

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2541

โปรแกรมการออกแบบโรงจักรไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

COMPUTER SOFTWARE FOR PHOTOVOLTAIC PLANT DESIGN



โดย

นายจักรพันธ์ พงศ์มานะชัย

น.ส.ศิริพร ปริชาตินนท์

นายสมภพ ศรีตรัย

นายสรณ์ชัย ชีรวชิรกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ร.ศ.ศุที บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมพูอินไหว

เลขหน้.....

เลขทะเบียน..... 34176

วัน, เดือน, ปี - 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารของห้องสมุดฯ ใช้สำหรับการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมการออกแบบโรงจักรไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

COMPUTER SOFTWARE PHOTOVOLTAIC PLANT DESIGN

ผู้จัดทำ

1.นายจักรพันธ์ พงศ์มานะชัย 38014060

2.น.ส.ศิริพร ปรีชาตินนท์ 38014499

3.นายสมภพ ศรีศรัย 38014534

4.นายสรณชัย ชีรวชิรกุล 38014541

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ชาย ชมพูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการออกแบบโรงจักรไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

นายจักรพันธ์ พงศ์มานะชัย

น.ส.ศิริพร ปรีชาตินนท์

นายสมภาพ ศรีตรัย

นายสรณชัย ชีระวัชรกุล

อ.ที่ปรึกษา

รศ.ศุติ บรรจงจิตร

อ.ชาย ชมพูอินไหว

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอในส่วนของกรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์(SOLAR CELL) แต่ละชนิด ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยว(Single cell) เซลล์แสงอาทิตย์โพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส(Amorphus) ส่วนทางด้านโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์ นำเสนอในส่วนของโปรแกรมการคำนวณขนาดโรงจักร จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวนแบตเตอรี่ จำนวนอินเวอร์เตอร์ สถานที่ติดตั้ง และชนิดของการแทรกกิ้ง(Tracking)โดยใช้ภาษาแคลไฟในการเขียนโปรแกรม ซึ่งข้อมูลและหลักการต่างๆ อ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE ประกอบกับข้อมูลของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย

COMPUTER SOFTWARE FOR PHOTOVOLTAIC PLANT DESIGN

Jakkrapan Pongmanachai

Siriporn Parichatnon

Somphop Sritrai

Saran Theeravachirakul

Advisor

Soolee Banjongjit

Chai Chomphuinwai

1998

Abstract

This thesis present step by step of silicon cell processing in each type i.e. Single cell , Polycrystalline and Amorphous . Moreover, the essential about solar plant is the estimating program that can calculated plant size, number of PV array , battery and inverter, location and type of tracking by using Delphi. Principal and all data refered from IEEE standard and EGAT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ	1
1.2 วัสดุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 พื้นฐานต่างๆเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์	3
2.1 หลักการเบื้องต้นของ SOLARCELL(PHOTOVOLTAIC CELL)	3
2.1.1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ Semiconductor	3
2.1.2 Semiconductor junction	5
2.1.3 Energy band model ของ Semiconductor ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน	7
2.1.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.1.5 ทฤษฎีของซิลิกอนเซลล์แสงอาทิตย์ (Theory of Silicon Solar Energy)	14
2.1.6 แฟกเตอร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	16
2.2 เทคนิคในการทำเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.2.1 การเตรียมซิลิกอน	22
2.2.2 การปลูกผลึกซิลิกอนจากของเหลว	22
2.2.3 การเตรียมแว่นผลึก	22
2.2.4 Thermal Oxidation	23
2.2.5 Solid State Diffusion	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.2.6 Photolithography	24
2.2.7 Metallization	25
2.2.8 Annealing	25
2.2.9 การใช้แผ่นผลึกซิลิกอนแบบชนิดหยาบเป็นวัสดุเริ่มต้นในการทำเซลล์แสงอาทิตย์	26
2.2.10 Anodic Oxidation	27
2.2.11 Paint-on Diffusion	28
2.2.12 Chemical Vapor Deposition(CVD)	29
2.2.13 Nickel Electroless Plating	29
2.2.14 Lift-off Metallization	29
2.2.15 Laser Annealing	30
2.3 กรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	30
2.3.1 วิธีการผลิต Single Cell แบบหั่วต่อพีเอ็น	30
2.3.2 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Polycrystalline	35
2.3.3 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน	41
บทที่ 3 ส่วนประกอบของ PHOTOVOLTAIC PLANT	45
3.1 จุดเด่นของ Solar Photovoltaic	45
3.2 ส่วนประกอบของ Stand-alone PV System	46
3.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์(PV Array)	46
3.2.2 แบตเตอรี่	48
3.2.3 BOS (Balance of system)	54
บทที่ 4 วิธีการคำนวณและพิจารณาในการหาขนาดโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์	69
4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์	69
4.2 คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของ PHOTOVOLTAIC	76
4.2.1 อุณหภูมิของ ARRAY ของ module	82
4.2.2 การ Balance พลังงานของระบบ	82
4.2.3 การหาจำนวน Module ที่ต่อกันแบบอนุกรม	82
4.2.4 จำนวนของแผงที่ถูกต้องกันแบบขนาน	83
4.2.5 การหาขนาดของ Battery ใน solar plant	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.2.6 การพิจารณาแบตเตอรี่สำรอง	84
4.2.7 การพิจารณาลักษณะ LOAD	85
4.2.8 LOAD DURATION	86
4.2.9 การวิเคราะห์ข้อมูล	87
4.2.10 BATTERY CAPACITY และ FUNCTIONAL-HOUR RATE	87
4.2.11 การหาจำนวนแบตเตอรี่ที่จะต่ออนุกรมกัน	89
4.2.12 การพิจารณา BATTERY SIZE	91
4.2.13 วิธีการคำนวณ	93
4.2.14 SIMULATION MODEL	95
บทที่ 5 การใช้โปรแกรม	97
5.1 ขั้นตอนวิธีการใช้โปรแกรม	97
5.2 รายละเอียดของการใช้หน้าจอต่าง	98
5.2.1 หน้าจอ PV load	98
5.2.2 location	99
5.2.3 Tracking	100
5.2.4 PV Array	101
5.2.5 Battery	102
5.2.6 Inverter	103
5.2.7 Calculation	104
5.3 การแสดง Flow chart การทำงานของโปรแกรม	107
5.4 เปรียบเทียบผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรมกับโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้จริง	109
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์	110
เอกสารอ้างอิง	ฉ

