บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

แสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีปริมาณมาก สะอาดและไม่มีมลพิษ สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อใช้ประโยชน์ได้สูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภทมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มของแสง,อุณหภูมิ,วัสดุที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ดังนั้นผู้ที่จะปฏิบัติงานเกี่ยวกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์จึงควรมีความเข้าใจคุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีความซับซ้อนในการทำความเข้าใจและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานอย่างมากจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาสื่อการเรียนรู้คุณสมบัติและประสิทธิภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อจัดทำสื่อการเรียนรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและพฤติกรรมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และแรงดัน (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้
3. เพื่อจัดทำแบบจำลองที่ใช้ในการหาจุดสูงสุดในการจ่ายกำลังงาน (Maximum Power Point, MPP)
4. เพื่อเป็นการให้เกิดการเรียนรู้ในการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิผล

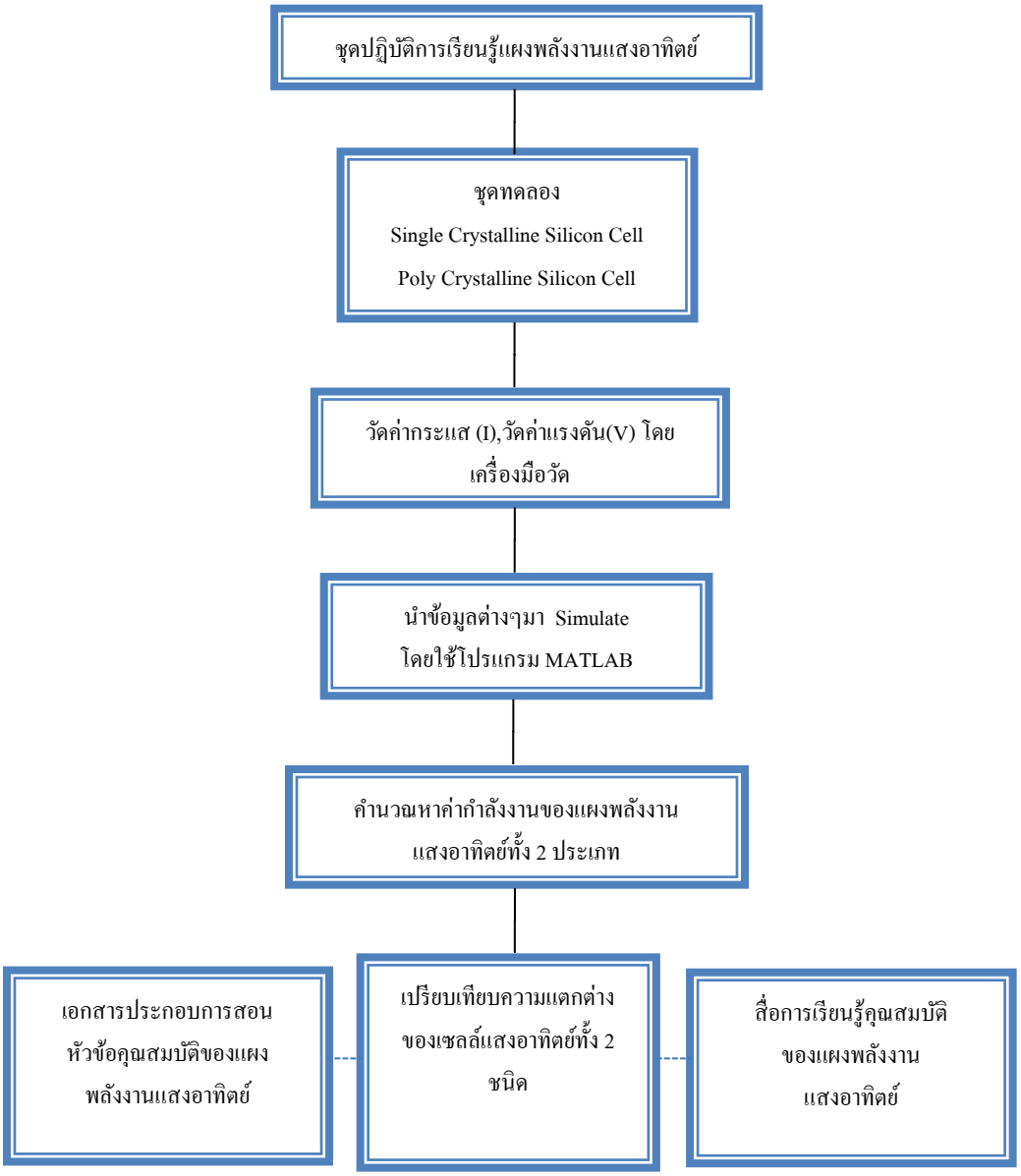
1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. สร้างชุดทดลองการทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ 2 แบบได้แก่
   1.1 Poly Crystalline Silicon Cell ขนาด 20 Watts
   1.2 Single Crystalline Silicon Cell ขนาด 30 Watts
2. จัดทำชุดโหลด จำนวน 8 ชุด
3. จัดหาเครื่องวัดกระแสและแรงดัน

4. ทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน
5. ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการแสดงกราฟความสัมพันธ์
6. ออกแบบเอกสารประกอบการสอน หัวข้อ ปฏิบัติคุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
7. จัดทำสื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (Software)

1.4 โครงสร้างของโครงงาน

โครงสร้างของโครงงานแสดงได้ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงงาน

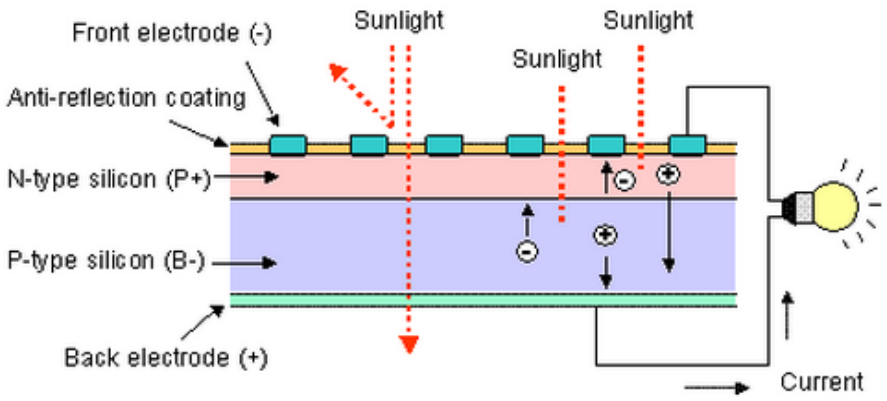
1.5 ประโยชน์ของโครงงาน

1. ทำให้เข้าใจคุณสมบัติและพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ
2. ทำให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) กับแรงดัน (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์
3. ได้แบบจำลองที่ใช้ในการหาจุดสูงสุดในการจ่ายกำลังงาน(Maximum Power Point, MPP)
4. เกิดการเรียนรู้ในการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิผล

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ [2]

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็คตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ตามภาพที่ 2.1

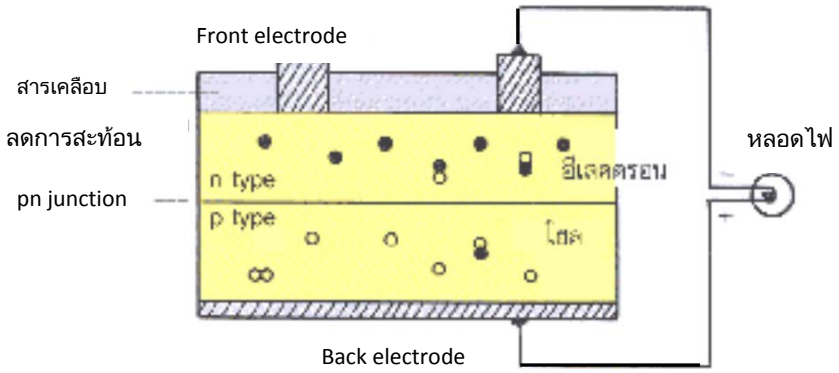


ภาพที่ 2.1 หลักการทำงานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

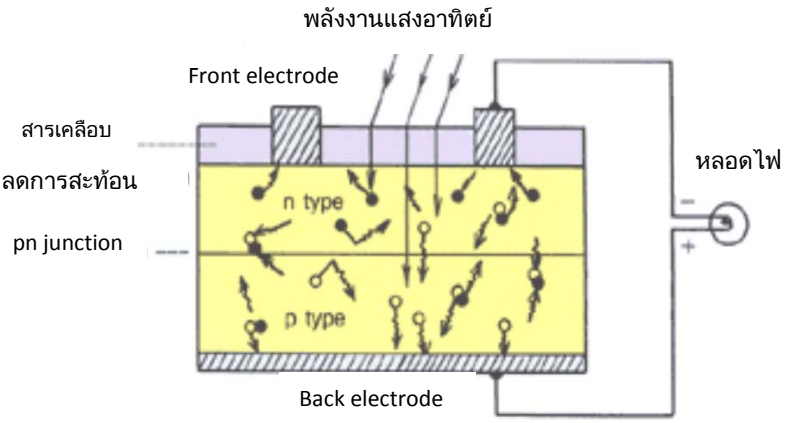
1. n - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ p - type ซิลิคอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน(โฮล) เมื่อรับพลังงาน จากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย p - n junction จึงทำให้เกิดเป็น " เซลล์แสงอาทิตย์ " ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด n - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n - type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่

เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน p - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนให้เป็นโฮลแต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล ตามภาพที่ 2.2



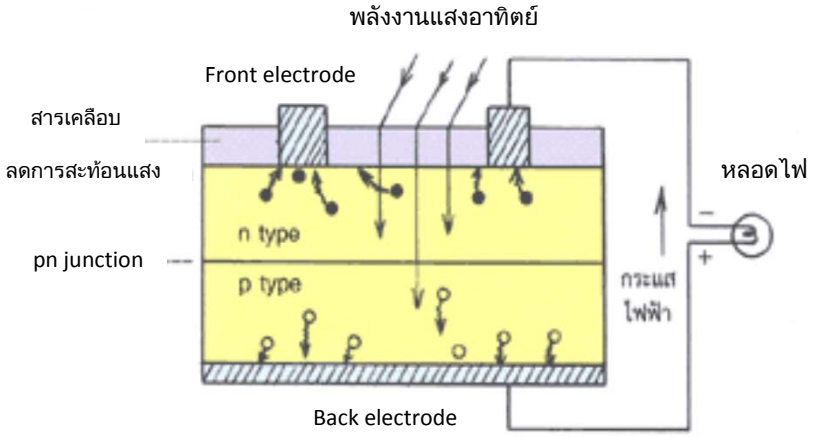
ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2. เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p type ตามภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

3. อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Elec trode ให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน ตามภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆคือ

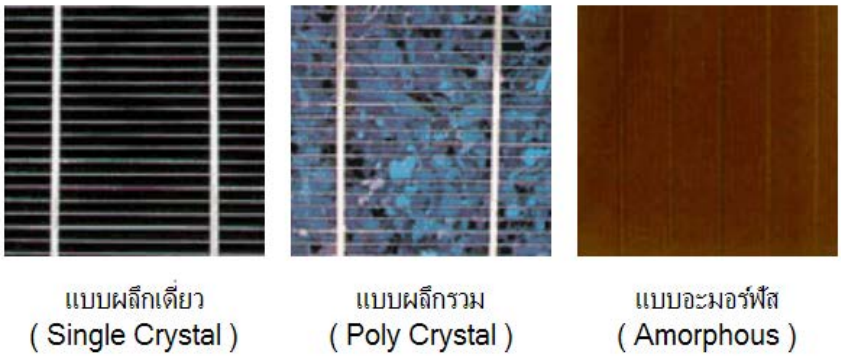
1. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน จะแบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น คือ แบบที่เป็น รูปผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) แบบที่เป็นรูปผลึก จะแบ่งออกเป็น2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) แบบที่ไม่เป็นรูปผลึก คือ ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

2. กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน ซึ่งประเภทนี้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25% ขึ้นไป แต่มีราคาสูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลงและนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต (ปัจจุบันนำมาใช้เพียง 7 % ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด)

ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ผลิตจากซิลิกอน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystaline Silicon Cell)
2. ซิลิกอนแบบหลายผลึก (Poly Crystaline Silicon Cell)
3. ซิลิกอนแบบไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous Silicon Cell)

แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอนชนิดต่างๆ

2.3 คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

1. ความเข้มของแสง กระแสไฟ (Current) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้ม ของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 mW ต่อ ตร.ซม. หรือ 1,000 W ต่อ ตร.เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 mW ต่อ ตร.

