถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อน ซึ่งโดยปกตินิยมเคลือบเป็นชั้นบาง ๆ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ลดความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนเหลือประมาณ 10 % โดยปกติโฟตอน หรือควอนตัมของแสงทำปฏิกิริยากับสารด้วยการกระตุ้นอิเล็กตรอน กระบวนการที่สำคัญทางด้านพลังงานที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า “การดูดกลืนทางโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Absorption)” ด้วยเหตุนี้ โฟตอนจึงถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์แบบด้วยอิเล็กตรอนวงนอก อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทั้งหมดจากโฟตอนแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะสามารถถูกดูดกลืนก็ต่อเมื่อพลังงานของมันมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap) โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะผ่านทะลุสารกึ่งตัวนำและไม่สามารถก่อให้เกิดการแปลงพลังงาน อย่างไรก็ตามโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานก็จัดเป็นความสูญเสียในด้านการแปลงพลังงาน เนื่องจากพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลึกอย่างรวดเร็ว ในช่วงการทำปฏิกิริยาระหว่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของรังสีแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ในกระบวนการแปลงพลังงาน พลังงานจะสูญเสียประมาณ 60 % เพราะมีโฟตอนจำนวนมากที่มีพลังงานทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

### 2) การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination of Charge Carriers)

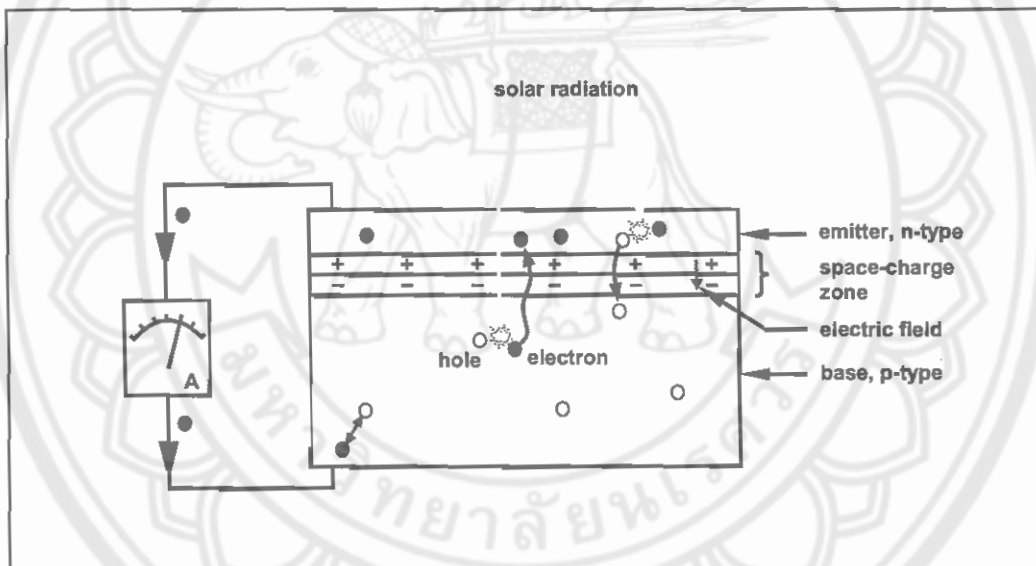
การดูดกลืนแสงก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน ดังนั้นในช่วงที่มีแสงปริมาณของประจุพาหะจึงมีค่ามากกว่าในช่วงเวลาที่มีมืด นั่นคือในขณะที่ไม่มีแสงปริมาณประจุพาหะจะมีค่าเท่ากับในช่วงเวลาที่มีมืด กระบวนการย้อนกลับนี้เรียกว่า “การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination)” และเป็นกระบวนการย้อนกลับจากกระบวนการสร้างประจุพาหะด้วยการดูดกลืนแสง การรวมตัวของประจุพาหะเกิดตามธรรมชาติแม้กระทั่งในกระบวนการสร้างประจุพาหะ ปริมาณของประจุพาหะสุทธิในขณะที่มีแสงจึงเป็นผลที่เกิดจากทั้งสองกระบวนการดังกล่าว

ในช่วงอายุขัย (Lifetime) ของประจุพาหะ ประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ในผลึกได้ในระยะทางที่แน่นอนก่อนที่จะเกิดการรวมตัว ระยะทางเฉลี่ยที่ประจุพาหะจะสามารถเดินทางได้ระหว่างจุด