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
บทที่ 2 พื้นฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์	
รูปที่ 2.1 The diamond lattice	3
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของอิลีกตรอน	4
รูปที่ 2.3 อิลีกตรอนและ โฮลในชั้น P-N	4
รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของ P-N junction	6
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนย้ายระดับพลังงานของ P-N junction	6
รูปที่ 2.6 P-N junction	6
รูปที่ 2.7 Energy band model ของ Semiconductor	7
รูปที่ 2.8 แสดงขบวนการเกิดไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	7
รูปที่ 2.9 แสดงค่า Energy Level of P-N junction Solar Cell	8
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน	9
รูปที่ 2.11 ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์	10
รูปที่ 2.12 ผลของความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์	10
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟ V-I ของวงจร output	12
รูปที่ 2.14 V-I characteristic	14
รูปที่ 2.15 V-I characteristic สำหรับค่า R ต่างๆ	14
รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ Voc	15
รูปที่ 2.17 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อ Voc	17
รูปที่ 2.18 แสดงผลของอุณหภูมิ ของเซลล์ที่ได้รับปริมาณรังสีตกกระทบ 1000 W/m ²	18
รูปที่ 2.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส	19
รูปที่ 2.20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ output	20
รูปที่ 2.21 ผลของจำนวนเซลล์ที่มีต่อ V-I curve	20
รูปที่ 2.22 ผลของพื้นที่ที่มีต่อ V-I curve	20
รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบ I-V curve ระหว่าง thin film กับ single cell	21
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอน	23

	หน้า
รูปที่ 2.25 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ใช้กันการแพร่ซึมของโบรอน	24
รูปที่ 2.26 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ใช้กันการแพร่ซึมของฟอสฟอรัส	24
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผลิตแบบมาตรฐานและแบบ ที่ใช้เทคโนโลยีเหมาะสม	26
รูปที่ 2.28 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	27
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ในการทำ Anodic Oxidation	27
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างของ Impurity Profile ที่วัดได้โดยวิธีการทำ Anodic Oxidation แล้วลอกผิวเพื่อวัดค่าความต้านทานจำเพาะ	27
รูปที่ 2.31 สภาพของแวนผลึกซิลิกอนที่ขั้นตอนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จ	34
รูปที่ 2.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน	35
รูปที่ 2.33 ลักษณะสมบัติแคแพซิแตนซ์-แรงดัน	35
รูปที่ 2.34 Spectrum Response	35
รูปที่ 2.35 อิทธิพลของ Grain Boundary	36
รูปที่ 2.36 ผลึกย่อยแบบ Fibrous Orientation ที่นำมาประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์	36
รูปที่ 2.37 ผลึกแบบ polycrystalline	36
รูปที่ 2.38 ผิวของ cell ที่ทำ Apizon wax	38
รูปที่ 2.39 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยสรุป	40
รูปที่ 2.40 ระบบเครื่องมือที่ใช้ทำ อะมอฟสซิลิกอน โดยวิธี Glow Discharge Deposition	42
รูปที่ 2.41 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ p-I-n ที่ทำจาก อะมอฟสซิลิกอนและลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้	43
รูปที่ 2.42 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซ็อกกีเบเรียที่ทำจาก อะมอฟสซิลิกอน	44
รูปที่ 2.43 การเตรียม อะมอฟสซิลิกอน โดยใช้ $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ ด้วยวิธี D.C. Discharge	44
บทที่ 3 ส่วนประกอบของ Photovoltaic Plant	
รูปที่ 3.1 การแสดงต่อแบบ by pass diode	47
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	48
รูปที่ 3.3 แสดง daily cycle	49
รูปที่ 3.4 แสดง seasonal cycle	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.5 ผลของอุณหภูมิต่อ capacity battery	52
รูปที่ 3.6 แสดง %Depth of Discharge	53
รูปที่ 3.7 แสดงผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของ BOS กับปริมาณค่าใช้จ่าย	55
รูปที่ 3.8 แสดง output ของ PCS	57
รูปที่ 3.9 กราฟประสิทธิภาพของ PCS	57
รูปที่ 3.10 แสดงการต่อฟิวส์	62
รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดระดับแรงดันแบตเตอรี่	68
บทที่ 4 วิธีการคำนวณและพิจารณาในการหาขนาดโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์	
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์	69
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์และแสดงตำแหน่งของเส้นอาร์คติกและเส้นแอนอาร์คติก 70	
รูปที่ 4.3 แสดงเส้นทางเดินของดวงอาทิตย์ และมุม Zenith angle θ_z , Altitude angle α , Azimuth angle ϕ	72
รูปที่ 4.4 แสดงมุมที่เกิดจากพื้นผิว ได้แก่ มุม Tilt angle β , Surface Azimuth angle ψ , Incident angle θ	73
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์	74
รูปที่ 4.6 แสดงมุมของรังสีดวงอาทิตย์	75
รูปที่ 4.7 วงจร Equivalent circuit	77
รูปที่ 4.8 แสดงพลังงานภายใต้ V-I curve	78
รูปที่ 4.9 แสดงคุณสมบัติของ I-V curve ของ Module ที่ต่อ 1, 2 และ 4 ตัว ทั้งแบบอนุกรมและขนาน	78
รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิบน Module ในลักษณะ V-I curve	80
บทที่ 5 การใช้โปรแกรม	
รูปที่ 5.1 แสดงหน้าจอแรกของการใช้โปรแกรม	97
รูปที่ 5.2 แสดงหน้าจอของ PV load	98
รูปที่ 5.3 แสดงหน้าจอของ location	99
รูปที่ 5.4 แสดงหน้าจอ Tracking	100
รูปที่ 5.5 แสดงหน้าจอ PV Array	101
รูปที่ 5.6 แสดงหน้าจอ Battery	102
รูปที่ 5.7 แสดงหน้าจอ Inverter	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 5.8 แสดงหน้าจอ Calculation	104
รูปที่ 5.9 แสดงหน้าจอหลังจาก click ปุ่ม Daily Calculation	105
รูปที่ 5.10 แสดงหน้าจอ Monthly Calculation	106



สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 2 พื้นฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์	
ตารางที่ 2.1ค่า Energy gap ของสารต่าง ๆ	4
บทที่ 3 ส่วนประกอบของ Photovoltaic Plant	
ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ	47
ตารางที่ 3.2 แสดง State of charge	51
ตารางที่ 3.3 แสดง 1 เฟส sine wave ชนิดประสิทธิภาพสูง	59
ตารางที่ 3.4 แสดง 3 เฟส sine wave	61
ตารางที่ 3.5 แสดงตัวอย่างของ LVCU 7 ขนาด	65
ตารางที่ 3.6 แสดงตัวอย่างของ LVCU with MOSFET	66
ตารางที่ 3.7 แสดงตัวอย่างของ Charge Controller	68
บทที่ 4 วิธีการคำนวณและพิจารณาในการหาขนาดโรงจักร	
ตารางที่ 4.1 แสดงการหาค่า n ใน 1 ปี	71
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Correction factor	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1.ความสำคัญ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งในปัจจุบันมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และแผนที่ตั้งของประเทศไทยก็อยู่ในแถบที่มีแสงตลอดทั้งปี จึงเหมาะแก่การที่จะนำเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาผลิตไฟฟ้า และในโอกาสต่อไปอาจจะนำมาสร้างเป็นโรงจักรไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อรองรับความต้องการการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้น หรืออาจจะนำไปสร้างในชนบทที่การไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง นอกจากนี้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดทำให้ช่วยลดมลพิษทางอากาศให้น้อยลง ถึงแม้ว่าราคาเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างจะแพง แต่ในปัจจุบันราคาเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ต่าง ๆ มีแนวโน้มถูกลงซึ่งต่างกับค่าไฟฟ้าในบ้านเราซึ่งมากขึ้นทุกวัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอกรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แก่ผู้ที่สนใจ พร้อมทั้ง โปรแกรมการคำนวณ โรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.วัตถุประสงค์

- 1.ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.ศึกษากรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวแบบ Polycrystalline และแบบอะมอร์ฟัส
- 3.ศึกษาส่วนประกอบของโรงจักรเพื่อนำไปออกแบบโปรแกรมการคำนวณขนาดโรงจักร
- 4.สามารถใช้ภาษาเคสไฟในการเขียนโปรแกรมได้

1.3.ขอบเขตของโครงการ

- 1.ศึกษาโครงสร้างและการทำงาน กรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.ศึกษาส่วนประกอบและปัจจัยที่มีผลต่อโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 3.คำนวณโรงจักร แบตเตอรี่ อินเวอร์เตอร์ และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งตั้งอยู่ในประเทศไทย
- 4.ใช้ภาษาเคไฟในการเขียนโปรแกรมการคำนวณ



บทที่ 2

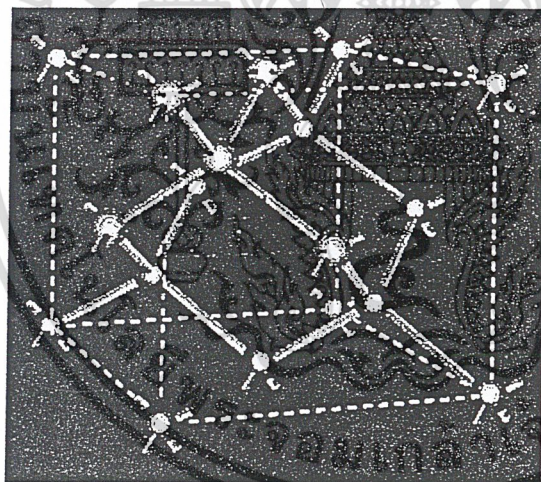
พื้นฐานต่างๆเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.หลักการเบื้องต้นของ SOLAR CELL(PHOTOVOLTAIC CELL)

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความสามารถของ Semiconduction ในการแปรเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ประโยชน์ของ Photovoltaic Effect ในขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์จะสร้างอนุภาคประจุเคลื่อนที่ในSemiconductor ซึ่งถูกแบ่งแยกโดยโครงสร้างอุปกรณ์และผลัดกระแสไฟฟ้า

2.1.1โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ของ Semiconductors

กฎโครงสร้างของ Semiconductor ที่สาริตได้ง่ายที่สุด โดยใช้ตัวอย่างของผลึก Silicon (ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 4) รูปแบบของผลึก Silicon Crystal ถูกเรียกว่า diamond lattice ซึ่งมีอะตอมวงนอกสุดอยู่ 4 อะตอมซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยแต่ละพันธะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว



รูปที่ 2.1 The Diamond Lattice

โครงสร้างผลึกที่มีผลคุณสมบัติทาง Electronic ของ Semiconductor

พลังงานของ Valence Orbitals ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ พันธะระหว่างอะตอมปรากฏในรูปแบบของระดับพลังงานของพันธะ (valence band) และระดับพันธะถัดไปคือ conduction band ซึ่งถูกแบ่งแยกจาก valence band โดย energy band หรือ bandgap ดังนั้นความกว้างของ bandgap คือ $E_c - E_v$ ซึ่ง พลังงาน bandgap หรือ E_g นี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของ semiconductor โดยตาราง 2.1 แสดงถึงค่า bandgap ของ semiconductor ต่างๆ