ซม. หรือ 750 W ต่อ ตร.เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง

2. อุณหภูมิ กระแสไฟ (Current) จะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลท์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศา C เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ Voc) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศา C ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศา C จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศา C เช่น อุณหภูมิ 30 องศา C จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% (0.5% x 5 องศา C) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ Voc จะลดลง 0.525 V (21 V x 2.5%) เหลือเพียง 20.475 V (21V – 0.525V) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย

2.4 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะสมบัติเอาต์พุต (Output Characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

1. ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency) คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อาจเรียกสั้นๆ ว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และใช้สัญลักษณ์ว่า η เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตสูงสุด} \times 100\%}{\text{พื้นที่รับแสง} \times \text{กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์}}$$

$$\eta = \frac{P_{max}(W)}{Area(m^2) \times P_{in}(W)} \times 100\% \qquad (2.1)$$

โดยที่

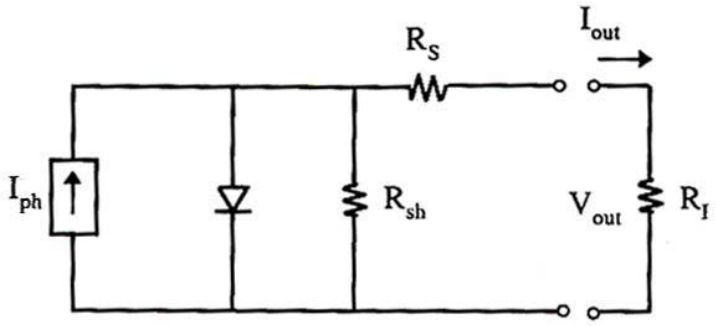
η คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตสูงสุด

$Area(m^2)$ คือ พื้นที่รับแสง

$P_{in}(W)$ คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์

2. กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current) ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจร เราเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current: I_{sc})



ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

ภาพที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด I และแรงดันไฟฟ้า V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพมืดจะมีรูปเหมือนกับสมการของกระแสไฟฟ้าของไดโอด กล่าวคือ

$$I_o = qA\left[\frac{D_h p_n}{L_h} + \frac{D_e n_p}{L_e}\right] \quad (2.2)$$

$$I = I_0\left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \quad (2.3)$$

โดยที่

I_o คือ กระแสไฟฟ้าย้อนอิ่มตัว

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ค่าคงที่ 1.6 x 10^{-9} C

A คือ พื้นที่รับแสง

D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล

D_e คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอน

L_h คือ ระยะทางแพร่ซึมของโฮล

L_e คือ ระยะทางแพร่ซึมของอิเล็กตรอน

n_p คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ในชั้น p

p_n คือ จำนวนโฮลต่อพื้นที่ในชั้น n

โดยที่ I_o เรียกว่า กระแสไฟฟ้าย้อนอิ่มตัว และ n คือค่าแฟกเตอร์ I กระแสไฟฟ้าโฟโต I_{ph} (I_{sc}) ดังนี้

$$I_{out} = I - I_{ph} \tag{2.4}$$

ในที่นี้ $I_{ph}(= I_{sc})$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และถ้าให้ A คือพื้นที่รับแสง จะได้ว่า

$$I_{sc} = qA \int_0^{\infty} F(\lambda)\eta_{ext}(\lambda)d\lambda \tag{2.5}$$

โดยที่

$F(\lambda)$ คือ โฟตอนฟลักซ์ ซึ่งหมายถึงจำนวนโฟตอนต่อหน่อวยพื้นที่และหน่วยเวลาที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

$\eta_{ext}(\lambda)$ คือ ประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะภายนอก

ถ้าพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม R_s และความต้านทานชันต์ R_{sh} ด้วย จะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{out} มีค่าดังนี้

$$I_{out} = I_0 \left[exp\left\{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right\} - 1\right] + \frac{V-IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \tag{2.6}$$

โดยที่

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าย้อนอิ่มตัว

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ค่าคงที่ 1.6×10^{-9} C

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

R_{sh} คือ ความต้านทานชันต์

I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าโฟโต

3. แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage) ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรเปิด (Open circuit) แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage: V_{0c}) ค่า V_{0c} คำนวณได้จากสมการที่ 2.7 โดยแทนค่า I_{0ut} ดังนั้นจึงได้ว่า

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left[\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right] \quad (2.7)$$

โดยที่

n คือ จำนวนอิเล็กตรอน

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าย้อนอิ่มตัว

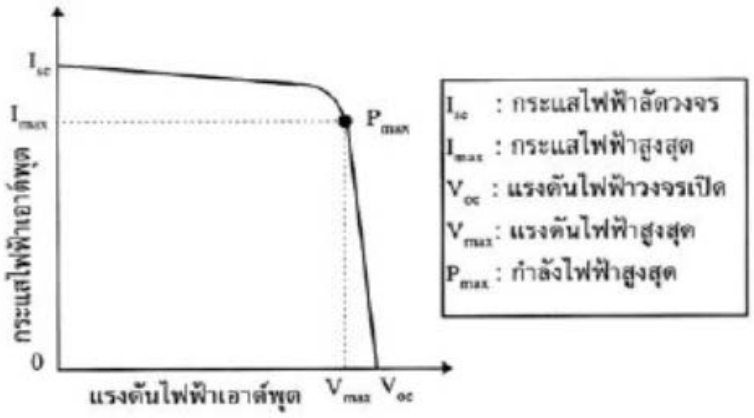
q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ค่าคงที่ 1.6×10^{-9} C

ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้าคือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{max} (Maximum Power) ที่เราจะได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟลักษณะสมบัตินี้ซึ่งแสดงด้วยเส้นไข่ปลาในรูปที่ 2.7ถ้าให้ V_{max} (Maximum Voltage) และ I_{max} (Maximum Current) คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (2.8)$$

เราสามารถคำนวณหาค่า V_{max} ได้ด้วยการหาค่าอนุพันธ์ของ P_{max} เทียบกับ V_{max} และกำหนดให้

$$\frac{\partial P_{max}}{\partial V_{max}} = 0 \quad (2.9)$$



ภาพที่ 2.7 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

$$exp\left(\frac{qV_{max}}{nkT}\right)\left(1+\frac{qV_{max}}{nkT}\right)=\left(\frac{I_{sc}}{I_0}+1\right) \tag{2.10}$$

ด้วยวิธีการคำนวณในทำนองเดียวกัน I_{max} จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{max}=\frac{(I_{sc}+I_0)\frac{qV_{max}}{nkT}}{1+\frac{qV_{max}}{nkT}} \tag{2.11}$$

โดยที่

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าย้อนอิ่มตัว

V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ค่าคงที่ 1.6×10^{-9} C

สมการที่ 2.9 และ 2.10 ชี้ให้เราทราบว่า P_{max}จะมีค่ามากเมื่อ I_0 มีค่าน้อย (นั่นก็คือ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำควรมีค่ากว้างพอสมควร) และ n มีค่าน้อย

4. ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor) เอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor) เขียนย่อว่า FF นิยามของ FF คืออัตราส่วนของพื้นที่ของ $V_{max} \times I_{max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} \times I_{sc}$ และเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.12)$$

$$= \frac{V_{max}}{V_{oc}} \left[1 - \frac{exp(qV_{max}/nkT) - 1}{exp(qV_{oc}/nkT) - 1} \right] \quad (2.13)$$

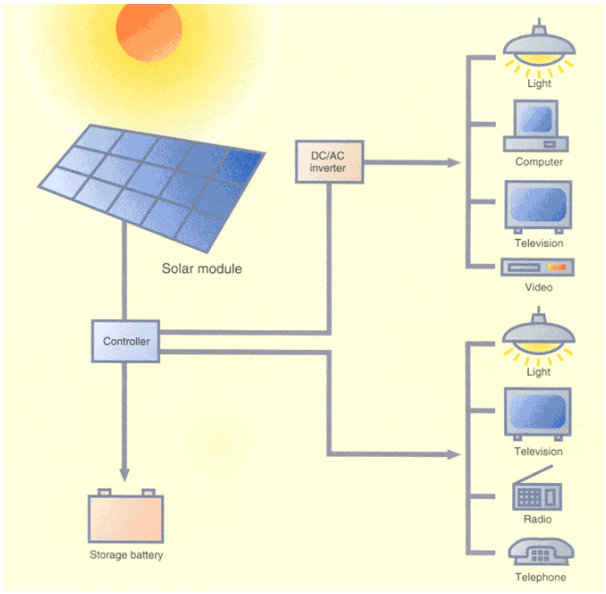
ถ้าความต้านทานอนุกรม R_s ในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ฟิลล์แฟกเตอร์ FF มีค่ามาก ถ้าเราทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น เราจะสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.14)$$

2.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

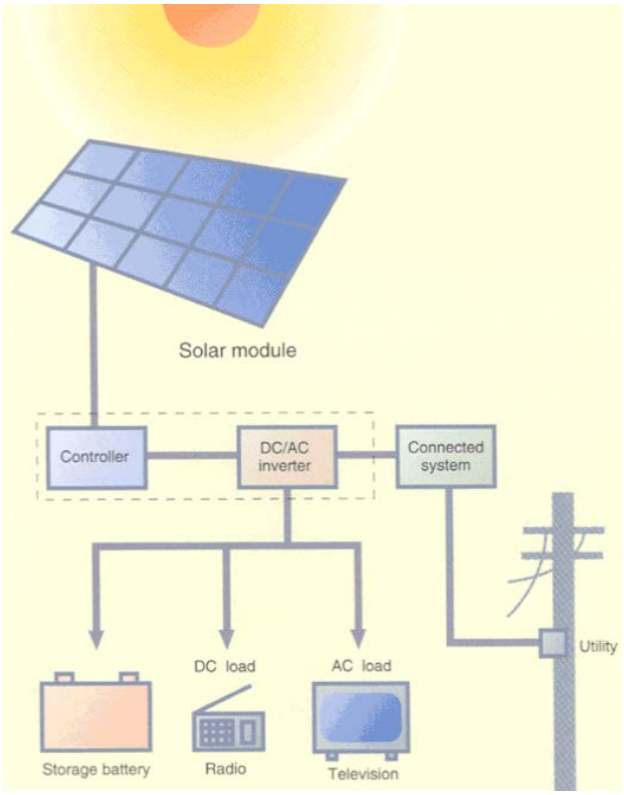
การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

1. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ



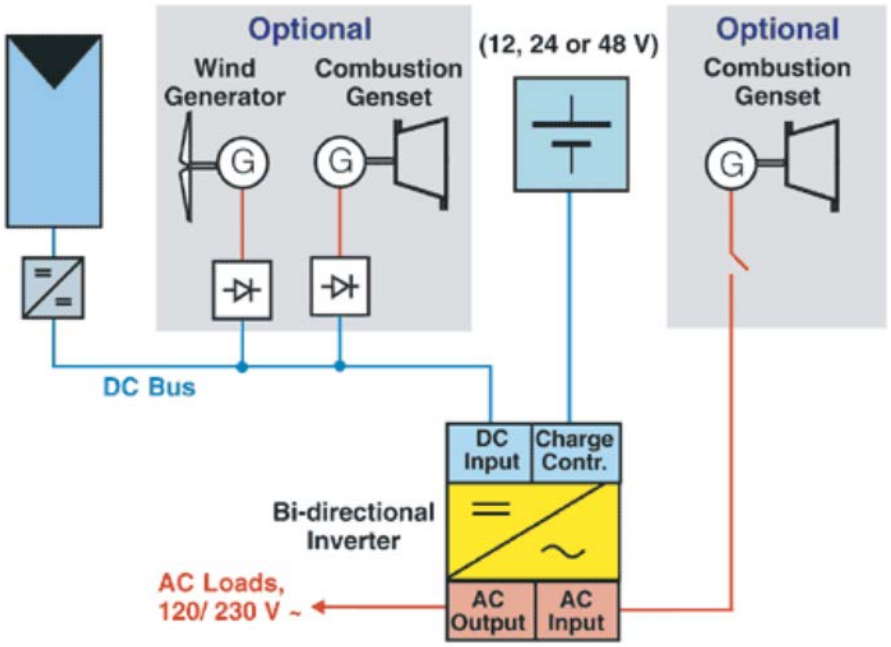
ภาพที่ 2.8 PV Stand Alone System

2. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 2.9 PV Grid Connected System

3. การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ



ภาพที่ 2.10 PV Hybrid System

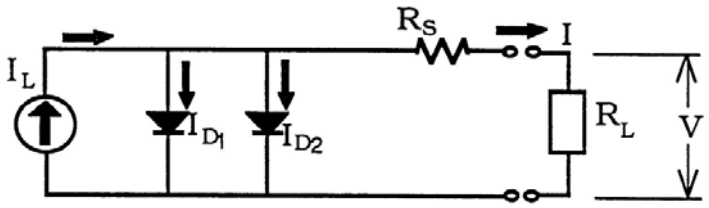
2.6 แบบจำลอง I-V [1]

แบบจำลอง I-V ที่จะกล่าวถึงนี้อ้างอิงจากวิทยานิพนธ์เรื่อง A METHOD FOR ESTIMATING THE LONG-TERM PERFORMANCE OF DIRECT-COUPLED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS โดย TIMOTHY U. TOWNSEND MASTER OF SCIENCE (Mechanical Engineering) I UNIVERSITY OF WISCONSIN – MADISON โดยมีทั้งหมด 6 แบบจำลองดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 I-V Curve Model

Acronym	**Model Description**
2M6P	Lumped,2 Mechanism model with 6 Parameters
2M5P	Lumped,2 Mechanism model with 5 Parameters
L4P	Lumped,1 Mechanism model with 4 Parameters
L3P	Lumped,1 Mechanism model with 3 Parameters
MIT	Mass. Inst. Fo Tech. model, developed by TRW Corp.; a hybrid between the L4P and L3P models, used in TRNAYA/MIT and also by New Mexico Solar Energy Inst.
LINEAR	Simple linear model for calculating maximum power output only; used in PV f-Chart, PVFORM, and other simplified programs.

1. Lumped, 2 Mechanism, 6 Parameter Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้เป็นการประเมินผลในระยะยาวมี R_s(Series Resistance) ประกอบอยู่ด้วย โดยจะถูกเรียกว่าแบบจำลอง 2M6P ซึ่งมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 Two Mechanism, Six Parameter Equivalent Circuit

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \tag{2.15}$$

$$I_{D1} = I_{o1}\left[exp\left[\frac{q}{\gamma_1 kT_c} \times (V + IR_s)\right] - 1\right] \tag{2.16}$$

$$I_{D2} = I_{o2}\left[exp\left[\frac{q}{\gamma_2 kT_c} \times (V + IR_s)\right] - 1\right] \quad (2.17)$$

$$I = I_L - I_{o1}\left[exp\left[\frac{q[V+IR_s]}{\gamma_{1kT_c}}\right] - 1\right] - I_{o2}\left[exp\left[\frac{q[V+IR_s]}{\gamma_2 kT_c}\right] - 1\right] \quad (2.18)$$

6 Parameters ของวงจรนี้คือ

I_L = Light Current

I_{o1} = Reverse Saturation Current

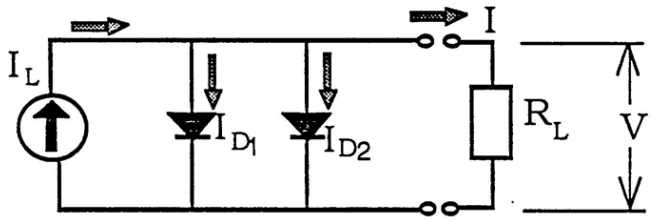
I_{o2} = Reverse Saturation Current

γ_1 = A_1 x (NCS)

γ_2 = A_2 x (NCS)

R_s = Series Resistance

2. Lumped,2 Mechanism, 5 Parameters Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้มีความต้านทานเล็กน้อยหรือเทียบเท่าไม่มีความต้านทานเลยหรือไม่มี Series Resistance เรียกแบบจำลองนี้ว่า “2M5P” มีวงจรสมมูลดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 Two Mechanism, Five Parameter Equivalent Circuit

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (2.19)$$

$$I_{D2} = I_{o2}\left[exp\left[\frac{qV}{\gamma_2 kT_c}\right] - 1\right] \quad (2.20)$$

$$I = I_L - I_{o1}\left[exp\left[\frac{qV}{\gamma_1 kT_c}\right] - 1\right] - I_{o2}\left[exp\left[\frac{qV}{\gamma_2 kT_c}\right] - 1\right] \qquad (2.21)$$

5 Parameters ของวงจรนี้คือ

I_L = Light Current

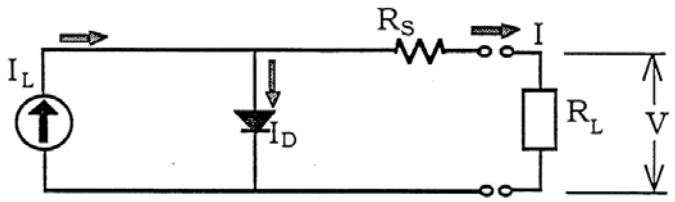
I_{o1} = Reverse Saturation Current

I_{o2} = Reverse Saturation Current

γ_1 = A1 x (NCS)

γ_2 = A2 x (NCS)

3. Lumped, 1 Mechanism, 4 Parameter Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้ตั้งสมมุติฐานโดยคิดกลไกเพียงไดโอดเพียงตัวเดียว มีวงจรสมมูลดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 Single Mechanism, Four Parameter Equivalent Circuit

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$I = I_L - I_D \qquad (2.22)$$

$$I_D = I_o\left[exp\left[\frac{q}{\gamma kT_c} \times [V + IR_s]\right] - 1\right] \qquad (2.23)$$

$$I = I_L - I_{o1}\left[exp\left[\frac{q}{\gamma kT_c} \times [V + IR_s]\right] - 1\right] \qquad (2.24)$$

4 Parameters ของวงจรนี้คือ

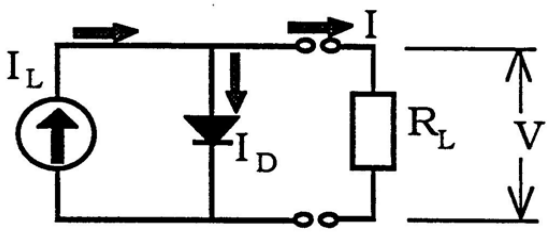
I_L = Light Current

I_o = Reverse Saturation Current

γ = A x (NCS)

R_S = Series Resistance

4. Lumped, 1 Mechanism, 3 Parameter Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้ความต้านทานเป็นศูนย์ และมีไดโอดเพียงตัวเดียวเพื่อจะอธิบายพฤติกรรมของไดโอดที่ไม่เหมาะสม มีวงจรสมมูลดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 Single Mechanism Three Parameter Equivalent Circuit

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$I = I_L - I_D \tag{2.25}$$

$$I_D = I_o \left[exp \left[\frac{q}{\gamma k T_c} \right] - 1 \right] \tag{2.26}$$

$$I = I_L - I_o \left[exp \left[\frac{qV}{\gamma k T_c} \right] - 1 \right] \tag{2.27}$$

3 Parameters ของวงจรนี้คือ

I_L = Light Current

I_o = Reverse Saturation Current

γ = A x (NCS)

5. MIT I-V Model Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้เป็นการผสมระหว่าง L3P และ L4P ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้รูปแบบโมเดลนี้ เนื่องจากทำความเข้าใจได้ง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

$$I = I_{sc}\left[1 - C_1\left(exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1\right)\right] \tag{2.28}$$

ค่าคงที่ C_1 และ C_2 หาดังนี้

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}}\right) exp\left(\frac{-V_{MP}}{C_2 V_{OC}}\right) \tag{2.29}$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}}\right)} \tag{2.30}$$

V_{MP} = Maximum power point voltage at reference conditions

I_{MP} = Maximum power point current at reference conditions

V_{oc} = Open circuit voltage

I_{sc} = Short circuit current

6. Linear Maximum Power Model แบบจำลอง I-V นี้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นไม่สามารถอธิบาย I-V curve ได้ มีไว้สำหรับคำนวณกำลังสูงสุด (Maximum powerpoint) สมการที่ใช้สำหรับคำนวณกำลังสูงสุดเป็นดังนี้

$$P_{MAX} = \frac{\emptyset}{\emptyset_{REF}} P_{MAX,REF}\left(1 - \beta\left(T_C - T_{C,REF}\right)\right) \tag{2.31}$$

β = Manufcturer-supplied temperature coefficient of maximum power, 1/C

$P_{MAX}, P_{MAX,REF}$ = Maximum power output at new and reference condition, W

2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะฝนตก โดย ถิรวุฒิ วงศ์สาลี,พงษ์ศิริ บุบผามาลัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2555 โดยทำการศึกษากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะมีฝนตกและไม่มีฝนตก และทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของทั้งสองสภาวะ [4]

2. เซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดย ชัชวาล เชี่ยววิทยพันธ์,ภาสกร พรเจริญนพ,เอกชัย ว่องทรัพย์สิน สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม โดยโครงงานนี้ออกแบบให้เซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้สามรถเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาศัยหลักการของตัวตรวจจับความเข้มของแสงเป็นตัววัดระดับแรงดันสูงสุดของแสงอาทิตย์ [5]

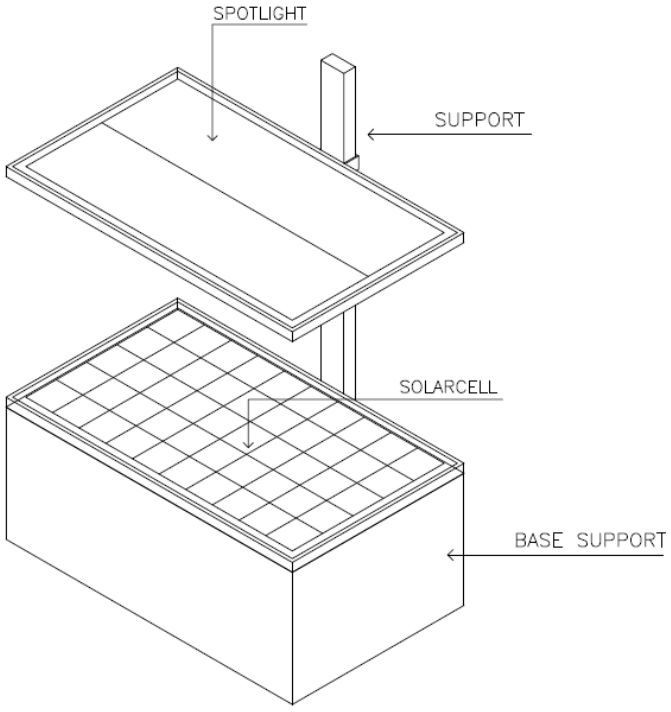
3. การศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบโซล่าเซลล์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์ โดย อุมารินทร์ แสงพานิช วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี งานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบโซล่าเซลล์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในเรื่องแรงดันกระเพื่อมเพาเวอร์แฟคเตอร์และฮาร์มอนิกที่จุดเชื่อมต่อระบบที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ในสภาวะการทำงานจริง พารามิเตอร์ในการศึกษาได้แก่ความเข้มแสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าเพาเวอร์แฟคเตอร์และฮาร์มอนิกที่จุดเชื่อมต่อระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคริสตอลไลน์ซิลิกอน [6]

