

บทที่ 2

แบบจำลองระบบโฟโตโวลตาอิก

2.1 บทนำ

ในการออกแบบระบบโฟโตโวลตาอิกแบบแยกอิสระ ขนาดของระบบก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดและข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ของสถานที่ติดตั้งเป็นสำคัญ ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ที่มีความเหมาะสมจะทำให้ได้ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และขนาดของแบตเตอรี่สัมพันธ์กับปริมาณโหลด เป็นผลให้ราคาในการลงทุนครั้งแรกมีความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ ซึ่งรายละเอียดในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการคำนวณหาค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประมาณค่าพลังงานจากข้อมูลสถิติความยาวนานแสงแดด ซึ่งจะเป็นพลังงานด้านเข้าให้กับระบบและจำลองการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกประกอบไปด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดควบคุมและแบตเตอรี่ เป็นหลัก

2.2 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลก

การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือชั้นบรรยากาศโลกขึ้นอยู่กับสาเหตุหลักสองประการ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ปลดปล่อยออกมาที่ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ เมื่อเทียบสาเหตุทั้งสองความเข้มรังสีอาทิตย์จากการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน (Fusion Reaction) บนดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เป็นหลัก โดยที่ในแต่ละวันจะมีค่าแตกต่างกันตามการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์[11] ซึ่งสามารถแสดงเป็นค่าประกอบของระยะทางได้ตามสมการที่ (2-1)

$$f_d = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365} D\right) \quad (2-1)$$

เมื่อ D คือ วันที่ในรอบปี (1 ม.ค. = 1, 31 ธ.ค. = 365)

รังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นโลกจะถูกดูดกลืนจากชั้นบรรยากาศของโลกและเกิดการหักเหของรังสีจากตัวกลาง เช่น ปริมาณความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ ฝุ่นละออง ฯลฯ จึงแบ่งรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกออกเป็น 2 ส่วน คือ

- รังสีอาทิตย์แบบโดยตรง (Direct Solar Radiation)
- รังสีอาทิตย์แบบกระจาย (Diffuse Solar Radiation)

2.3 หลักการคำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นราบ

ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่นอกชั้นบรรยากาศโลกที่เวลาใด ๆ จะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์และมุมซันิธ (Zenith Angle) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-2)

$$G_o = G_s \cdot f_d \cdot \cos z \quad (2-2)$$

- เมื่อ G_o คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่นอกชั้นบรรยากาศโลก
 G_s คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์มาตรฐาน เท่ากับ 1387 วัตต์/ตร.ม.
 z คือ มุมซันิธ

ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านทะลุมายังพื้นโลกจะถูกดูดกลืนและเกิดการกระเจิงในชั้นบรรยากาศเป็นผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นโลกลดลงซึ่งในสภาวะที่ท้องฟ้าแจ่มใส (Clear Sky) ความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงคำนวณได้จากสมการที่ (2-3)

$$I_c = A e^{-B m} \quad (2-3)$$

- เมื่อ I_c คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส
 A คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มวลอากาศ (Air Mass) เท่ากับศูนย์ (ภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-1)
 B คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นบรรยากาศ (ภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-1)
 m คือ ค่ามวลอากาศ

การที่โลกหมุนรอบตัวเองและโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรีทำให้ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและเป็นผลทำให้เกิดฤดูกาลต่าง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณไอน้ำในอากาศ ฯลฯ เป็นผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์แบบกระจายมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาพตัวกลางในชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งที่ตำแหน่งละติจูด 0 ถึง 64 องศาเหนือ สามารถที่ประมาณหาค่าความเข้มรังสีอาทิตย์แบบกระจายได้จากสมการที่ (2-4)

$$D_c = C I_c \quad (2-4)$$

เมื่อ D_c คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นบรรยากาศ (ภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-1)

สำหรับประเทศไทยจากการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปริมาณไอน้ำในอากาศ ที่ลดทอนความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะท้องฟ้าแจ่มใส สามารถคำนวณหาความเข้มรังสีอาทิตย์รวมและความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรง[4] ได้จากสมการที่ (2-5) และ (2-6)

$$G_c = F \sum_{i=0}^6 a_i \left(\frac{z}{90}\right)^{2i} \quad (2-5)$$

$$I_c = F \sum_{i=0}^6 b_i \left(\frac{z}{90}\right)^{2i} \quad (2-6)$$

เมื่อ G_c คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส

I_c คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส

a_i, b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการอนุกรมกำลัง(ภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-2)

และ

$$F = 1 - 0.0335 \sin\left(\frac{360(D-94)}{365}\right) \quad (2-7)$$

$$z = \cos^{-1}(\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cosh) \quad (2-8)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + D)\right) \quad (2-9)$$

มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์(h)จะขึ้นอยู่กับเวลาสุริยะ(solar time) และตำแหน่งลองจิจูด (Longitude) ของสถานที่ติดตั้งระบบ ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\text{ในช่วงเวลาก่อนเที่ยง} \quad h = 15 (\text{เวลาสุริยะ} - 12) \quad (2-10)$$

$$\text{ในช่วงเวลาหลังเที่ยง} \quad h = 15 (\text{เวลาสุริยะ} + 12) \quad (2-11)$$