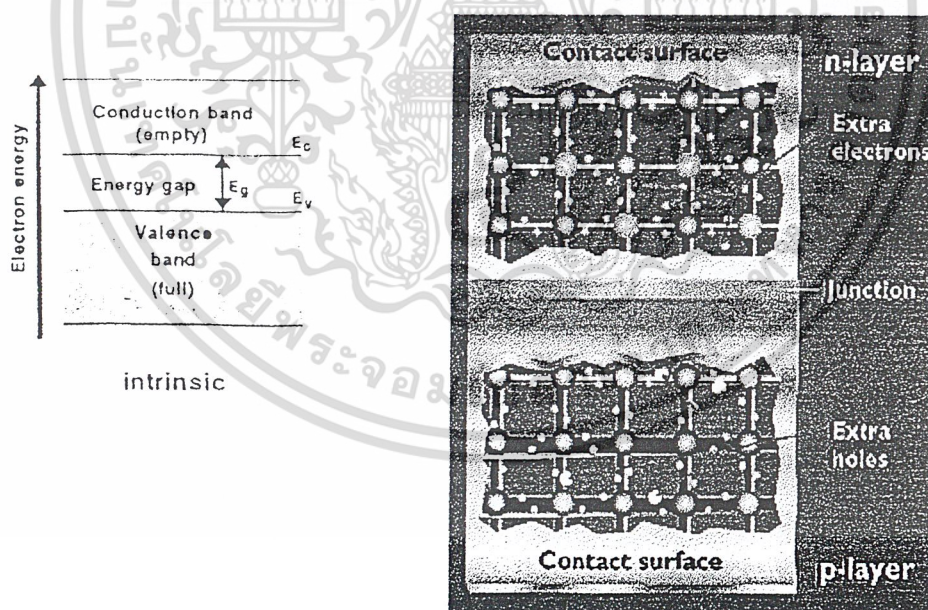
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Energy gaps of principal semiconductors for photovoltaic applications (gap values given at room temperature)

Material	Energy gap (eV)	Type of gap
crystalline Si	1.12	indirect
amorphous Si	1.75	direct
CuInSe ₂	1.05	direct
CdTe	1.45	direct
GaAs	1.42	direct
InP	1.34	direct

ตารางที่ 2.1 ค่า Energy gap ของสารต่าง ๆ

ในสาร semiconductor บริสุทธิ์ (ซึ่งเรียกว่า intrinsic) จะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ใน valence band ส่วนใน conduction band จะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ดังรูปที่ 2.2 โดยอิเล็กตรอนใน valence band ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้น semiconductor บริสุทธิ์จึงเสมือนเป็นฉนวน



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของอิเล็กตรอน รูปที่ 2.3 อิเล็กตรอนและโฮลในชั้น P-N

semiconductor สามารถนำไฟฟ้าได้ถ้าประจุถูกนำไปสู่ conduction band วิธีที่จะทำให้ประจุไปอยู่ที่ conduction band โดยการเติมสารเจือซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการ doping ซึ่งกระบวนการนี้เองกลายเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ทาง semiconductor ในปัจจุบัน นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติมีการเติมธาตุในหมู่ 5 ในซิลิกอนที่กำลังถูกหลอมซึ่งจะกลายเป็นผลึกโดยธาตุในหมู่ 5 นี้ให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดมี 5 ตัว และ 4 ใน 5 นั้นอยู่ใน valence band ส่วนอิเล็กตรอนอีก 1 ตัวจะอยู่ใน conduction band ดังนั้นอะตอมที่ถูกเจือด้วยธาตุในหมู่ 5 ถูกเรียกว่าdonors ส่วนอิเล็กตรอนใน conduction band สามารถเคลื่อนที่ได้ ผลึกจึงกลายเป็น สารตัวนำไฟฟ้า โดยsemiconductor ชนิดนี้ ถูกเรียกว่าn-typeดังรูปที่2.3

เหตุการณ์เดียวกันเมื่อเจือด้วยธาตุในหมู่ 3 อะตอมจะถูกเรียกว่าacceptors และการเจือด้วยธาตุในหมู่ 3 ทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดมีอิเล็กตรอนแค่ 3 ตัวโดยอิเล็กตรอนที่หายไปอีกตัวช่องว่างตรงนี้ถูกเรียกว่าholes(ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคในประจุบวกซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้) โดย semiconductor ที่กระแสสามารถเคลื่อนที่ได้โดยholes เรียกว่าp-typeดังรูปที่2.3

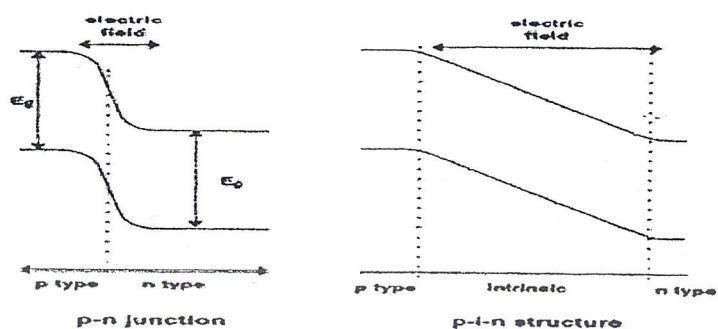
โดยประจุที่แพร่ใน semiconductorจะเรียกว่า majority carriers เช่น พาหะหลักที่เป็นอิเล็กตรอนใน n-type และ holes ในp-typeส่วนชนิดประจุที่ตรงข้ามของพาหะซึ่งมีน้อยเรียกว่า minority carriers