กำเนิดของประจุกับจุดที่เกิดการรวมตัว เรียกว่า “ระยะทางการแพร่ (Diffusion Length)” ปริมาณนี้มีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร และอายุขัยของประจุพาหะ (ระยะเวลาที่ใช้จนกระทั่งประจุพาหะเกิดการรวมตัว)

### 3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงตกกระทบ

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแสดงไว้โดยสังเขปดังรูปที่ 2-14 อันได้แก่ อิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (n-doped emitter) บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) และ เบสชนิดพี (p-doped base) โฟตอนที่มีพลังงานเพียงพอตกลงบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านทะลุอิมิตเตอร์ และบริเวณปลอดพาหะ แล้วถูกดูดกลืนในเบสชนิดพี ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยภายในเบสชนิดพี จึงถูกเรียกว่า “ประจุพาหะส่วนน้อย” ซึ่งตรงกันข้ามกับโฮลที่เป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ อิเล็กตรอนนี้แพร่เข้าไปในเบสชนิดพีจนกระทั่งถึงขอบของบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะจะเร่งอิเล็กตรอนและพาอิเล็กตรอนไปยังด้านอิมิตเตอร์



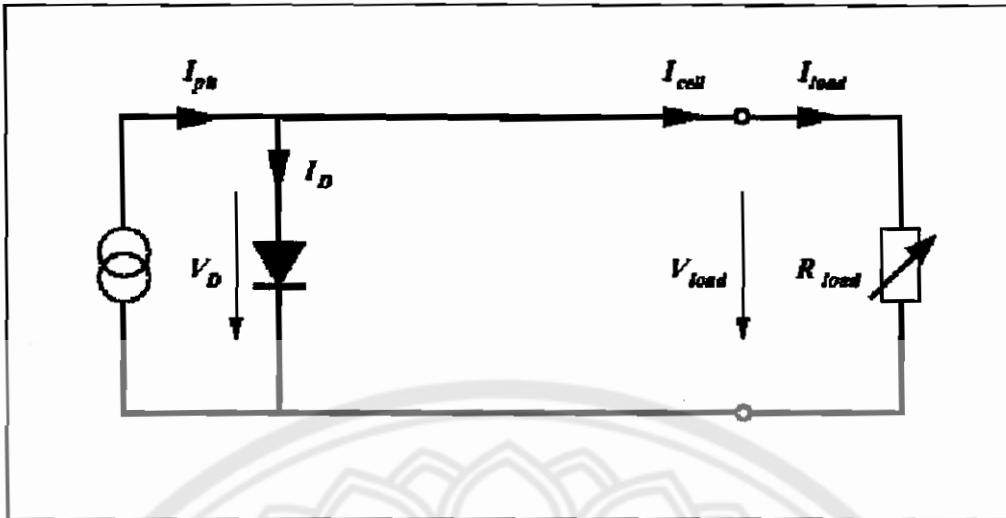
รูปที่ 2-14 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การแยกออกจากกันของประจุพาหะจึงเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าจึงทำงานคล้ายกับเป็นตัวกลางในการแยก แต่ข้อแม้คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนจะค่อนข้างมากเพียงพอให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีที่ระยะทางการแพร่สั้นเกินไป การรวมตัวของประจุพาหะจะเกิดขึ้นก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน การดูดกลืนควอนตัมของแสงในอิมิตเตอร์ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน แต่เนื่องจากโฮลเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณอิมิตเตอร์ชนิดเอ็น ด้วยระยะทางการแพร่ที่มากเพียงพอ ทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะ และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และถูกพาไปยังด้านเบสชนิดพี ถ้าการดูดกลืนควอนตัมของแสงเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกแยกออกจากกันทันทีด้วยสนามไฟฟ้าที่มีในบริเวณนั้นนั่นเอง ผลจากการมีแสงตกกระทบจะได้ว่า ถ้าปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นเพิ่มขึ้น ปริมาณของโฮลทางด้านเบสชนิดพีก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ถ้าอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นและเบสชนิดพีถูกนำมาต่อกันผ่านตัวต้านทาน อิเล็กตรอนจากด้านอิมิตเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทานไปยังเบสแล้วรวมตัวกับโฮลในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตามการไหลของกระแสหมายถึงกำลังไฟฟ้าขาออก การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องครบเท่าที่ยังคงมีแสงตกกระทบเซลล์ ผลก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนทันทีเป็นพลังงานไฟฟ้า