โดยที่

$$\text{เวลาสุริยะ} = \text{LST} \pm 4(L_{o(\text{std})} - L_{o(\text{local})}) + \text{EOT} \quad (2-12)$$

$$\text{EOT} = 9.87 \sin\left(2\left(\frac{360}{364}(D-81)\right)\right) - 7.53 \cos\left(\frac{360}{364}(D-81)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{364}(D-81)\right) \quad (2-13)$$

เมื่อ **LST** คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (Local Standard Time)

$L_{o(\text{std})}$ คือ เส้นลองจิจูดที่ใช้อ้างอิงเวลามาตรฐานท้องถิ่น

$L_{o(\text{local})}$ คือ ตำแหน่งเส้นลองจิจูดของสถานที่ติดตั้งระบบ

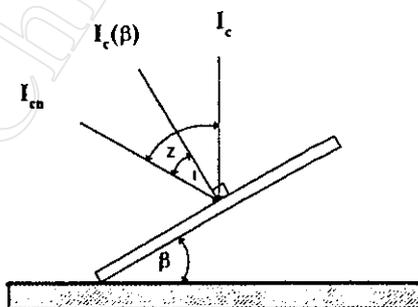
EOT คือ สมการเวลา (Equation of Time)

และความเข้มรังสีอาทิตย์แบบกระจาย ในสภาวะท้องฟ้าแจ่มใสคำนวณได้จากสมการที่ (2-14)

$$D_c = G_c - I_c \cos z \quad (2-14)$$

2.4 หลักการคำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียง

จากที่กล่าวมาข้างต้นรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นราบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ รังสีอาทิตย์แบบโดยตรงและรังสีอาทิตย์แบบกระจาย ส่วนรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงจะได้รับรังสีที่สะท้อนจากพื้นดิน ซึ่งปริมาณความเข้มรังสีจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของสถานที่ติดตั้ง



รูปที่ 2-1 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียง

ค่าตัวประกอบความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรง (R_B) ของที่ตั้ง ที่อยู่บนซีกโลกเหนือและแผง
หันหน้าไปทางทิศใต้ คำนวณได้จากสมการที่ (2-15)

$$\begin{aligned} R_B &= \frac{\cos i}{\cos z} \\ &= \frac{\cos(L-\beta) \cos \delta \cosh + \sin(L-\beta) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \cosh + \sin L \sin \delta} \end{aligned} \quad (2-15)$$

และค่าตัวประกอบความเข้มรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงของที่ตั้งที่อยู่ในซีกโลกใต้และแผงหันหน้าไป
ทางทิศเหนือคำนวณได้จากสมการที่ (2-16)

$$R_B = \frac{\cos(L+\beta) \cos \delta \cosh + \sin(L+\beta) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \cosh + \sin L \sin \delta} \quad (2-16)$$

- เมื่อ
- L คือ ละติจูดของสถานที่ตั้ง
 - δ คือ มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับเส้นศูนย์สูตรโลก ($-23.45^\circ S + 23.45^\circ N$)
 - h คือ มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์
(-180° ถึง $+180^\circ$, ที่เวลาเที่ยงวันทางสุริยะมุมชั่วโมงเท่ากับ 0°)
 - β คือ มุมระหว่างพื้นเอียงกับพื้นราบ

ถ้าสมมุติให้ท้องฟ้าเป็นรูปโดมและมีการกระเจิงของความเข้มรังสีอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอ
สามารถที่จะคำนวณหาความเข้มรังสีอาทิตย์แบบกระจาย ($D(\beta)$) ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงเท่ากับ
 β องศา ได้ตามสมการที่ (2-17)

$$D(\beta) = D_c \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2-17)$$

และรังสีอาทิตย์ที่พื้นเอียงได้รับจากการสะท้อนจากพื้นดิน ซึ่งเกิดจากรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงและ
แบบกระจาย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน คือ ρ_g ดังนั้นสามารถที่จะคำนวณหา
ค่าความเข้มรังสีรวมที่สะท้อนจากพื้นดิน (G_p) ได้จากสมการที่ (2-18)

$$G_p = (I_c + D_c) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2-18)$$

ดังนั้นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นเอียง ($G(\beta)$) สามารถหาได้จากสมการที่ (2-19) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน แสดงได้ดังในตารางที่ 2-1

$$G(\beta) = I_c R_B + D_c \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_c + D_c) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2-19)$$

ตารางที่ 2-1 ตารางค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของพื้นดิน

ลักษณะของพื้นที่ตั้ง	ค่าสัมประสิทธิ์ ρ_g
พื้นดิน	0.2
พื้นหญ้า	0.3
พื้นทราย	0.4
พื้นหิมะ	0.5 - 0.8

ความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาพที่ท้องฟ้ามีเมฆ รังสีอาทิตย์จะถูกดูดกลืนจากไอน้ำและตัวกลางต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังพื้นโลกลดลง ซึ่งจะวัดได้จากค่าตัวประกอบความกระจ่าง (Clearness Index (k_d)) เป็นอัตราส่วนระหว่างรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นโลกในสภาพที่ท้องฟ้ามีเมฆกับรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นโลกในสภาพท้องฟ้าแจ่มใส คำนวณหาได้จากสมการที่ (2-20)

$$k_d = \frac{G_D}{G_c} \quad (2-20)$$

เมื่อ G_D คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพที่ท้องฟ้ามีเมฆ

และสามารถคำนวณหาองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงได้จากสมการที่ (2-21) และ (2-22)

$$D_D = G_D - I_D \cos z \quad (2-21)$$

$$I_D = \frac{(1-r_d)}{\cos z} G_D \quad (2-22)$$

เมื่อ r_d คือ อัตราส่วนรังสีอาทิตย์แบบกระจายกับรังสีอาทิตย์รวมในสภาพท้องฟ้ามีเมฆ
 D_D คือ รังสีอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้ามีเมฆ
 I_D คือ รังสีอาทิตย์แบบโดยตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบในสภาพท้องฟ้ามีเมฆ