2.1.2 Semiconductor junction

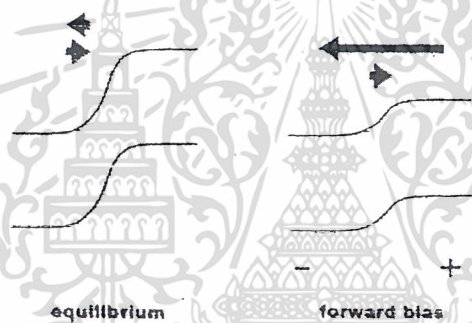
ปรากฏการณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในการก่อรูป รอยต่อ(junction)ซึ่งแสดงดังรูปที่2.4 โดยโครงสร้างที่ง่ายที่สุดคือรอยต่อ p-nซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างสารพีและสารเอ็น ส่วนในรอยต่อแบบ p-I-nโดยการใส่วัสดุ intrinsicระหว่างสารพีและสารเอ็นเพื่อให้Transition Zone กว้างขึ้น

เมื่อนำทั้งสองชิ้นมาต่อกันอิเล็กตรอนในเขตของเอ็น ไกล่รอยต่อจะแพร่เข้าสารพีโดยด้านหลังชั้นจะเป็นถูกอัดประจุบวกโดย donors และ holesจะแพร่ในทิศทางตรงกันข้ามโดยจะทำให้ประจุด้านหลังรอยต่อจะถูกอัดประจุลบของ holesและผลของการต่อกันนี้ในเขตรอยต่อจะไม่มีประจุเคลื่อนที่อยู่เลยซึ่งจะกลายเป็นกำแพง potential กันการไหลของอิเล็กตรอนและholesในทิศทางตรงกันข้ามดังรูปที่ 2.6

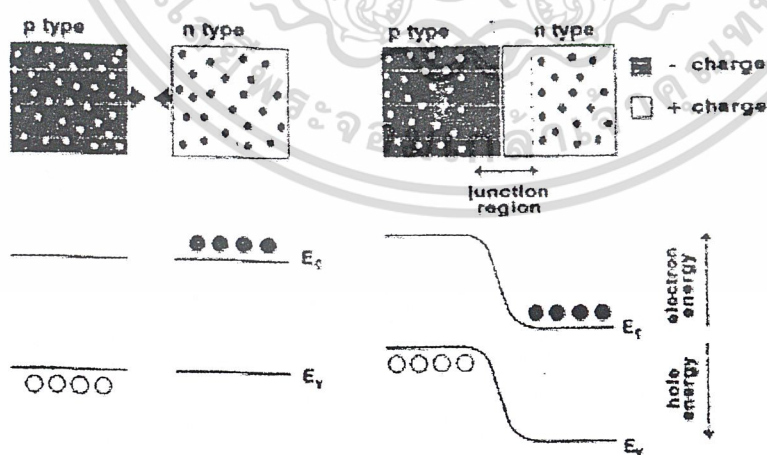
เมื่อใส่voltageบวกไปในด้าน พี จะเป็นการทำ forward bias ซึ่งจะช่วยลดความสูงของกำแพงpotentialและเพิ่มกระแสผ่านไดโอดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของ P-N junction



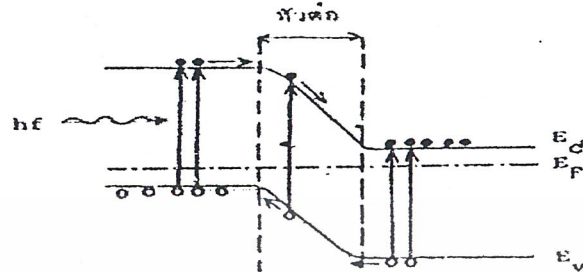
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนย้ายระดับพลังงานของ P-N junction



รูปที่ 2.6 P-N junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 Energy band model ของ Semiconductor ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน

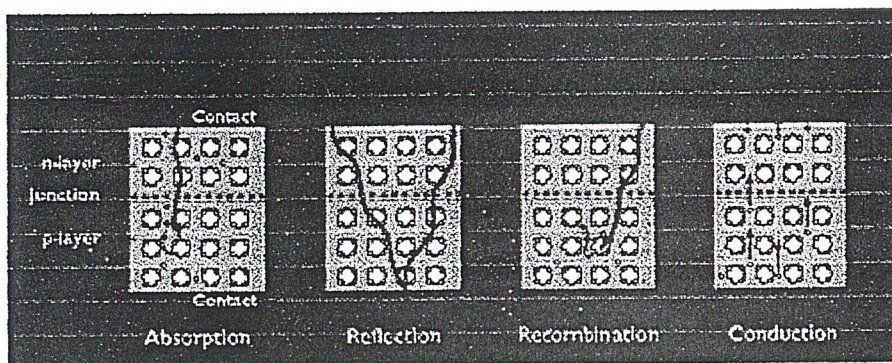


รูปที่ 2.7 แสดง Energy band model ของ Semiconductor

ถ้าหากว่าอุณหภูมิของ Semiconductor สูงขึ้น e ที่มีอยู่ใน Valence band จะได้รับ Heat Energy เข้ามาทำให้ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ Conduction band กลายเป็น Conduction e ทำให้เกิดการนำทางไฟฟ้าขึ้น เมื่อ e ใน Valence band หลุดออกไปแล้วจะเหลือ Hole ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก(+) ทั้ง e และ Hole นี้รวมเรียกว่า Free carrier ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่ง Semiconductor มี Thermal equilibrium นั้นจะมีทั้ง e และ Hole เท่า ๆ กัน แต่ถ้าหากการนำทางไฟฟ้าที่ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ e นั้นเรียกว่า P-type Semiconductor

การกระตุ้น e ให้ไปอยู่ที่ Conduction band นั้น นอกจากให้ Heat Energy แล้วยังใช้ Light Energy ได้อีกด้วย กล่าวคือ แสงที่มี Energy ค่าหนึ่ง เมื่อส่องถูก Semiconductor จะทำให้ e ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ Conduction band และขณะเดียวกันที่ Valence Band จะเกิด Hole ขึ้น Energy ของแสงที่ใช้ นั้นจำเป็นต้องมีค่ามากกว่า Forbidden Band Energy