#### 2.6.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

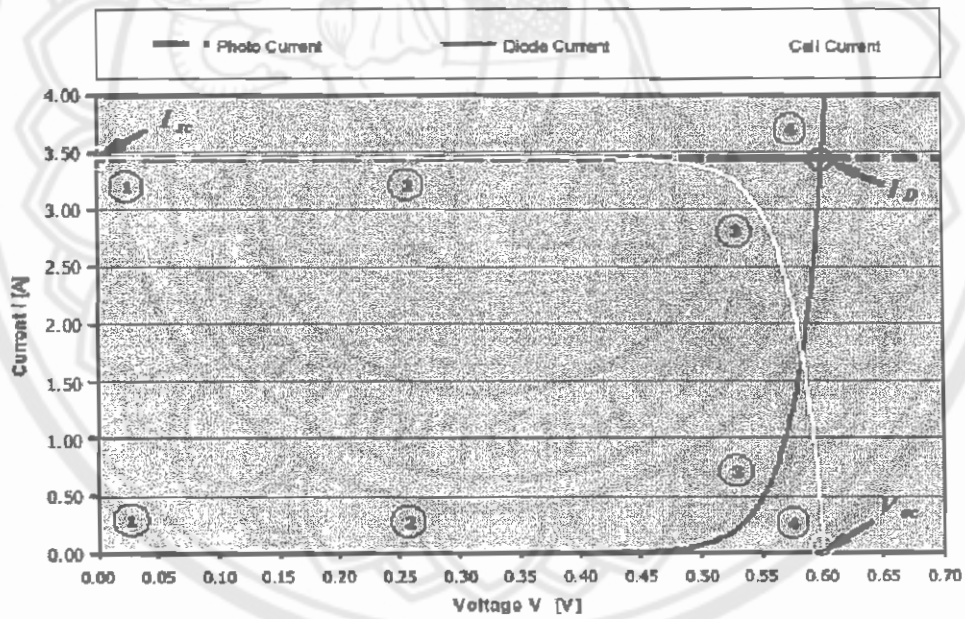
อย่างที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น เซลล์อาทิตย์ที่ถูกแสงจะสร้างประจุพาหะอิสระ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านภาระ (Load) ที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เช่นเดียวกับกระแส Photocurrent ( $I_{ph}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์อาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถถูกแสดงด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 2-15 ซึ่งประกอบด้วยไดโอดที่เกิดขึ้นจากรอยต่อพีเอ็นและแหล่งจ่ายกระแส Photocurrent ที่มีค่ากระแสขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ถูกต่อเป็นภาระของเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ถูกแสง นำไปสู่สมการต่อไปนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_D \cdot \left[ e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2-7)$$

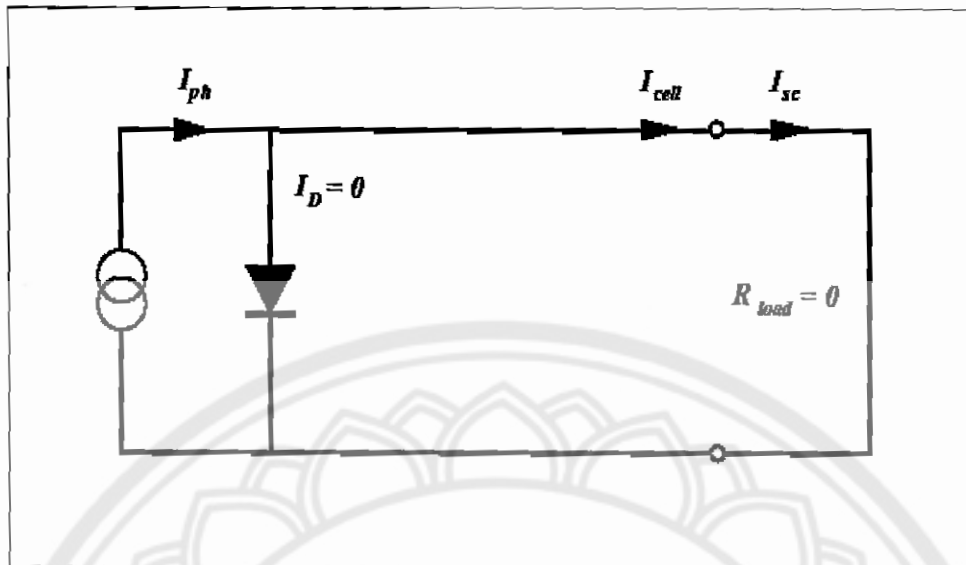


รูปที่ 2-15 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ

ในการทดลองจินตภาพ เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสแรงดัน (I-V Characteristic Curve) สำหรับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่แน่นอนค่าหนึ่งสามารถสร้างได้แบบจุดต่อจุดดังแสดงในรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 การสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์จากเส้นโค้งคุณลักษณะของไดโอด