การประยุกต์การคำนวณหารังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นเอียงภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆกระจายทั่วไป โดยอาศัยการประมาณค่าจากอัตราส่วนของรังสีอาทิตย์แบบโดยตรงกับค่ารังสีอาทิตย์รวม[6] ดังนั้นความเข้มรังสีอาทิตย์ก็จะขึ้นอยู่กับเวลาและมุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงกับพื้นราบ(ψ) ทำให้ปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลาของวัน ดังนั้นสามารถที่จะคำนวณหาความเข้มรังสีอาทิตย์รวมได้จากสมการที่ (2-23)

$$G(\beta) = \frac{(G_D - D_D)}{\cos z} \cos \psi + D_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \left[1 - \left(\frac{D_D}{G_D} \right)^2 \right] \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left(\left[1 + \left[1 - \left(\frac{D_D}{G_D} \right)^2 \right] \cos^2 \psi \sin^3 z \right] \right) \quad (2-23)$$

$$\psi = \cos^{-1}(\cos(L - \beta)\cos\delta\cos h + \sin(L - \beta)\sin\delta) \quad (2-24)$$

เมื่อ $G(\beta)$ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นเอียง

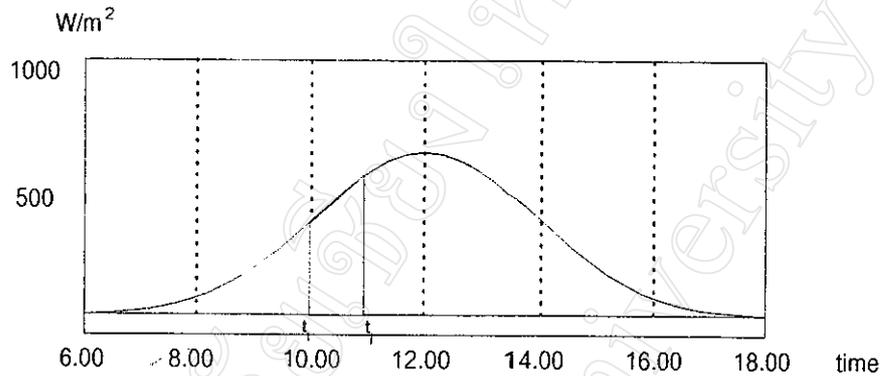
ดังนั้นในแต่ละวันจะได้รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นเอียงดังตัวอย่างใน รูปที่ 2-2 และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงในแต่ละชั่วโมงของวันตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตกคำนวณได้จากผลรวมของรังสีอาทิตย์รวมที่เวลา $(t_1 - t_2) \dots (t_i - t_j)$ ดังแสดงในสมการที่ (2-25)

$$G_{\beta} = \int_i^j (G(\beta)) dt \quad (2-25)$$

$$i = 6, 7, 8, \dots 17$$

$$j = 7, 8, 9, \dots 18$$

เมื่อ G_{β} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียง β องศา



รูปที่ 2-2 ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับตลอดวัน

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์กับข้อมูลชั่วโมงความยาวนานแสงแดด [12]

การบันทึกข้อมูลรังสีอาทิตย์บนพื้นโลกส่วนมากจะมีข้อมูลในประเทศที่พัฒนาแล้ว ส่วนในประเทศกำลังพัฒนามีการเก็บบันทึกข้อมูลรังสีอาทิตย์น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ ดังนั้นจึงได้มีการคิดหาวิธีประมาณค่าพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณเมฆ จำนวนชั่วโมงความยาวนานแสงแดด ฯลฯ แต่ข้อมูลที่หาได้ง่ายและมีความแม่นยำในการทำนาย คือ ข้อมูลชั่วโมงความยาวนานแสงแดด โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับความเป็นไปได้ของชั่วโมงที่มีแสงแดดจะประมาณได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัสตรอม ตามสมการที่ (2-26) และในแต่ละวันสามารถที่จะคำนวณหาจำนวนชั่วโมงที่มีแสงแดด จากช่วงดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตกได้ตามสมการที่ (2-27)

$$\frac{G}{G_o} = a + b \left(\frac{s}{s_m} \right) \quad (2-26)$$

$$s_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (2-27)$$

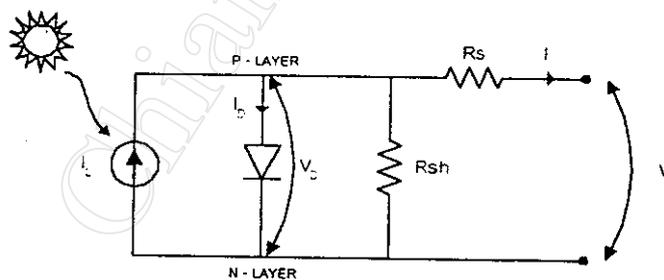
เมื่อ	G	คือ	พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นราบ
	G_o	คือ	พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบนอกชั้นบรรยากาศโลก
	s	คือ	จำนวนชั่วโมงความยาวนานแสงแดดสูงสุดจากการบันทึก
	s_d	คือ	จำนวนชั่วโมงความยาวนานแสงแดดจากการคำนวณ
	s_m	คือ	ค่าเฉลี่ยชั่วโมงความยาวนานแสงแดดสูงสุด
	a, b	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