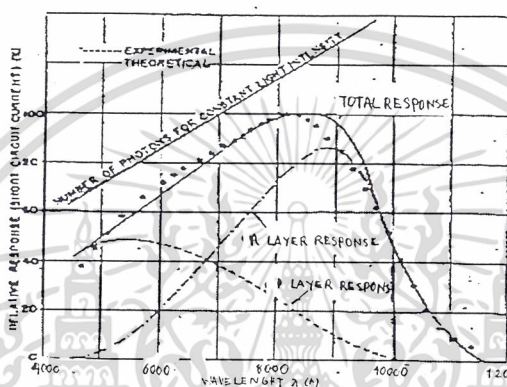
ในทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่จะใช้โฟตอนเป็นตัวอธิบายการทำงาน โฟตอน 1 ตัวจะทำให้เกิด e และ Hole 1 คู่ขึ้นใน Semiconductor ที่ Thermal Equilibrium นั้น Semiconductor จะมี Free Carrier จำนวนหนึ่งเมื่อ Semiconductor นี้ได้รับแสงจะถูกกระตุ้นให้เกิด e Hole มากขึ้นเรียกว่าเกิด Excess Carrier



รูปที่ 2.8 แสดงขบวนการเกิดไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าป้อนให้ Semiconductor นั้น Excess Carrier ที่เกิดจากแสงนั้น จะกระจายอยู่ใน Semiconductor ทำให้มี Conductivity สูงมากขึ้น เตรียมพร้อมที่จะจ่ายกระแสให้แก่ load โดยการเอา Semiconductor แบบ n และแบบ p มาต่อกันเข้าทำให้เกิด Barrier แยก e และ Hole ที่เกิดขึ้นได้ เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่เป็น P-N Junction



รูป 2.9 แสดงค่า Energy Level of P-N Junction Solar Cell

เนื่องจากว่า Fermi Level ของ N-Type Semiconductor นั้นอยู่ใกล้ Conduction Band ส่วนของ P-Type Semiconductor นั้นอยู่ใกล้ Valence Band ดังนั้นที่ P-N Junction ทำให้ Conduction Band และ Valence Band เกิดงอโค้งดังรูป ทำให้มี Barrier ขึ้นที่ P-N Junction e ที่เกิด P-Layer จะเคลื่อนที่ไปหา N-Type Layer และ Hole ที่เกิดใน N-Type Layer จะเคลื่อนที่ไปยัง P-Type Layer และที่ยังไม่มี Load ข้างนอกมาต่อมัน Excess Barrier เหล่านี้จะรวมตัวกันอยู่ใน Layer ของมัน นั่นคือที่ P-Type Layer จะมี Hole มากเกิดเป็น Positive ส่วนที่ N-Type Layer จะมี e มากเป็น Negative ทำให้เกิด Forward Bias ขึ้นที่ P-N Junction แรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็น Open Circuit Voltage ของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 1/2 ของ Forbidden Band Energy เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิกอน มี Forbidden Band Energy = 1.1 eV ดังนั้น Open Circuit Voltage จะมีค่า 0.5-0.6 Volt เมื่อต่อ Load ภายนอกเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ e Hole จะไหลผ่าน load

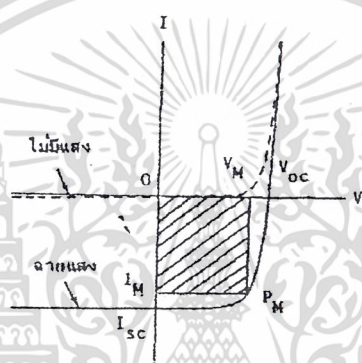
อนึ่งแสงที่มากกระทบผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะถูก Semiconductor ที่ประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ดูดและกระตุ้นให้เกิด e และ Hole และแสงนั้นจะค่อย ๆ อ่อนตัวลงไป ดังนั้น c

และ Hole จะเกิดเฉพาะที่ความลึกคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น คือ ประมาณ 0.2-2.0 m. เลยจากนั้นไปแล้ว จะไม่เกิด e และ Hole

Fermi Level : Minimum Energy ที่ทำให้ e หลุดออกไปจากที่อยู่ของมัน

2.1.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.10 โดยแสดงคุณสมบัติขณะที่รับแสงและไม่ได้รับแสง

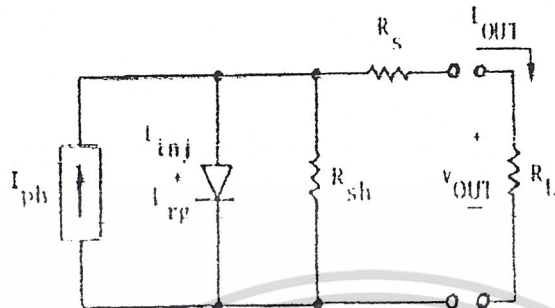


รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าขณะที่เซลล์ได้รับแสง เซลล์จะสามารถจ่ายกระแสให้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกลัดวงจร ซึ่งมีค่า I_{sc} และเซลล์จะสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{oc} กระแสซึ่งเกิดจากเซลล์ขณะที่ได้รับแสงนี้ถูกเรียกว่า “กระแสไฟฟ้าแสง” (Photo Current) นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้อีกว่า กำลังงานที่จะได้รับจากเซลล์มากที่สุดก็คือ ผลคูณระหว่างค่ากระแสกับค่าแรงดันที่มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ก็คือค่า $V_m I_m$

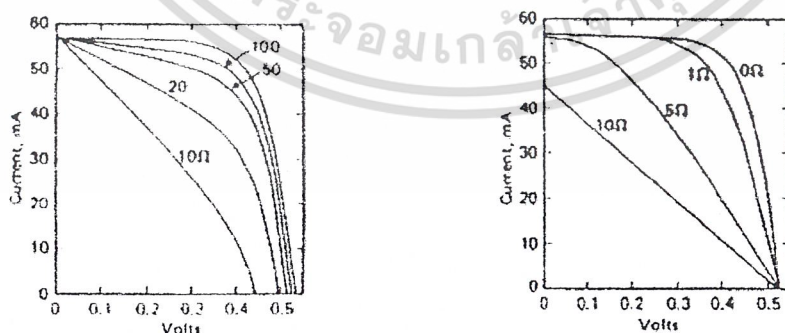
อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังมากที่สุดที่เซลล์จะให้ได้จริง ๆ กับค่ากำลังงานที่เซลล์น่าจะให้ได้ในทางอุดมคติ ถูกเรียกว่า “ฟิลแฟคเตอร์” (Fill Factor) หรืออาจพิจารณาได้ว่าค่าฟิลแฟคเตอร์ก็คืออัตราส่วนระหว่างผลคูณของ $V_m I_m$ กับผลคูณของ $V_{oc} I_{sc}$ ซึ่งโดยปกติมักจะมีค่าราว 0.7-0.82

ผลของความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์



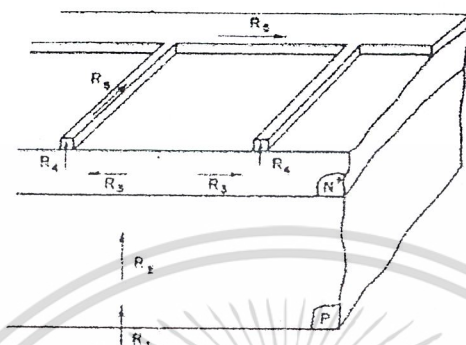
รูปที่ 2.11 ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์มีความต้านทานทางอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) เช่นเดียวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั่วๆ ไป ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำและความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์นี้เป็นสิ่งสำคัญและมีผลต่อกำลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาก ผลของความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีความต้านทานอนุกรมมากจะให้กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ต่ำลง และความชันของกราฟก็ลดลงด้วย เป็นผลให้กำลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์น้อยลงไปตาม ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นจะต้องหาวิธีการลดค่าความต้านทานอนุกรมภายในน้อยกว่าหนึ่งโอห์ม



รูปที่ 2.12 ผลของความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์

โดย shunt resistance เกิดเนื่องจากกระแส leakage ที่รอยต่อและขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างรอยต่อ (ประจุของ recombination ภายในวัสดุของ Bulk) โดยตามปกติค่าความต้านทานนี้มีค่าสูง และ series resistance ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของ grid contact และชั้นพื้นที่รอยต่อ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากริดใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดย R_1 คือความต้านทานของรอยต่อของ back Ohmic กับ ซิลิกอนชนิดพี

R_2 คือความต้านทานของซิลิกอนชนิดพี

R_3 คือความต้านทานของชั้น n^+

R_4 คือความต้านทานของรอยต่อของ Top Ohmic grid กับซิลิกอนชนิด n^+

R_5 คือความต้านทานระหว่าง metallic finger และความต้านทานระหว่าง R_6 กับ grid

collector

โดยความต้านทานต่างๆที่นำมาคิดนี้ความต้านทานที่สำคัญคือ R_1 และ R_3

ประสิทธิภาพโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

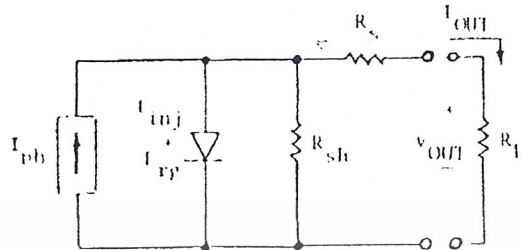
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ เขียนโดยสรุปได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน(%)

= $\frac{\text{กำลังงาน ไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์ (mw)} \times 100}{\text{พลังงานที่ได้จากแสง (mw/cm}^2\text{)} \times \text{พื้นที่รับแสงของเซลล์ (cm}^2\text{)}}$

เซลล์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ที่จุด $\%V_m$ และ I_m) ก็ต่อเมื่อมีแหล่งรับพลังงานหรือ load ที่เหมาะสมมาต่อกับเซลล์ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลกจะมีค่าสูงสุดประมาณ 100 mw/cm^2 ที่ระดับน้ำทะเล

คุณสมบัติโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์



ในสมการทางคณิตศาสตร์ ลักษณะของ I-V ของ Diode หาได้จากสมการ Shockley

$$I = I_0 [\exp((V + IR_s)/a) - 1] \quad \text{---(สมการ 2.1)}$$

โดย I คือค่ากระแสผ่าน Diode, V คือค่าแรงดัน

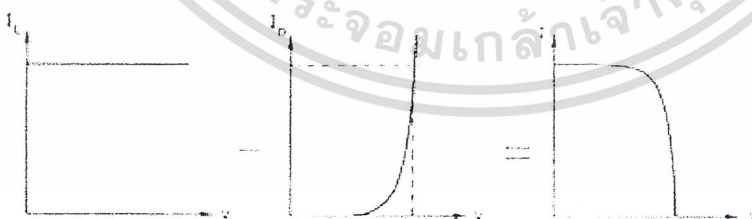
ถ้าละทิ้งการสูญเสียโฟตอนแต่ละตัวจะกระตุ้นอิเล็กตรอนหนึ่งตัวให้เป็นกระแส generation

และค่ากระแสเท่ากับ $I_L = qNA$ --- (สมการ 2.2)

โดยค่า N คือจำนวนของโฟตอนในพื้นที่รับแสงของสเปกตรัมและค่า A คือพื้นที่ผิวของ semiconductor ที่ถูกแผดส่อง, ค่า q คือค่าขนาดของประจุอิเล็กตรอน

ดังนั้น I_{output} เท่ากับความต่างระหว่างกระแส light-generated และกระแส Diode (ไม่คิดความต้านทาน) จากสมการ 2.1 – สมการที่ 2.2

$$I_{output} = I_L - I_0 [\exp((V + IR_s)/a) - 1] \quad \text{---(สมการ 2.3)}$$



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟ V-I ของวงจร output

ดังนั้นภายใต้ short circuit ดังนั้น $V=0$ ดังนั้น $I_{output} = I_L = qNA$ ซึ่งแสดงถึงกระแสผ่านวงจรภายนอกไม่ได้ผ่าน Diode ส่วนภายใต้ open circuit ดังนั้น $I_{output} = 0$