บทที่ 3
การออกแบบโครงงาน

โครงงานนี้มีแนวคิดที่จะออกแบบชุดทดลองให้เป็นสื่อการเรียนรู้ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เรียนรู้ในห้องปฏิบัติการ จึงเลือกทีจะออกแบบเป็นชุดทดลองที่ใช้ทดสอบแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Mono Crystalline Silicon Cell ขนาด 30 วัตต์ และแบบ Poly Crystalline Silicon Cell ขนาด 20 วัตต์ และชุดเครื่องมือวัดกระแส และ แรงดัน

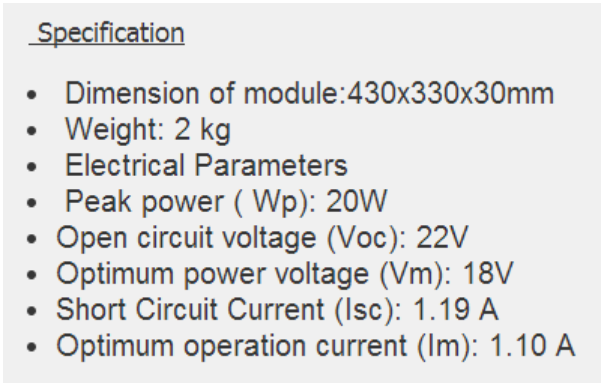
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

การออกแบบชุดทดลองโดยสร้างฐานเป็นลักษณะคล้ายกล่องเพื่อเป็นฐานสำหรับรองรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และมีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ด้านบนดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองฐานสำหรับรองรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆประกอบด้วย Ammeter DC, Voltmeter DC และความต้านทานปรับค่าได้โดยคำนวณค่าความต้านทานจากรายละเอียดข้อมูลจากผู้ผลิตตามภาพที่ 3.2


Specification

- Dimension of module:430x330x30mm
- Weight: 2 kg
- Electrical Parameters
- Peak power (Wp): 20W
- Open circuit voltage (Voc): 22V
- Optimum power voltage (Vm): 18V
- Short Circuit Current (Isc): 1.19 A
- Optimum operation current (Im): 1.10 A

ภาพที่ 3.2 ข้อมูลของแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากทางผู้ผลิตขนาด 20 วัตต์

การคำนวณค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้คำนวณจากสมการที่ 3.1 ดังนี้จากข้อมูลจะได้ว่า

$$P = V \times I \tag{3.1}$$

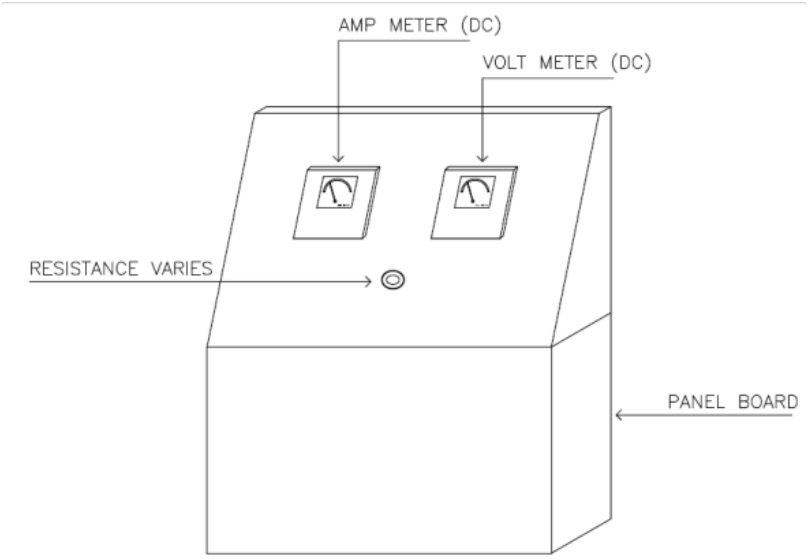
$$I = 20\ W/18\ V$$
$$I = 1.11\ A$$

เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานคำนวณจากสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$V = I \times R \tag{3.2}$$

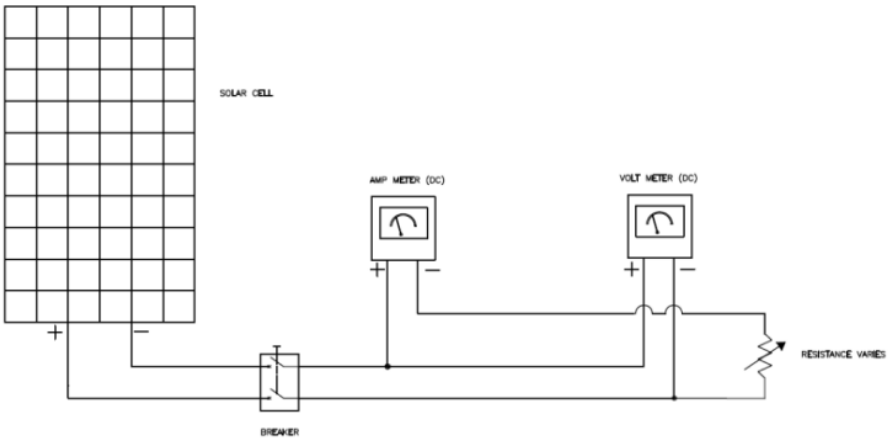
$$R = 18\ V/1.11\ A$$
$$R = 16.21\ \Omega$$

ดังนั้นความต้านทานปรับค่าได้จะใช้ขนาด 16.21 Ω และแบบจำลองของชุดเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันแสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองชุดเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ภาพจำลองวงจรของชุดทดลองแผงพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ภาพจำลองวงจรของชุดทดลองแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จากการออกแบบเบื้องต้นได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองมากยิ่งขึ้น โดยได้ออกแบบชุดฐานวางแผงพลังงานแสงอาทิตย์ดังภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 ฐานวางแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ชุดเครื่องมือวัดพารามิเตอร์ต่างๆประกอบด้วย โวลต์มิเตอร์กระแสตรง และแอมป์มิเตอร์กระแสตรงประเภทดิจิตอล 1 ชุด และมีโหลดเป็นหลอดไฟ ขนาด 3 Watts 12 Volt จำนวน 8 ดวง ดังภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 ชุดเครื่องมือวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ซึ่งหลอดไฟที่นำมาใช้เป็นโหลดสามารถคำนวณเป็นค่า Resistance ได้ดังนี้

$$P = V \times I \qquad R = V/I$$
$$I = 3\ W/12\ V \qquad R = 12\ V/0.25\ A$$
$$I = 0.25\ A \qquad R = 48\ \Omega$$

ดังนั้นหลอดไฟที่นำมาใช้เป็นโหลดจะมีค่าต่อดวงเท่ากับ 48 Ω

3.2 ชนิดของแผงที่ใช้งาน

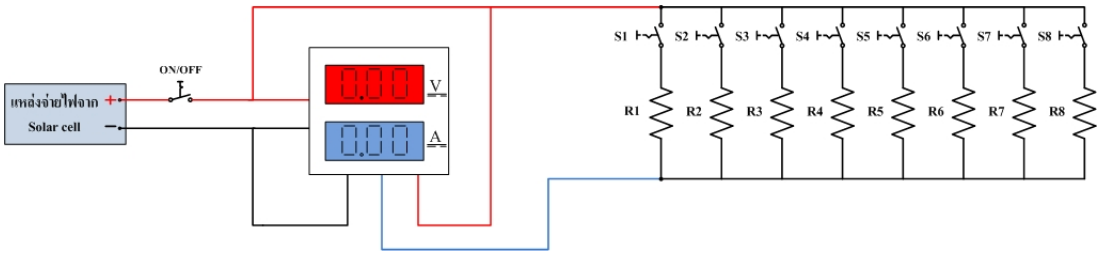
แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ศึกษาคือชนิด Mono Crystalline Silicon Cell และ Poly Crystalline Silicon Cell ส่วนชนิด Amophous นั้นปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมใช้กันจึงหาซื้อได้ยาก ทางผู้จัดทำโครงงานจึงใช้เพียง 2 ชนิดในการศึกษาเท่านั้นดังภาพที่ 3.7

(a)

(b)

ภาพที่ 3.7 (a) แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Mono Crystalline Silicon Cell ขนาด 30 W และ (b) แผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline Silicon Cell ขนาด 20 W

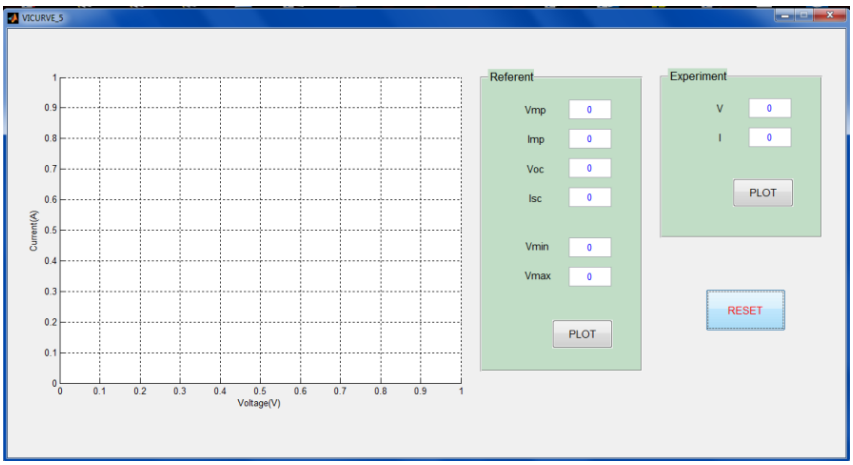
รูปวงจรของสื่อการเรียนรู้ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 วงจรของสื่อการเรียนรู้ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

3.3 โปรแกรม Matlab

เนื่องจากโครงงานนี้เป็นสื่อการเรียนรู้ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทางผู้จัดทำจึงได้ทำสื่อการเรียนรู้ที่จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ให้มากยิ่งขึ้นจึงได้ใช้โปรแกรม Matlab มาช่วยในการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม GUI ซึ่งมีอยู่ใน ตัวโปรแกรมเป็นดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 โปรแกรมสื่อการเรียนรู้ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ซึ่งในการเขียนโปรแกรมได้นำสูตรทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง MIT I-V Model มาใช้ภายในชุดคำสั่ง เพื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับผลการทดลอง ดังภาพที่ 3.10 โดยที่ตัวโปรแกรมที่เป็น Software นั้นแนบอยู่ที่ภาคผนวก

```
280
281     % --- Executes on button press in PLOT.
282     function PLOT_Callback(hObject, eventdata, handles)
283     % hObject    handle to PLOT (see GCBO)
284     % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
285     % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
286 -   set(handles.figure1,'HandleVisibility','on');
287 -   Vmin = str2num(get(handles.Vmin1,'String'));
288 -   Vmax = str2num(get(handles.Vmax1,'String'));
289 -   Vmp = str2num(get(handles.Vmp1,'String'));
290 -   Imp = str2num(get(handles.Imp1,'String'));
291 -   Voc = str2num(get(handles.Voc1,'String'));
292 -   Isc = str2num(get(handles.Isc1,'String'));
293 -   C2 = ((Vmp/Voc)-1)/(log(1-(Imp/Isc)));
294 -   C1 = (1-(Imp/Isc))*(exp(-Vmp/(C2*Voc)));
295 -   V = linspace(Vmin,Vmax,200);
296 -   I = Isc*(1-(C1*(exp(V/(C2*Voc))-1)));
297 -   LinePlot = plot(V,I);
298 -   handles.LineX = LinePlot;
299 -   xlabel('Voltage(V)');
300 -   ylabel('Current(A)');
301 -   guidata(gcbo,handles);
302 -   set(handles.figure1,'HandleVisibility','off');
```