ค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกในแต่ละเวลาสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2-28) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เป็นสำคัญและค่าเฉลี่ยชั่วโมงความยาวนานแสงแดด สามารถคำนวณได้จากช่วงระยะเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก ซึ่งจำนวนชั่วโมงสูงสุดที่มีแสงแดดในแต่ละวันคำนวณได้จากสมการที่ (2-27)

$$G_o = G_s \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} D \right) \right) (\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cosh) \quad (2-28)$$

2.6 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาจาก ทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำอาจจะไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติของ I-V Curve ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์[9] ตามรูปที่ 2-3 สามารถสรุปสมการกระแสได้ตามสมการที่ (2-29)



รูปที่ 2-3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_L - I_o \left\{ \exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{A k T_c} \right) - 1 \right\} - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2-29)$$

เมื่อ	I	คือ กระแสต้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์
	I_L	คือ กระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้
	I_O	คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (Diode Saturate Current)
	e	คือ ประจุอิเล็กตรอนิกส์ (1.6×10^{-19} คูลอมป์)
	R_s	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
	R_{sh}	คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
	A	คือ ค่าคงที่ของภาวะรูปสมิท (Curve-Fitting Constant) มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5
	k	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann's
	T_c	คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
	V	คือ แรงดันที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการที่ (2-29) ได้มีการประยุกต์สมการกระแสให้สอดคล้องกับกราฟคุณสมบัติ I-V Curve สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (2-30)

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left\{ \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) \right\} - 1 \right) \quad (2-30)$$

เมื่อ

$$C_1 = \left(1 - \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right) \left\{ \exp\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right) \right\} \quad (2-31)$$

$$C_2 = \left(\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right) - 1 \right) \left(\ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right)^{-1} \quad (2-32)$$

จากสมการที่ (2-30) เมื่อพิจารณาความผิดพลาดที่เกิดจากการทดลอง โดยใช้ความเข้มแสง 2 ระดับ ผลการทดลองที่ได้ ดีกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและคุณสมบัติที่แท้จริง ซึ่งสามารถแสดงได้ในเทอมของค่าคงที่ในสมการที่ (2-33)

$$I = I_{sc} \left(1 - C_3 \exp(C_4 V^m) - 1 \right) \quad (2-33)$$

เมื่อ

$$m = \frac{\ln\left(\frac{C_5}{4.46}\right)}{\ln\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}}\right)} \quad (2-34)$$

$$C_3 = 0.01175 \quad (2-35)$$

$$C_4 = \frac{4.46}{(V_{oc})^m} \quad (2-36)$$

$$C_5 = \ln\left(\frac{1.01175 I_{sc} - I_{mp}}{0.01175 I_{sc}}\right) \quad (2-37)$$

เมื่อ

V_{mp}	คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังงานสูงสุด
V_{oc}	คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร
I_{mp}	คือ กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังงานสูงสุด
I_{sc}	คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

ในทางปฏิบัติสมการที่ (2-33) มีความเหมาะสมกับที่ค่าความเข้มแสงค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น จึงได้มีการพัฒนาเพื่อใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ทุกย่านความเข้มแสงและที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ [8] ดังสมการต่อไปนี้

การจำลองอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

$$T_c = T + (0.02)G_\beta \quad (2-38)$$

$$\Delta T_c = T_c - T_{ref} \quad (2-39)$$

เมื่อ

T	คือ อุณหภูมิแวดล้อม
T_c	คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
T_{ref}	คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์

การจำลองพลังงานไฟฟ้าด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\Delta I_{PV} = \alpha \left(\frac{G_{\beta}}{G_{ref}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G_{\beta}}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (2-40)$$

$$\Delta V_{PV} = -v \Delta T_c - R_s \Delta I_{PV} \quad (2-41)$$

$$I_{PV} = I_{ref} + \Delta I_{PV} \quad (2-42)$$

$$V_{PV} = V_{ref} + \Delta V_{PV} \quad (2-43)$$

ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (2-44)

$$W_{PV} = \int_{t_i}^{t_j} (V_{PV}(t) I_{PV}(t)) dt \quad (2-44)$$

เมื่อ	I_{PV}	คือ กระแสด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	I_{sc}	คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	I_{ref}	คือ กระแสอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	V_{PV}	คือ แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	V_{ref}	คือ แรงดันอ้างอิงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	W_{PV}	คือ พลังงานด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	R_s	คือ ความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเนื่องจากอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	v	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันเนื่องจากอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid Battery)

พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในแบตเตอรี่นั้นอยู่ในรูปของปฏิกิริยาเคมี โดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้สะสมในรูปของพลังงานจากเคมี สมภาวนี้เราเรียกว่าการประจุ (Charge) และการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเราเรียกว่าการคายประจุ (Discharge) ชนิดของแบตเตอรี่ที่

ใช้สะสมพลังงานเป็นจำนวนมาก ๆ ส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ซึ่งโครงสร้างของแบตเตอรี่จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน ส่วนประกอบพื้นฐานของแบตเตอรี่ประกอบด้วย