รูปที่ 2-17 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์-กระแสลัดวงจร

เมื่อขั้วลัดวงจร หรือการมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 2-17 แรงดันขาออกรวมถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการ (2-7) เนื่องจาก  $V=0$  จึงไม่มีกระแส  $I_D$  ไหล (จุดที่ 1 ในรูปที่ 2-16) ดังนั้นกระแส Photocurrent ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะไหลไปที่ขาออก ดังนั้นกระแสของเซลล์จึงมีค่าสูงสุดที่จุดนี้ด้วยค่า  $I_{cell}$  ซึ่งเรียกว่า กระแสลัดวงจร (Short-Circuit Current:  $I_{sc}$ ) สมการ (2-8)

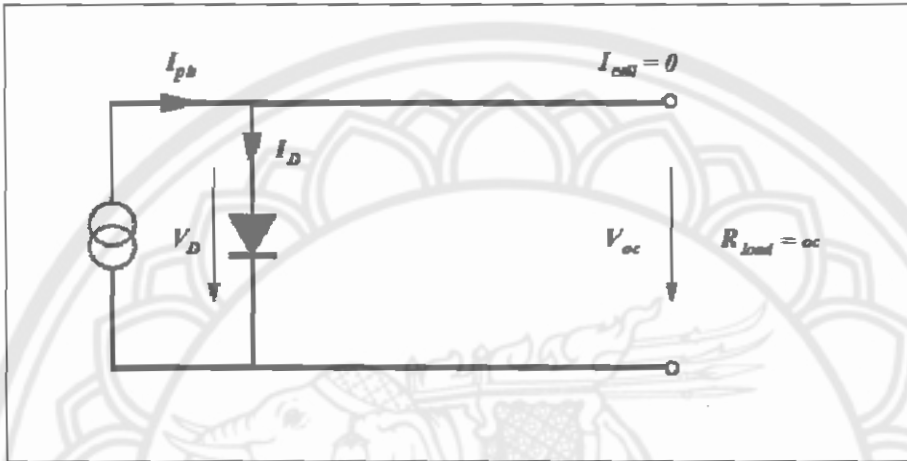
$$I_{sc} = I_{cell} = I_{ph} \quad (2-8)$$

ถ้าการมีค่าสูงขึ้น จะทำให้แรงดันของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่กระแสยังคงมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาแรงดันจนกว่าจะถึงค่าที่แน่นอนค่าหนึ่ง กระแสที่ไหลผ่านไดโอดภายในเซลล์จะยังคงมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งไม่ต้องนำมาคิดได้ ดังนั้นกระแสขาออกจึงมีค่าต่อเนื่องและสอดคล้องกับค่ากระแส Photocurrent (จุดที่ 2 ในรูปที่ 2-16)

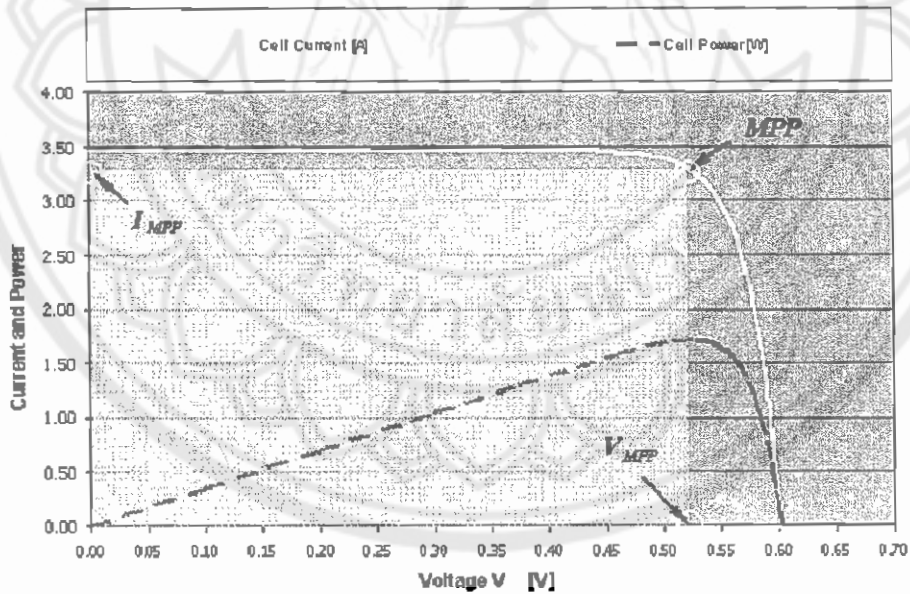
หลังจากการมีค่าสูงขึ้นจนทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม ส่วนหนึ่งของกระแส Photocurrent จะไหลผ่านไดโอด ซึ่งกระแสส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสนี้ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไดโอดภายในซึ่งสอดคล้องกับขนาดของ พื้นที่ระหว่างเส้นโค้งของกระแส Photocurrent กับเส้นโค้งของกระแสของเซลล์ เนื่องจากผลรวมของกระแสของภาระและกระแสของไดโอดต้องมีค่าเท่ากับค่ากระแส Photocurrent ซึ่งมีค่าคงที่ กระแสขาออกจึงมีค่าลดลง (จุดที่ 3 ในรูปที่ 2-16)