ภาพที่ 3.10 ชุดคำสั่งที่อ้างอิงสูตรการคำนวณของแบบจำลอง MITI-V Model

และโครงงานนี้ได้ออกแบบใบงานเพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนเกี่ยวกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 1 ชุดสำหรับบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับห้องปฏิบัติการแสดงในภาคผนวก

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

1. ทำการปรับตั้งฐานวางแผงพลังงานแสงอาทิตย์ให้ทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด แล้วนำแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องการทดสอบมาวางเพื่อรับแสง

2. ต่อชุดเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันเข้ากับชุดแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากนั้นทำการวัดค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร

3. ทำการจ่ายโหลดโดยการสับสวิทช์ของหลอดไฟที่ละหลอดจนครบจำนวนหลอด

4. บันทึกค่ากระแสและแรงดันที่อ่านค่าได้แต่ละหลอด

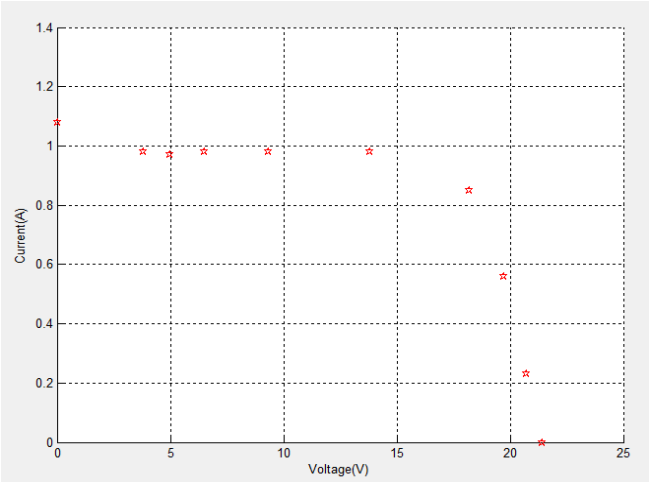
5. นำข้อมูลที่บันทึกได้ไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับ Reference เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะและพฤติกรรมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

4.2 ผลการทดลองของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ Mono Crystalline Silicon Cell ขนาด 30 W

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลครั้งที่ 1

I_{sc} = 1.08 A, V_{oc} = 21.4 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	20.70	0.23	4.761
R 2	19.70	0.56	11.032
R 3	18.20	0.85	15.47
R 4	13.80	0.98	13.524
R 5	9.32	0.98	9.1336
R 6	6.50	0.98	6.37
R 7	4.96	0.97	4.8112
R 8	3.80	0.98	3.724

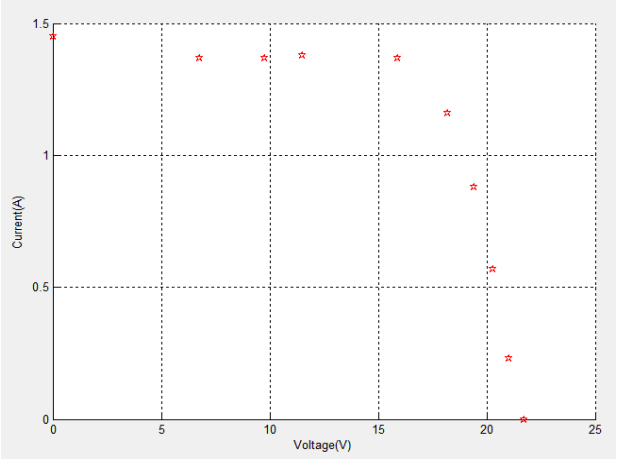


ภาพที่ 4.1 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลครั้งที่ 2

I_{sc} = 1.45 A, V_{oc} = 21.7 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	21.0	0.23	4.83
R 2	20.30	0.57	11.571
R 3	19.40	0.88	17.072
R 4	18.20	1.16	21.112
R 5	15.90	1.37	21.783
R 6	11.50	1.38	15.87
R 7	9.75	1.37	13.358
R 8	6.75	1.37	9.248

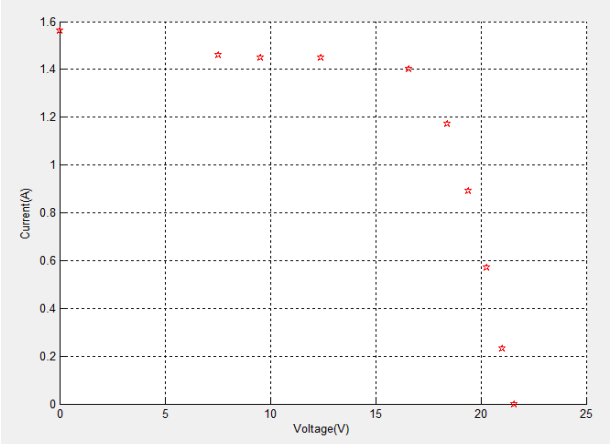


ภาพที่ 4.2 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลครั้งที่ 3

I_{sc} = 1.56 A, V_{oc} = 21.6 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	21.00	0.23	4.83
R 2	20.30	0.57	11.571
R 3	19.40	0.89	17.266
R 4	18.40	1.17	21.528
R 5	16.60	1.40	23.24
R 6	12.40	1.45	17.98
R 7	9.53	1.45	13.82
R 8	7.55	1.46	11.023

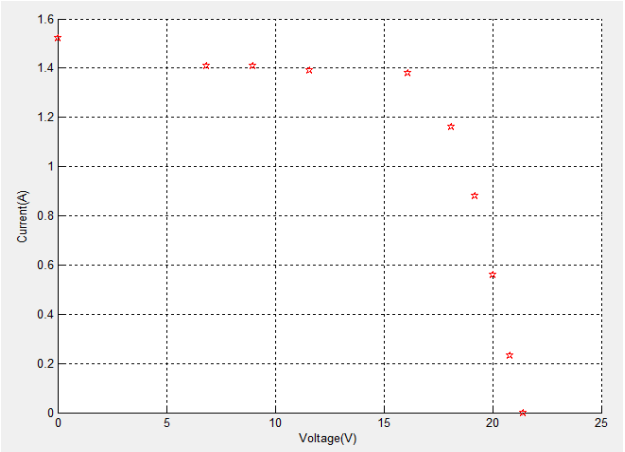


ภาพที่ 4.3 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลครั้งที่ 4

I_{sc} = 1.52 A, V_{oc} = 21.4 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	20.80	0.23	4.784
R 2	20.00	0.56	11.20
R 3	19.20	0.88	16.896
R 4	18.10	1.16	20.996
R 5	16.10	1.38	22.218
R 6	11.60	1.39	16.124
R 7	8.99	1.41	12.676
R 8	6.86	1.41	9.673

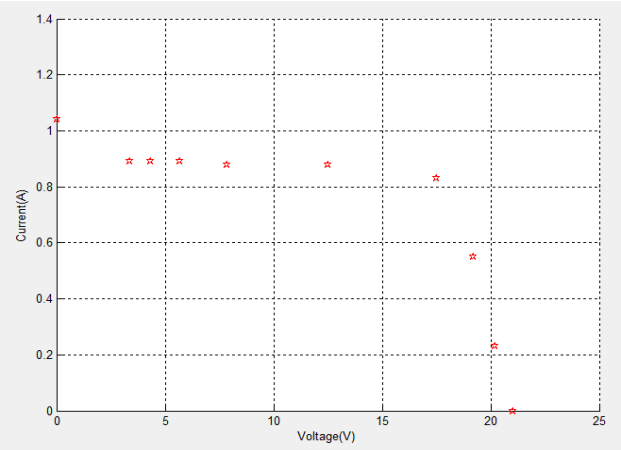


ภาพที่ 4.4 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลครั้งที่ 5

I_{sc} = 1.04 A, V_{oc} = 21.0 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	20.2	0.23	4.646
R 2	19.20	0.55	10.56
R 3	17.50	0.83	14.525
R 4	12.50	0.88	11.00
R 5	7.84	0.88	6.899
R 6	5.69	0.89	5.0641
R 7	4.34	0.89	3.8626
R 8	3.36	0.89	2.9904



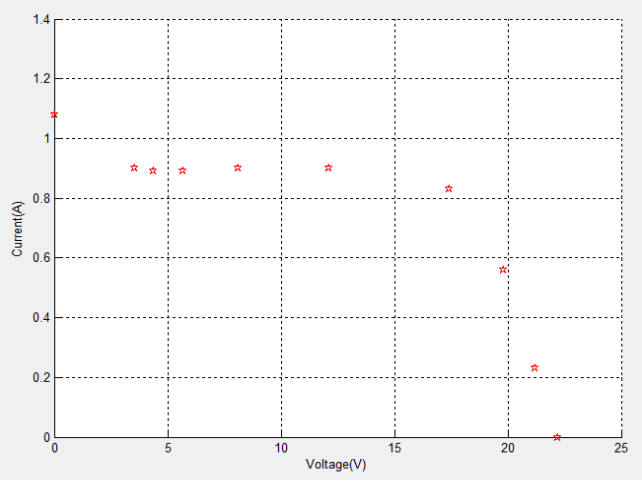
ภาพที่ 4.5 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.5

4.3 ผลการทดลองของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ Poly Crystalline Silicon Cell ขนาด 20 W

ตารางที่ 4.6 บันทึกผลครั้งที่ 1

I_{sc} = 1.08 A, V_{oc} = 22.2 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	21.20	0.23	4.876
R 2	19.80	0.56	11.088
R 3	17.40	0.83	14.442
R 4	12.10	0.90	10.89
R 5	8.12	0.90	7.308
R 6	5.69	0.89	5.064
R 7	4.35	0.89	3.871
R 8	3.55	0.90	3.195

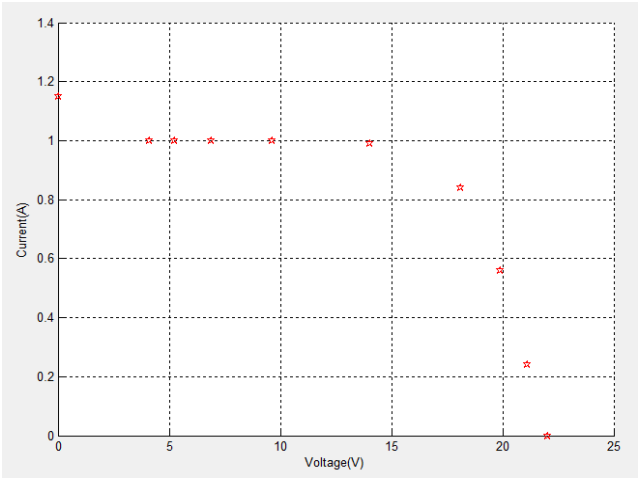


ภาพที่ 4.6 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลครั้งที่ 2

I_{sc} = 1.15 A, V_{oc} = 22.0 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	21.10	0.24	5.064
R 2	19.90	0.56	11.144
R 3	18.10	0.84	15.204
R 4	14.00	0.99	13.86
R 5	9.64	1.00	9.64
R 6	6.90	1.00	6.90
R 7	5.25	1.00	5.25
R 8	4.13	1.00	4.13

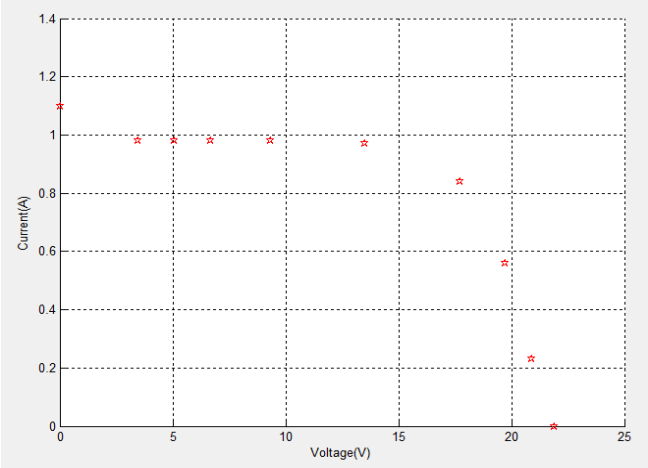


ภาพที่ 4.7 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลครั้งที่ 3

I_{sc} = 1.10 A, V_{oc} = 21.9 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	20.90	0.23	4.807
R 2	19.70	0.56	11.032
R 3	17.70	0.84	14.868
R 4	13.50	0.97	13.095
R 5	9.34	0.98	9.1532
R 6	6.67	0.99	6.6033
R 7	5.07	0.98	4.9686
R 8	3.44	0.98	3.3712