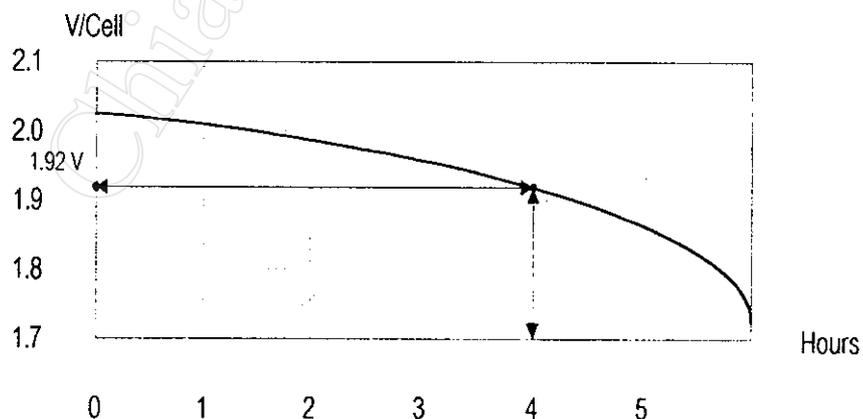
- แผ่นเพลทบวก (Positive Plate) : - ตะกั่วไดออกไซด์ (Lead Dioxide (PbO_2))
 แผ่นเพลทลบ (Negative Plate) : - ตะกั่วพรุน (Spongy Lead (Pb))
 น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte): - กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid (H_2SO_4))

และปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารระหว่างที่แบตเตอรี่ประจุและคายประจุ ดังนี้คือ



หน่วยวัดความจุของแบตเตอรี่สามารถที่วัดเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง หรือวัตต์-ชั่วโมง และความจุของแบตเตอรี่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ทำแบตเตอรี่แต่เพียงอย่างเดียวยังมีตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องอีกมาก ซึ่งพอสรุปตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ดังนี้คือ

ก. แรงดันสุดท้าย (Final Voltage) การกำหนดแรงดันสุดท้ายของเซลล์ขณะคายประจุจะมีผลต่อค่าความจุ เช่น ตัวอย่างในรูปที่ 2-4 สมมุติมาตรฐานแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่กำหนดไว้ที่ 1.70 โวลต์/เซลล์ ที่เวลาการคายประจุ 6 ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัติโหลดจะทำงานได้ที่แรงดันไม่ต่ำกว่า 1.92 โวลต์/เซลล์ จะเห็นว่าแบตเตอรี่สามารถจ่ายโหลดได้เพียง 4 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นการกำหนดแรงดันสุดท้ายที่ค่าสูง ๆ จะทำให้ความจุที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าการกำหนดแรงดันสุดท้ายที่ต่ำ ซึ่งจะให้ความจุที่มากกว่า



รูปที่ 2-4 กราฟการคายประจุของแบตเตอรี่

ข. อุณหภูมิ อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะมีผลต่ออัตราการคายประจุ เพราะว่าที่อุณหภูมิแบตเตอรี่ต่ำลงทำให้ความหนืด (Viscosity) ของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลงในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความหนืดของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ลดลงเป็นเหตุให้แบตเตอรี่สามารถคายประจุได้มากขึ้นเห็นได้ว่าอุณหภูมิเป็น Correction Factor ที่สำคัญ และในแบตเตอรี่แต่ละชนิด จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการสะสมพลังงานแตกต่างกัน เช่น

Traction Battery ความจุจะลด 0.56 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียส
 Plante' Battery ความจุจะลด 0.56 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียส
 Automotive Battery ความจุจะลด 0.96 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียส

ค. จำนวนของวัตถุที่ทำปฏิกิริยา (Amount of Active Material) พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หากจำนวนวัตถุที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ค่าความจุของแบตเตอรี่ก็จะได้ตามพิกัดและกรณีที่วัตถุเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ความจุที่ได้ก็จะลดไปตามจำนวนของวัตถุปฏิกิริยาในทางทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของวัตถุที่ทำปฏิกิริยากับพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับสามารถคำนวณได้จากกฎการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี ของฟาราเดย์ (Faraday 's Electrochemical Law) โดยที่

$$1 \text{ ฟาราเดย์} = 96487.3 \text{ คุลอมป์/โมล} = 26.802 \text{ แอมแปร์-ชั่วโมง}$$

ง. ความหนาแน่นของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ เป็นความหนาแน่นของตัวละลายต่อสารละลาย โดยมีหน่วยวัดเป็น กิโลกรัม/ลิตร ซึ่งความหนาแน่นของตัวละลายจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น ในทางทฤษฎีปฏิกิริยาที่ให้พลังงานไฟฟ้า 1 แอมแปร์-ชั่วโมง เกิดจากวัตถุที่ทำปฏิกิริยา 4.46 กรัม (ตะกั่วไดออกไซด์) และ 3.87 กรัม (ตะกั่วพูน) และตามทฤษฎีต้องใช้กรดซัลฟูริก 3.66 กรัม ในการทำปฏิกิริยา ค่าที่ชี้ถึงประสิทธิภาพของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์อีกอย่างก็คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จ. การออกแบบแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่สามารถให้พลังงานได้ตามพิกัด หมายถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ที่รวมไปถึงองค์ประกอบของแบตเตอรี่ เช่น แผ่นเพลท แผ่นกั้น (Separator) ขนาดและการออกแบบเปลือกหุ้มเซลล์ วัสดุที่ใช้ผลิตที่มีความต้านทานการนำไฟฟ้าต่ำ ความบริสุทธิ์ของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ที่ใช้เติมครั้งแรก ฯลฯ จะต้องมีความเหมาะสมซึ่งสิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อความจุของแบตเตอรี่