ในกรณีที่การมีค่าอนันต์ หรือในช่วงเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2-18 กระแสขาออกจะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือกระแส Photocurrent ทั้งหมดไหลผ่านไดโอดภายใน (จุดที่ 4 ในรูปที่ 2-16) ดังนั้นแรงดันเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage:  $V_{oc}$ ) ก็สามารถหาได้จากสมการ (2-9) ดังนี้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (2-9)$$



รูปที่ 2-18 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์-แรงดันเปิดวงจร



รูปที่ 2-19 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า และจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ที่มา: Kassel University)

นอกจากนี้ ค่าของแรงดันเปิดวงจรมักจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5-0.6 V สำหรับเซลล์ชนิดคริสตัลไลน์ (Crystalline) และ 0.5-0.6 V สำหรับเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัส (Amorphous Cells) จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เส้นโค้งคุณลักษณะสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จะมีลักษณะเป็นส่วนกลับของเส้นโค้งคุณลักษณะของไดโอดซึ่งถูกเลื่อนขึ้นด้วยค่าชดเชยที่มีค่าเท่ากับค่ากระแส Photocurrent หรือค่ากระแสลัดวงจร เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าหาได้จากผลคูณระหว่างค่ากระแสและค่าแรงดัน ดังนั้นเส้นโค้งของกำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายโดยเซลล์ ณ ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่กำหนดจึงสามารถคำนวณหาได้ (รูปที่ 2-19) ถึงแม้ว่ากระแสจะมีค่าสูงสุด ณ จุดที่มีการลัดวงจร แต่แรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับศูนย์ และในทำนองเดียวกัน ณ จุดที่มีการเปิดวงจร ถึงแม้ว่าแรงดันจะมีค่าสูงสุด แต่กระแสที่จุดนี้มีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกัน ในช่วงระหว่างสองจุดดังกล่าวข้างต้นจะมีจุด ๆ หนึ่งที่ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จุดที่เรียกว่า “จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point:  $MPP$ )” นี้บ่งบอกถึงจุดทำงาน (Working Point) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังภาระ ณ ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่กำหนด จุดนี้ตั้งอยู่ในบริเวณส่วนโค้งของเส้นโค้งคุณลักษณะ ค่าของแรงดันและกระแสที่จุดนี้สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$V_{MPP} \approx (0.75 - 0.9)V_{OC}$$

$$I_{MPP} \approx (0.85 - 0.95)I_{SC}$$

นอกจากนี้ ปริมาณ

$$FF = \frac{(V_{MPP} \cdot I_{MPP})}{(V_{OC} \cdot I_{SC})} \quad (2-10)$$

ซึ่งถูกเรียกว่า “ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor:  $FF$ )” เป็นเครื่องวัดคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเส้นโค้งคุณลักษณะมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมมากน้อยเพียงใด โดยปกติ ค่านี้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคริสตัลไลน์จะมีค่าประมาณ 0.7 - 0.8 นั่นคือ ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของเซลล์ มีค่า

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2-11)$$

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าขาออกต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ขาเข้า ( $P_{in}$ ) ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\eta = \frac{(V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF)}{P_{in}} \quad (2-12)$$

นับจนถึงปัจจุบัน ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ณ ระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ของสเปกตรัมที่ AM 1.5 (Air Mass = 1.5) มีค่าประมาณ 24 % ส่วนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนในสายการผลิตสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนภาคพื้นดินมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 14 % อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎี ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนมีค่าประมาณ 26 – 27 % [20]