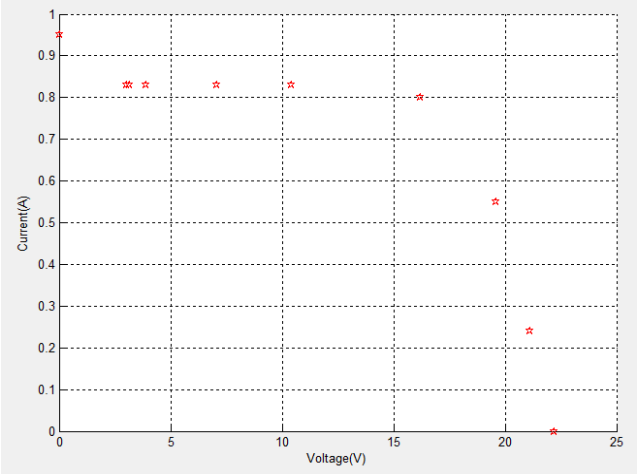


ภาพที่ 4.8 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลครั้งที่ 4

I_{sc} = 0.95 A, V_{oc} = 22.2 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	21.10	0.24	5.064
R 2	19.60	0.55	10.78
R 3	16.20	0.80	12.96
R 4	10.4	0.83	8.632
R 5	7.07	0.83	5.868
R 6	3.88	0.83	3.2204
R 7	3.15	0.83	2.6145
R 8	3.00	0.83	2.49

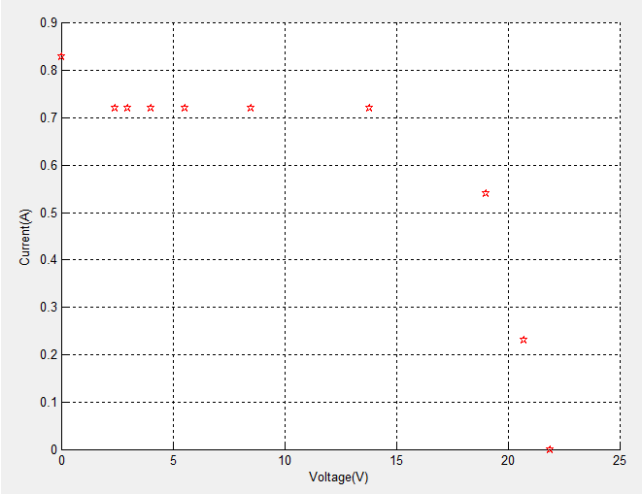


ภาพที่ 4.9 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 บันทึกผลครั้งที่ 5

I_{sc} = 0.83 A, V_{oc} = 21.9 V

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
R 1	20.70	0.23	4.761
R 2	19.00	0.54	10.26
R 3	13.80	0.72	9.936
R 4	8.50	0.72	6.12
R 5	5.53	0.72	3.9816
R 6	4.00	0.72	2.88
R 7	2.98	0.72	2.1456
R 8	2.42	0.72	1.7424

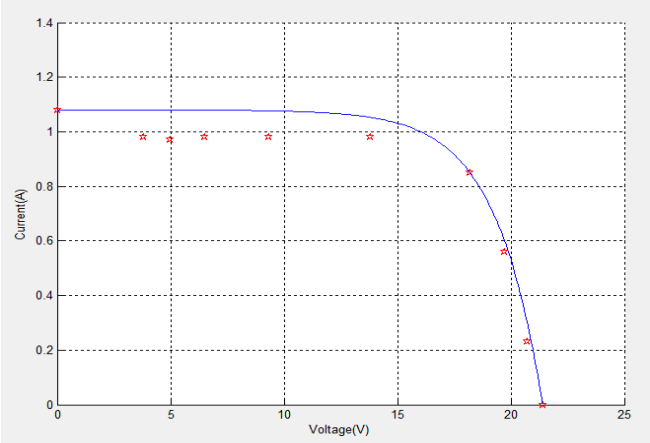


ภาพที่ 4.10 แสดงกระแสและแรงดันของตารางที่ 4.10

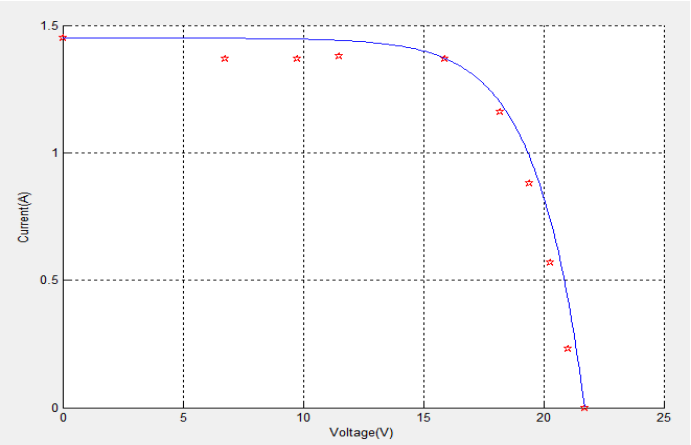
4.4 ผลการทดลอง

1. การทดลองแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Mono Crystalline Silicon Cell ขนาด 30 Watts ได้ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง ผลการทดลองได้ค่ากระแสและแรงดันตามตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ และเมื่อนำค่ากระแสและแรงดันของการทดลองแต่ละครั้งมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันจะได้ดังภาพที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ตามลำดับ

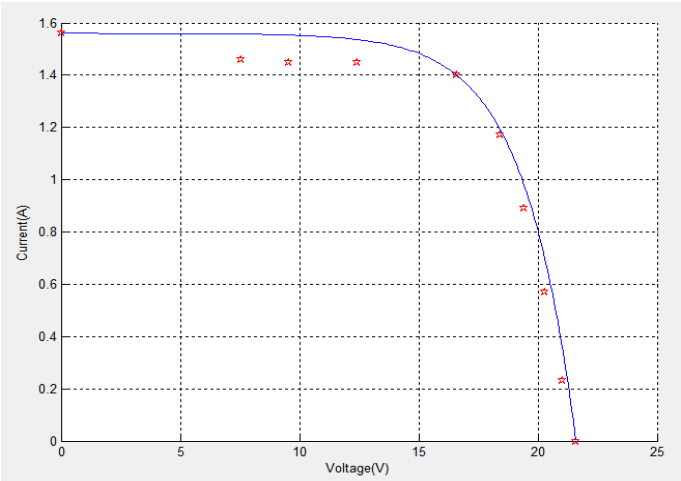
จากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มโหลดเข้าไปจะพบว่าค่าแรงดันที่วัดได้จะมีค่าลดลง ส่วนกระแสที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งค่ากระแสจะเริ่มคงที่ และจะมีจุดหนึ่งที่จะมีการจ่ายค่ากำลังงานสูงสุดดังที่ได้ทำการป้ายแถบสีไว้ในแต่ละตารางการทดลอง เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันของการทดลองในแต่ละครั้งมาพล็อตเทียบกับ V-I Curve ที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ของแผงจากทางผู้ผลิตจะแสดงดังภาพที่ 4.11, 4.12, 413, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



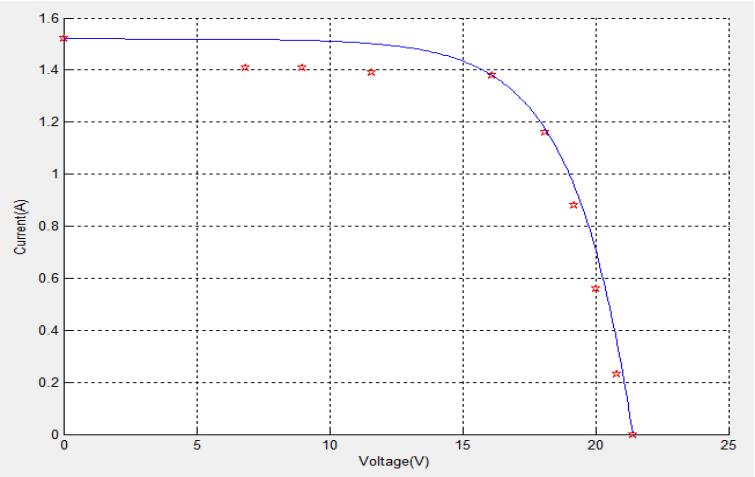
ภาพที่ 4.11 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.1



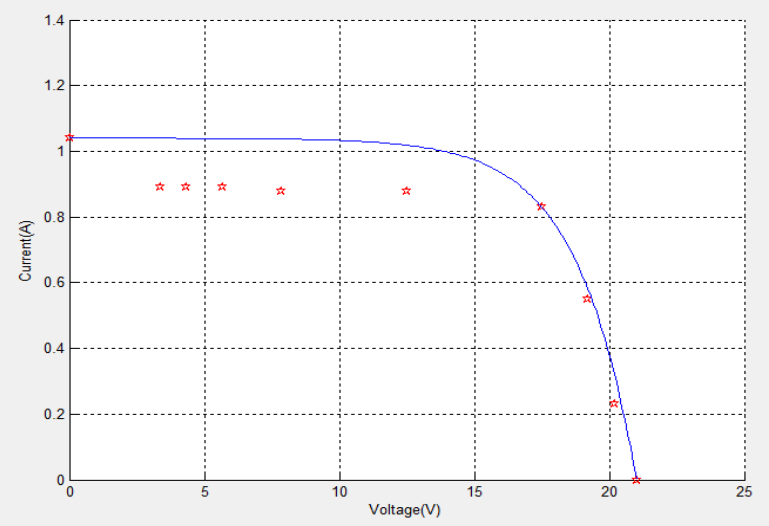
ภาพที่ 4.12 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.13 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.3



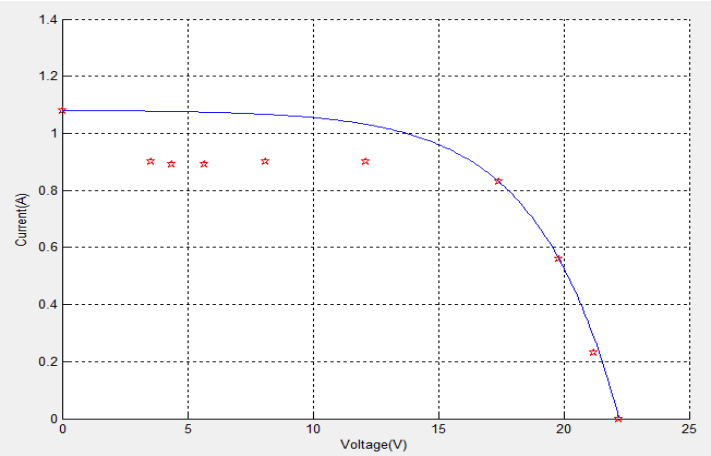
ภาพที่ 4.14 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.4



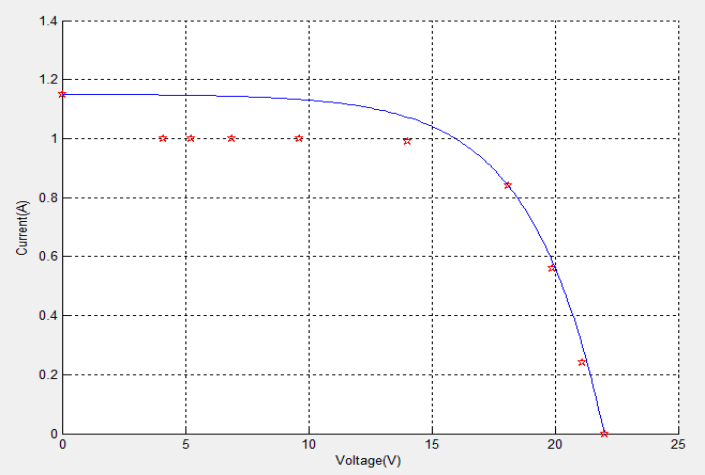
ภาพที่ 4.15 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.5