จ. แรงดันของแบตเตอรี่ แรงดันของแบตเตอรี่ขณะประจุและคายประจุจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสิ่งเหล่านี้

- ปริมาณกระแส
- การประจุแบตเตอรี่หรือการคายประจุ
- อุณหภูมิของแบตเตอรี่
- อายุการใช้งาน

ซึ่งในระบบที่แบตเตอรี่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายตลอดเวลาแรงดันปกติที่ใช้ในการประจุจะต่ำกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดแก๊ส (Gassing) หรือที่ประมาณ 2.30-2.40 โวลต์/เซลล์ ผลจากการประจุแรงดันที่ระดับต่าง ๆ แสดงได้ดังรูป กรณีที่แบตเตอรี่คายประจุจนหมดแรงดันที่ใช้ประจุใหม่อย่างน้อยที่สุดต้องเท่ากับ 2 โวลต์/เซลล์ และต้องไม่มากกว่า 2.2 โวลต์/เซลล์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระแสขณะประจุด้วยและแรงดันเมื่อประจุเต็มก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ อายุและอุณหภูมิ

ข. ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่คำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่คายประจุและพลังงานที่ประจุให้กลับเป็นดังเดิม ภายใต้เงื่อนไขของการประจุ การคายประจุและอุณหภูมิ ดังในสมการที่ (2-45) และ (2-46) โดยปกติแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะมีประสิทธิภาพถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นถึง 95 เปอร์เซ็นต์ กรณีที่ทำการประจุจนเกิดสภาวะเป็นแก๊ส

$$\text{Ah Efficiency} = \frac{\text{Ah}_{\text{output}}}{\text{Ah}_{\text{input}}} \quad (2-45)$$

$$\text{Wh Efficiency} = \frac{\text{Wh}_{\text{output}}}{\text{Wh}_{\text{input}}} \quad (2-46)$$

ซึ่งรายละเอียดการจำลองการทำงานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [10] พลังงานสะสมในแบตเตอรี่ขณะประจุเรียกว่าสถานะการประจุแบตเตอรี่ (State-of-Charge (SOC)) คำนวณได้จากสมการที่ (2-47)

$$\text{SOC}(i) = \text{SOC}(i-1) + \eta_{\text{ch}} \left(\frac{\text{Ah}^{\text{C}}(i) - \text{Ah}^{\text{C}}(i)}{C_{\text{ef}}} \right) \quad (2-47)$$

$$C_{\text{ef}} = C_{10} \text{ FC} \quad (2-48)$$

$$FC = \left(\frac{1.79}{1 + 0.77 \left(\frac{I_b}{I_{10}} \right)^{0.726}} \right) \left(1 + 0.0118(T_B - 25) - 3.10^{-4} (T_B - 25)^2 \right) \quad (2-49)$$

เมื่อ	FC	คือ ตัวประกอบค่าแก้
	Ah^G	คือ กระแสต่อชั่วโมงที่ประจุให้กับแบตเตอรี่
	Ah^C	คือ กระแสต่อชั่วโมงที่แบตเตอรี่คายประจุ
	η_{ch}	คือ ประสิทธิภาพการประจุแบตเตอรี่
	I_b	คือ กระแสแบตเตอรี่
	I₁₀	คือ กระแสคายประจุต่อชั่วโมง (ที่ระยะเวลา 10 ชั่วโมง)
	C₁₀	คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่ 10 ชั่วโมง
	C_{ef}	คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่ปัจจุบัน
	T_B	คือ อุณหภูมิของแบตเตอรี่

แรงดันคงเหลือของเซลล์แบตเตอรี่ (V_0) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-50) และ (2-51)

$$\rho(15^\circ\text{C}) = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \text{SOC}(i) + \rho_{\min} \quad (2-50)$$

$$V_0 = \rho(15^\circ\text{C}) + 0.856 \quad (2-51)$$

ดังนั้นแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ขณะประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่(2-51)และจะได้พลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่ตามสมการที่ (2-53)

$$V_{bch} = V_0 + \frac{I_b}{C_{10}} \left(\frac{0.74}{1.05 - \text{SOC}(i)} + 0.451 + 0.219(FC^{5.74} - 1) \right) \quad (2-52)$$

$$W_{bch} = Ah^G (V_{bch} N_c) \quad (2-53)$$

เมื่อ	V_{bch}	คือ แรงดันแบตเตอรี่ขณะประจุ (1 เซลล์)
	W_{bch}	คือ พลังงานที่ประจุให้กับแบตเตอรี่
	N_c	คือ จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

พลังงานขณะแบตเตอรี่คายประจุ ขณะแบตเตอรี่คายประจุมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกันกับ ขณะแบตเตอรี่ถูกประจุ โดยต้องแทนค่าและคำนวณในสมการที่ (2-47) ถึง (2-51) ใหม่ทั้งหมด ยกเว้นในสมการที่(2-47)ประสิทธิภาพการคายประจุ(η_{dis})เป็นไปตามข้อมูลที่กำหนดแล้วนำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (2-54) ดังนั้นพลังงานที่แบตเตอรี่คายประจุคำนวณได้จากสมการที่ (2-55)

$$V_{bdis} = V_0 - \frac{I_b}{C_{10}} \left(\frac{0.113}{SOC(i)} + 0.451 + 0.219(FC^{5.74} - 1) \right) \quad (2-54)$$

$$W_{bdis} = Ah^c (V_{bch} N_c) \quad (2-55)$$

เมื่อ	V_{bdis}	คือ แรงดันแบตเตอรี่ขณะคายประจุ (1 เซลล์)
	W_{bdis}	คือ พลังงานที่แบตเตอรี่คายประจุ