2. การทดลองแผงพลังงานแสงอาทิตย์ชนิด Poly Crystalline Silicon Cell ขนาด 20 Watts ได้ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง ผลการทดลองได้ค่ากระแสและแรงดันตามตารางที่ 4.6 , 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ และเมื่อนำค่ากระแสและแรงดันของการทดลองแต่ละครั้งมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันจะได้ดังภาพที่ 4.6, 4.7, 4.8, 4.9,4.10 ตามลำดับ

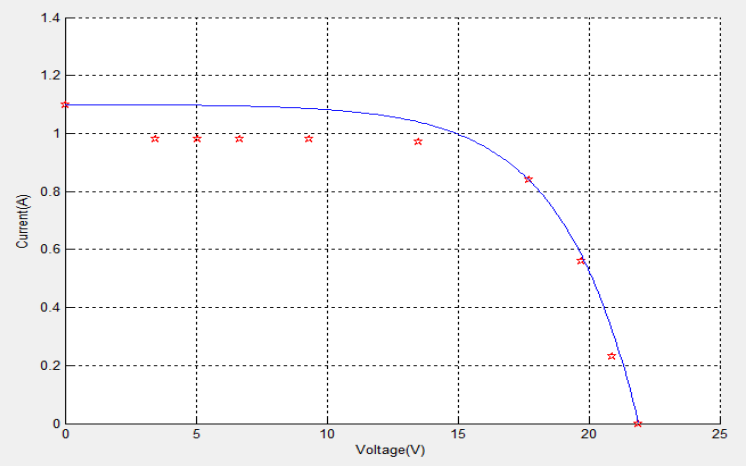
จากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มโหลดเข้าไปจะพบว่าค่าแรงดันที่วัดได้จะมีค่าลดลง ส่วนกระแสที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งค่ากระแสจะเริ่มคงที่ และจะมีจุดหนึ่งที่จะมีการจ่ายค่ากำลังงานสูงสุดดังที่ได้ทำการป้ายแถบสีไว้ในแต่ละตารางการทดลอง เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันของการทดลองในแต่ละครั้งมาพล็อตเทียบกับ V-I curve ที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ของแผงจากทางผู้ผลิตจะแสดงดังภาพที่ 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 และ 4.20



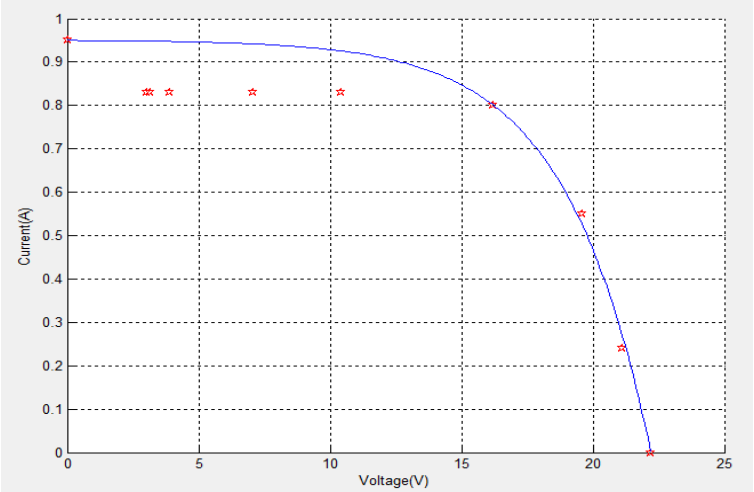
ภาพที่ 4.16 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Modelของตารางที่ 4.6



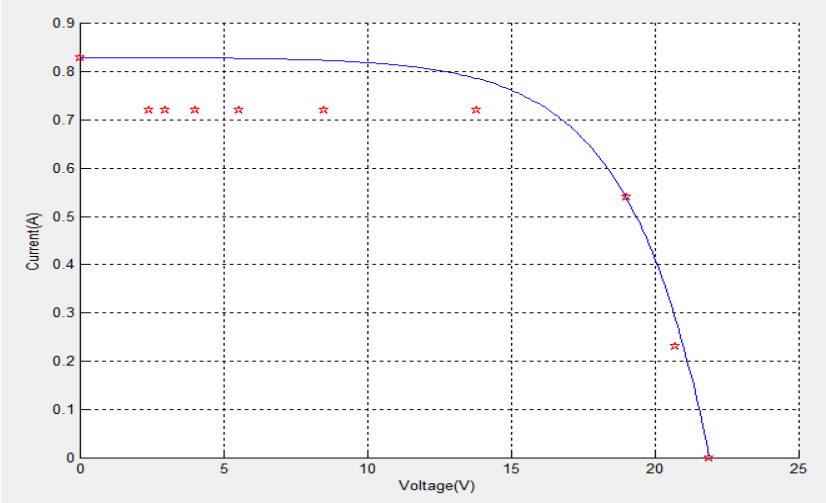
ภาพที่ 4.17 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.18 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.19 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.9



ภาพที่ 4.20 แสดงกระแสและแรงดันจากการทดลองเปรียบเทียบกับ MIT I-V Model ของตารางที่ 4.10

บทที่ 5
สรุป

โครงงานสื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้ศึกษาแผงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด 2 ชนิด คือ Single Crystalline Silicon Cell และ Poly Crystalline Silicon Cell ที่ผู้จัดทำโครงงานได้ทดลอง ด้วยการใช้โปรแกรมจำลองของกระแส และแรงดัน พบว่าสอดคล้องกับสมการของแบบจำลองที่นำมาศึกษาคือ MIT I-V Model และชุดปฏิบัติการที่จัดทำขึ้นนั้น สามารถสะท้อนให้เห็นคุณสมบัติและพฤติกรรมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยให้เป็นสื่อการเรียน การสอน ในเรื่องคุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากโครงงานนี้จะสังเกตได้ว่าค่ากระแส และแรงดันจากการทดลองนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ จากสเป็กของแผงที่พล็อตออกมาเป็น Reference นั้น ค่าจากการทดลองจะอยู่ต่ำกว่าเส้น กราฟดังกล่าว เนื่องจากสเป็กของแผงจากผู้ผลิตนั้นได้ทดสอบจากค่า 1000 W/m^2 ซึ่งการทดลองจริงนั้นไม่สามารถกำหนดแสงอาทิตย์ให้อยู่ในค่าที่ผู้ผลิตได้กำหนดมา กราฟที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าที่ไม่ใกล้เคียงมากนักกับเส้น Reference ที่กำหนดมากับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็มีแนวโน้มแบบเดียวกันกับกราฟ Reference ของทางผู้ผลิต

โครงงานนี้ได้ใช้โปรแกรม GUI เป็นสื่อการเรียนรู้ให้เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณสมบัติของแผงพลังงาแสงอาทิตย์ซึ่งโปรแกรมที่จัดทำขึ้นมานั้นทำให้เห็นภาพได้อย่างชัดเจน และสูตรทางคณิตศาสตร์ของ MIT I-V Model นั้น ไม่ยุ่งยากไม่มีความซับซ้อนจึงเหมาะที่จะนำมาเป็นสื่อการเรียนรู้เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายแก่ผู้ที่สนใจและต้องการศึกษา

การทดลองของโครงงานสื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เบื้องต้นได้ศึกษาแผงพลังงานทั้งหมด 3 ชนิด แต่ตามท้องตลาดมีจำหน่ายเพียง 2 ชนิด คือ Single Crystalline Silicon Cell และ Poly Crystalline Silicon Cell จึงได้ทำการทดลองเพียง 2 ชนิด ในระหว่างที่ทำการทดลองนั้นพบปัญหาในการทดลองคือในช่วงเวลาของแต่ละวันนั้นแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากปัจจัยของสภาพอากาศและอุณหภูมิจึงมีผลให้แรงดันและกระแสที่วัดค่าได้ไม่คงที่

เอกสารอ้างอิง

[1] Timothy U. Townsend, “A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic system” A thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of mechanical engineering at I University of Wisconsin-Madison, 1989

[2] กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2554

[3] ดุสิต เครืองาม และคณะฯ รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 1990

[4] ถิรวุฒิ วงศ์สาลี,นายพงษ์ศิริ บุบผามาลัย “การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะฝนตก” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, พ.ศ. 2555

[5] ชัชวาล เชี่ยววิทยพันธ์, ภาสกร พรเจริญนพ, เอกชัย ว่องทรัพย์สิน “เซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์” สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, 2553

[6] อุมารินทร์ แสงพานิช “การศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบโซล่าเซลล์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์” วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545

ภาคผนวก

ตัวอย่างใบงานการทดลอง

ใบงานการทดลอง

สื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้เข้าใจคุณสมบัติและพฤติกรรมของแผงพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และแรงดัน (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์
3. เพื่อหาจุดสูงสุดในการจ่ายกำลังงาน (Maximum Power Point : MPP)

อุปกรณ์การทดลอง

1. แผงโซล่าเซลล์ชนิด Mono Crystal ขนาด 30 W
2. แผงโซล่าเซลล์ชนิด Poly Crystal ขนาด 20 W
3. แอมป์มิเตอร์กระแสตรง
4. โวท์ลมิเตอร์กระแสตรง

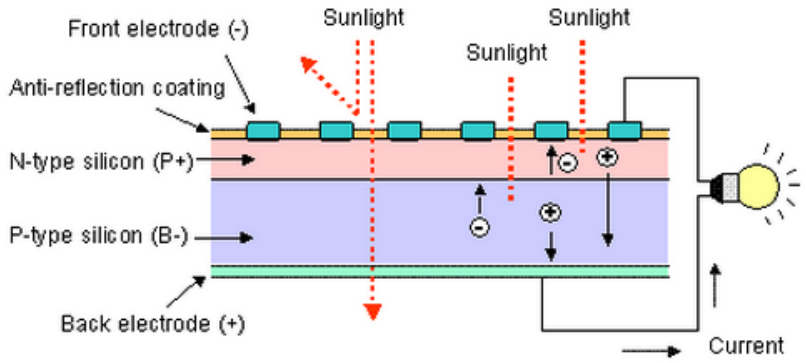
ทฤษฎีเบื้องต้น

1. บทนำ

แสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีปริมาณมาก สะอาดและไม่มีมลพิษ สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อใช้ประโยชน์ได้สูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภทมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มของแสง,อุณหภูมิ,วัสดุที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น จึงมีความสนใจที่จะศึกษา คุณสมบัติพฤติกรรม และประสิทธิภาพของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเรียนรู้และนำไปพัฒนาให้มีประโยชน์มากยิ่งขึ้น

2. หลักการทำงานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

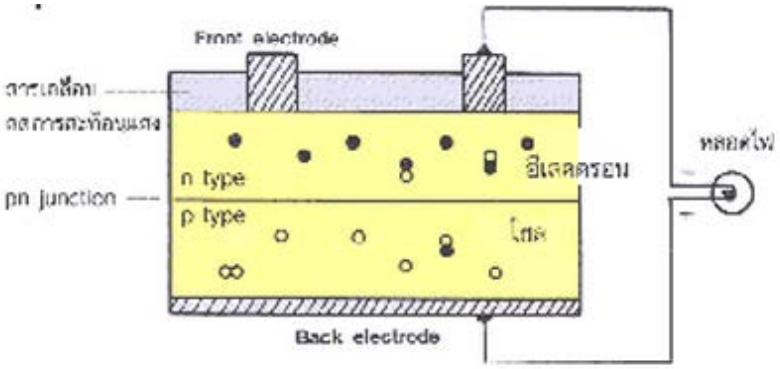
การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเลคตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ (ตามรูป)