2.8 การประจุแบตเตอรี่ (Battery Charging)

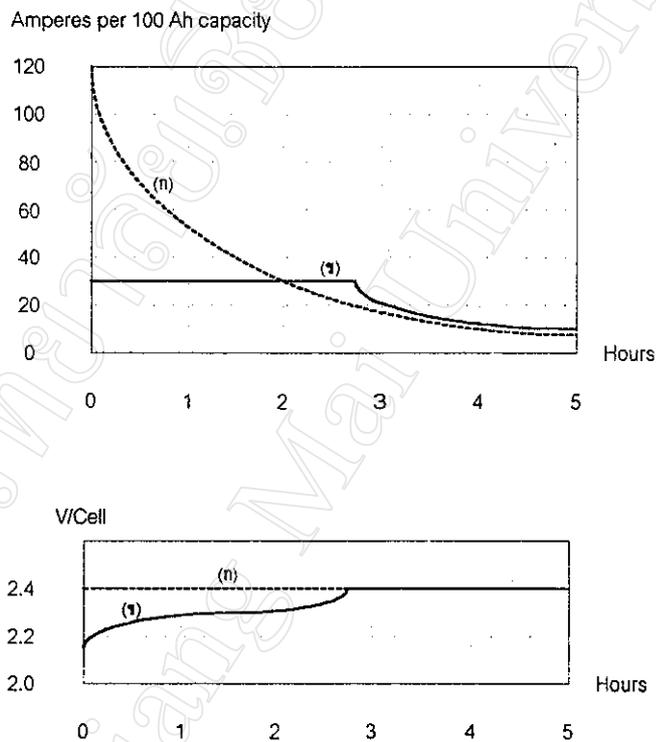
การประจุแบตเตอรี่แรงดันที่ใช้ประจุจะมากกว่าแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่ถูกประจุแรงดันแบตเตอรี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาการประจุมากขึ้นกระแสที่ใช้ในการประจุจะค่อย ๆ ลดลง วิธีที่ใช้ในการประจุสามารถแบ่งออกเป็นแต่ละประเภท ดังนี้

ก. การประจุแบบกระแสคงที่ (Constant-Current Charging) การประจุแบตเตอรี่แบบใช้กระแสคงที่ไม่ใช่สิ่งจำเป็นในการที่ประจุแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพ วิธีนี้ถูกนำมาใช้แพร่หลาย เพราะในทางปฏิบัติมีความสะดวกที่จะกำหนดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จะประจุให้กับแบตเตอรี่ การใช้กระแสคงที่ที่ต้องควบคุมไม่ให้เกิดสถานะการประจุเกิน จนเกิดแก๊ส

ข. การประจุแบบแรงดันคงที่ (Constant - Voltage Charging) การประจุแบบแรงดันคงที่จะใช้แรงดันประจุในช่วง 2.3 - 2.4 โวลต์/เซลล์ จากรูปที่ 2-5 (ก) เห็นได้ว่าขณะเริ่มประจุแบตเตอรี่ปริมาณกระแสจะไหลเข้าแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปแบตเตอรี่จะสร้างแรงดันต้านกลับขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้กระแสในการประจุลดลงและลดลงจนเกือบคงที่แสดงว่า

แบตเตอรี่อยู่ในสถานะประจุเต็ม วิธีนี้มีความปลอดภัยที่รักษาแบตเตอรี่ส่วนมากใช้กับลักษณะงานที่มีการคายประจุปริมาณมาก (Deep Discharge)

ค. การประจุที่มีการควบคุมกระแสและแรงดัน (Current-Voltage Control Charging) การประจุโดยการควบคุมระหว่างแรงดันและกระแสที่ใช้ประจุไปพร้อม ๆ กัน ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นอย่างมากเพราะจากรูปที่ 2-5 (ข) จะเห็นได้ว่าขณะเริ่มประจุกระแสที่ใช้ประจุจะมีปริมาณ 20-30 แอมป์/เซลล์ ของความจุของแบตเตอรี่และเมื่อแรงดันแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนเกิดแก๊ส หรือที่แรงดันประมาณ 2.35 โวลต์/เซลล์ แรงดันของแบตเตอรี่จะเริ่มคงที่และที่จุดนี้กระแสประจุจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็คือลักษณะการควบคุมแรงดันในการประจุ