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์

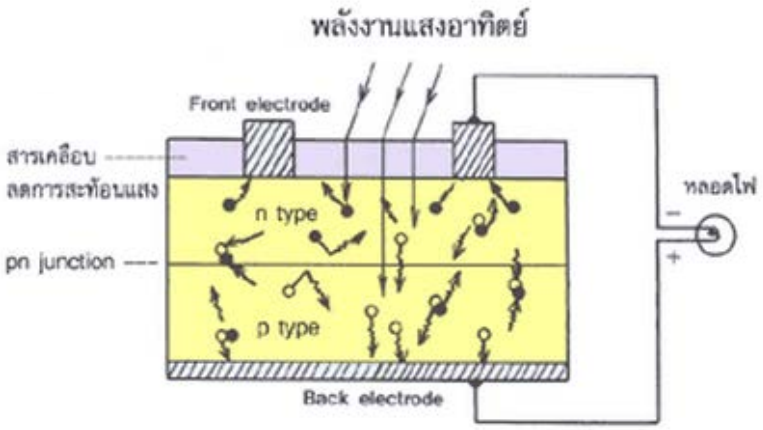
ขั้นตอนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

1. n - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ p - type ซิลิคอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโดปปิ้งด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงาน จากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย p - n junction จึงทำให้เกิดเป็น " เซลล์แสงอาทิตย์ " ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด n - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n - type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน p - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล ตามรูปที่ 2.2



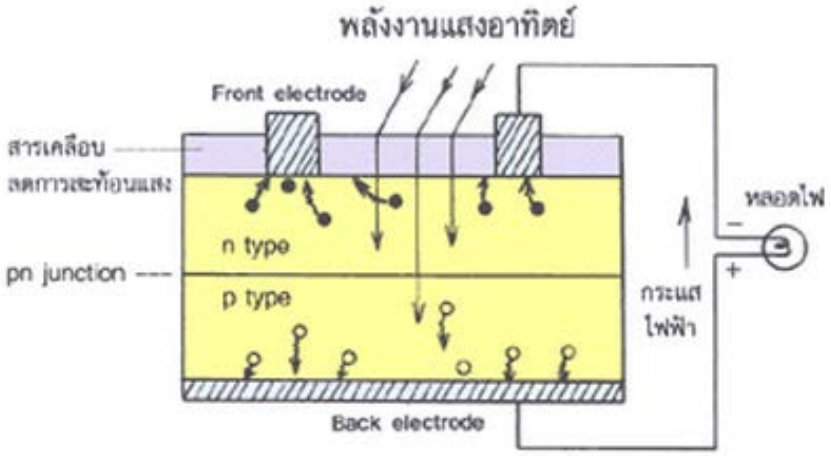
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2. เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p type ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

3. อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Elec trode ให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

3. ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

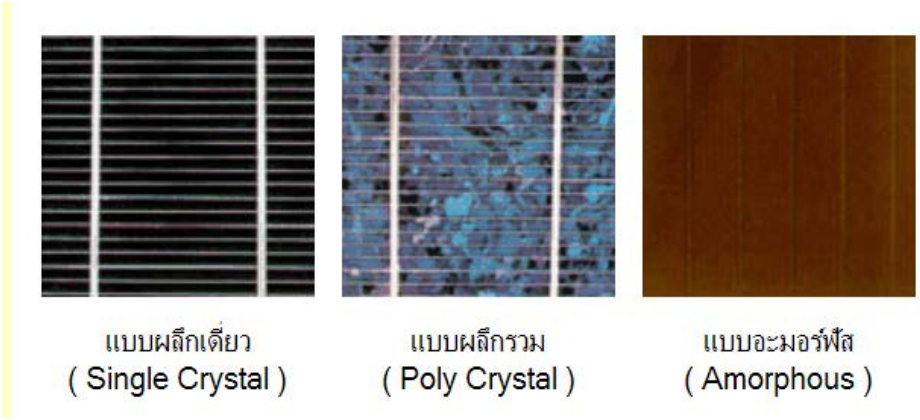
เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆคือ

3.1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน จะแบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น คือ แบบที่เป็น รูปผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) แบบที่เป็นรูปผลึก จะแบ่งออกเป็น2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell) และ ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) แบบที่ไม่เป็นรูปผลึก คือ ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

3.2 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน ซึ่งประเภทนี้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25% ขึ้นไป แต่มีราคาสูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลงและนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต (ปัจจุบันนำมาใช้เพียง 7 % ของปริมาณที่มีใช้ทั้งหมด)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ผลิตจากซิลิกอน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystaline Silicon Cell)
2. ซิลิกอนแบบหลายผลึก (Poly Crystaline Silicon Cell)
3. ซิลิกอนแบบไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous Silicon Cell)



รูปที่ 3.1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอนชนิดต่างๆ

4. ทฤษฎีแบบจำลอง MIT I-V MODEL

4.1 MIT I-V Model Equivalent Circuit แบบจำลอง I-V นี้เป็นการผสมระหว่าง L3P และ L4P ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้รูปแบบโมเดลนี้ เนื่องจากทำความเข้าใจได้ง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นดังนี้

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

ค่าคงที่ C_1 และ C_2 หาดังนี้

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}}\right) exp\left(\frac{-V_{MP}}{C_2 V_{OC}}\right)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{MP}}{V_{OC}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{MP}}{I_{SC}}\right)}$$

โดยที่

V_{MP} = Maximum power point voltage at reference conditions

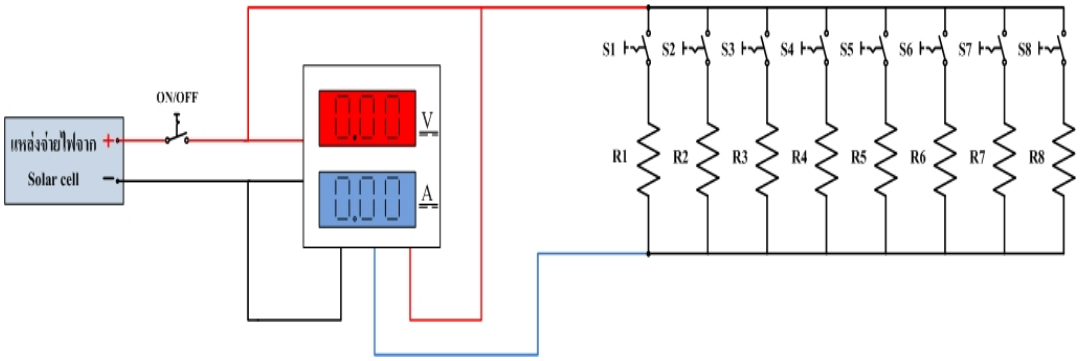
I_{MP} = Maximum power point current at reference conditions

V_{OC} = Open circuit voltage

I_{SC} = Short circuit current

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลองตามภาพ



2. บันทึกค่าลงในตาราง

2.1 ตารางค่า Mono Silicon Crystalline Cell

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
I (A)								
V(V)								

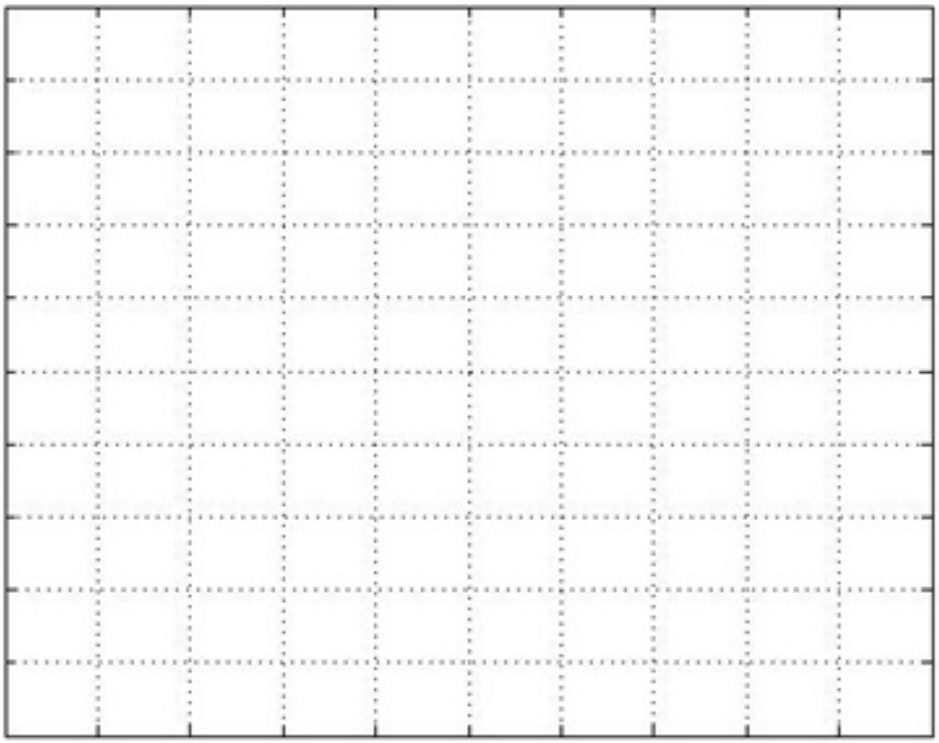
2.2 ตารางค่า Poly Silicon Crystalline Cell

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
I (A)								
V(V)								

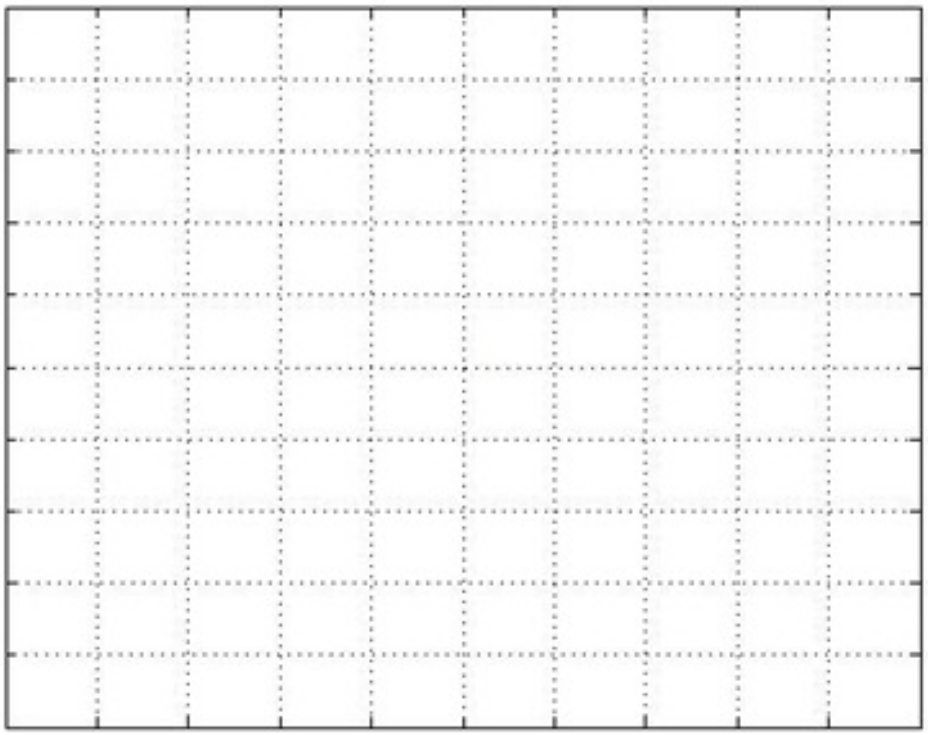
หมายเหตุ : ใช้โปรแกรม GUI เพื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

3. วาดไดอะแกรมของ กระแส (I) และ แรงดัน (V)

3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และ แรงดัน (V) ของค่า Single Silicon Crystalline Cell เปรียบเทียบกับแบบจำลอง MIT I-V Model



3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และ แรงดัน (V) ของค่า Poly Silicon Crystalline Cell เปรียบเทียบกับแบบจำลอง MIT I-V Model



1. สรุปผลการทดลอง