(ก) เส้นการประจุที่แรงดันคงที่ 2.4 โวลต์/เซลล์

(ข) เส้นการประจุที่กระแสคงที่จนแรงดันของแบตเตอรี่ถึง 2.4 โวลต์/เซลล์

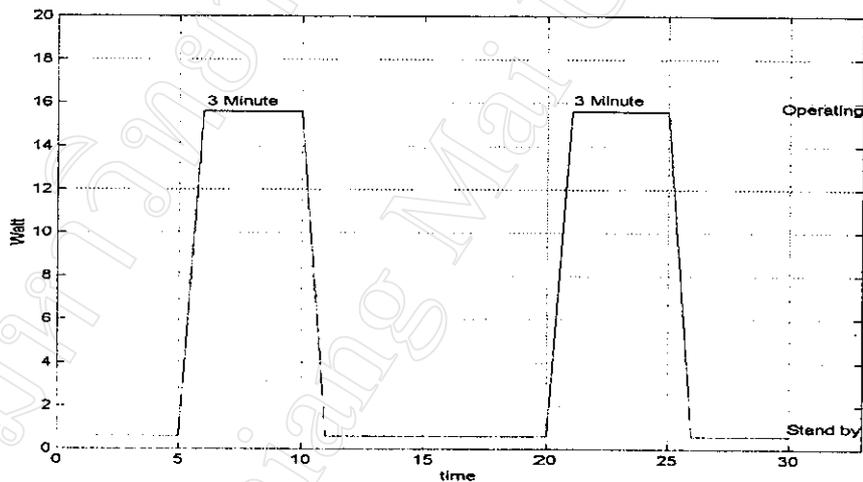
รูปที่ 2-5 กราฟแสดงคุณสมบัติของแบตเตอรี่ขณะประจุ

2.9 การจำลองโหลดระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่สาธารณะ

ลักษณะของโหลดระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่สาธารณะระบบ 470 เมกะเฮิรตซ์ แบ่งการใช้กำลังไฟฟ้าออกเป็น 2 ระดับ ที่แรงดันระบบอ้างอิงเท่ากับ 12 โวลต์ คือ

- กำลังไฟฟ้าขณะเตรียมพร้อมใช้งาน เท่ากับ 0.6 วัตต์
- กำลังไฟฟ้าขณะใช้งาน เท่ากับ 15.6 วัตต์

การจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าของเครื่องโทรศัพท์สาธารณะ จะกำหนดให้มีระยะเวลาในการใช้โทรศัพท์ต่อครั้ง เท่ากับ 3 นาที ดังแสดงปริมาณกำลังไฟฟ้าของเครื่องโทรศัพท์ในรูปที่ 2-6 ดังนั้นในแต่ละชั่วโมงสามารถหาคำนวนหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย จากจำนวนครั้งการใช้โทรศัพท์ในชั่วโมงนั้น และการแบ่งลักษณะของจำนวนครั้งการใช้โทรศัพท์ต่อวัน จะแบ่งการใช้งานโทรศัพท์ออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเวลากลางวัน เริ่มตั้งแต่เวลา 06.00 ถึง 18.00 น. และช่วงเวลากลางคืนเริ่มตั้งแต่เวลา 18.00 ถึง 06.00 น. ข้อมูลโหลดที่กำหนดให้กับโปรแกรมกำหนดเป็น พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดปี มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมง



รูปที่ 2-6 โหลดระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่สาธารณะ

2.10 การจำลองอุณหภูมิแวดล้อม

การจำลองอุณหภูมิแวดล้อมรายชั่วโมงจะใช้ข้อมูลสถิติอุณหภูมิ มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแต่ละชั่วโมงตลอดวันตามสมการที่ (2-56) และนำค่าเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละชั่วโมงไปประมาณค่า

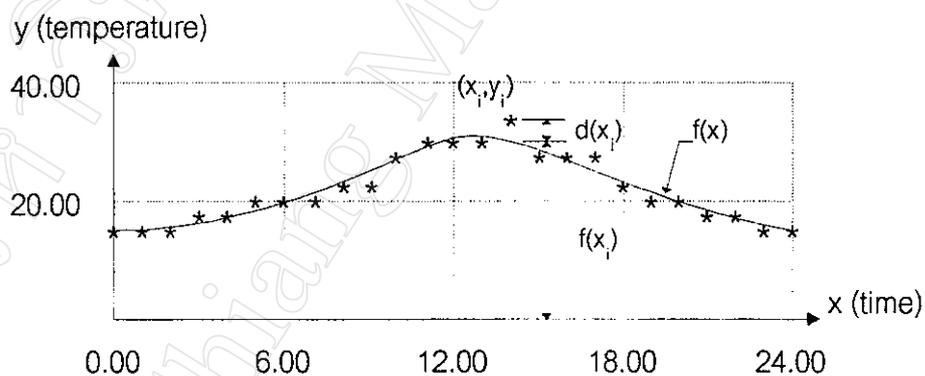
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแต่ละชั่วโมงตลอดวัน โดยวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression) ตามสมการที่ (2-57)

$$T = \sum_{i=1}^5 \frac{T_i}{5} \quad (2-56)$$

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m \quad (2-57)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature)
 t คือ เวลา
 a_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($m = 0, 1, 2, \dots$)

ในรูปที่ 2-7 แสดงการประมาณค่าอุณหภูมิ โดยที่แต่ละข้อมูลเกิดจากจุดตัดระหว่างค่าบนแกน x (เวลา) และค่าบนแกน y (อุณหภูมิ) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถคำนวณได้จากวิธีความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยสุด (Least Square Error)



รูปที่ 2-7 การประมาณค่าอุณหภูมิตลอดวัน

เมื่อค่าความคลาดเคลื่อน (ϵ) จำนวน n ข้อมูลหาได้จากสมการที่ (2-58) และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจำนวน $m+1$ ค่า หาได้ด้วยการใช้กฎอนุพันธ์ตามสมการที่ (2-59) ซึ่งสามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ทำให้สะดวกในการหาค่าสัมประสิทธิ์ได้ตามสมการที่

(2-60) ดังนั้นสามารถประมาณค่าอนุกรมมีเวดล้อย้อมได้โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าเวลาที่ต้องการลงในสมการที่ (2-57)

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m))^2 \quad (2-58)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_m} = 0 \quad (2-59)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$