ดังนั้นจากสมการ 2.3 จะได้ $V_{oc} = kT/q [\ln(I_{ph}/I_0 + 1)]$ --- (สมการ 2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจะคำนวณค่ากำลังสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่คิดค่าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานที่มีอยู่ทั้งอนุกรมและขนาน ในแสงแดดจ้า ๆ ณ ระดับน้ำทะเลจะมีโฟตอน ตกกระทบมากทำให้เกิด hole-electron pair จึงทำให้มีกระแสไหลผ่าน Junction มีค่ากระแสไหลผ่าน Junction ประมาณ 0.08 A/cm^2 พลังงานที่ออกมาจากดวงอาทิตย์มีหลายระดับความถี่ เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างให้รับพลังงานได้ดีในช่วงความถี่กลาง ๆ ประมาณแสงสีเขียวและแสงสีเหลือง ส่วนความถี่พลังงานบริเวณปลายทั้งสองของสเปกตรัมจะถูกปล่อยทิ้งไป และอีกปัญหาหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับ Energy gap ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงทำให้กระแสที่เกิดขึ้นลดลงอีกเป็น 0.44 A/cm^2 ในซิลิกอน และ 0.068 A/cm^2 ในเยอรมันเนียม นอกจากนี้ยังมีการลดลงเนื่องจากการสะท้อนของแสงอีกด้วย แต่ถ้าสามารถป้องกันการไม่ให้มีการสะท้อนแสงแล้ว เราจะได้กระแสสูงสุดประมาณ 0.035 A/cm^2 ในซิลิกอน และ 0.055 A/cm^2 ในเยอรมันเนียม และถ้าจะทำการปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่านี้จำเป็นต้องหาสารกึ่งตัวนำที่มี Energy gap แคบลง ซึ่งจะได้กระแสเพิ่มขึ้น กล่าวคือ จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแต่ Energy gap แคบลง Open Circuit Voltage ลดลงด้วย และอัตราการลดลงของ Open Circuit Voltage จะลดลงในอัตรามากกว่าอัตราการเพิ่มของกระแส

จาก Open Circuit Voltage (V_{oc}) ที่อุณหภูมิห้องมีค่าจากสมการ 2.4 จะได้

$$V_{oc} = 0.0575 \log_{10}(I_p/I_0)$$

ถ้าต้องการ V_{oc} สูงๆ ก็ต้องใช้สารกึ่งตัวนำที่มี Energy Gap กว้าง ๆ และความต้านทานของรอยต่อต่ำ Mobility ต่ำ และมี Life Time สูง

จะเห็นได้ว่ากำลังที่เหมาะสมจะอยู่ในย่านของ Ener Gap ประมาณ 1-1.6 eV และที่อุณหภูมิห้องซิลิกอนมี Energy Gap = 1.08 eV จึงเหมาะสมในการนำมาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จะเห็นได้ชัดว่าถ้านำเอาเยอรมันเนียมมาทำจะได้ประสิทธิภาพต่ำกว่าซิลิกอนถึงเท่าตัว

ในเวลากลางวันที่มีการกระจายของแสงแดด จะมีค่าประมาณ 108 mw/cm^2 เราจะได้ Power สูงสุดจากซิลิกอน ประมาณ 23.5 mw/cm^2 ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน จึงมีประสิทธิภาพเพียง 21.7 % เท่านั้น

2.1.5 ทฤษฎีของซิลิกอนเซลล์แสงอาทิตย์(Theory of Silicon Solar Energy)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า I_{sc} สูงสุดจะได้ประมาณ 35 mA/cm^2 และจะลดลงที่ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 17.2 % หรือ 18.6 mw/cm^2 อย่างไรก็ตาม ตามรูปที่ 2.14 เป็นค่าที่คาดขึ้น โดยการเปลี่ยนค่า Paramiter ต่าง ๆ โดยการปรับปรุงคุณภาพของซิลิกอน ให้ดีขึ้นโดยอาศัยการ Diffusion Boron ลงใน N-Type ตามตาราง 1 มีค่า Power Density (P_a) ที่คาดว่าจะได้รับคือ

$$P_a = 0.8 I_{sc} \cdot V_{oc} = 0.8 \times 0.025 \times 0.58 = 0.0116 \text{ watts/cm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 10.7% ค่าที่ได้เป็นค่าที่ได้จาก Junction ในอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ใน Junction จะมีค่า Resistance (R) เกิดขึ้น มีทั้ง R ขนาน (R_{sh}) และ R อนุกรม (R_s) ซึ่งถ้าคิดรวมแล้วเราสามารถนำมา plot เป็น V-I Characteristic ได้โดยใช้สมการ

$$I_{\text{output}} = I_L - I_0 [\exp((V+R_s I)/A) - 1] - (V+R_s I)/R_{sh} \quad \text{---(สมการ 2.5)}$$

ดังนั้น open circuit ดังนั้น $I_{\text{output}} = 0$ จะได้ค่า $V_{oc} = A[\ln(I_L + I_0)/I_0]$

รูปที่ 2.14 เป็นการ plot โดยการเปลี่ยนค่า $R_s = 0, 5 \Omega$ $R_{sh} = \infty, 100 \Omega$ โดยมี Parameter ต่าง ๆ คือ I_0, I_L และ a/q จะเห็นได้ว่า R_{sh} ไม่มีผลต่อ Power output เลย ผิดกับ R_s ซึ่งมีผลมากคือ ถ้าเปลี่ยน R_s จาก $0-5 \Omega$ จะทำให้ Power ลดลงถึง 30% ดังนั้นในการคำนวณ เราจึงไม่คิดค่าของ R_{sh} เนื่องจากไม่มีผลต่อ power ทาง output

ตามรูปที่ 2.15 เป็น V-I Characteristic ที่ให้ $R = 0, 1, 2, 3, 5, 10$ และ 20 โอห์ม มา plot ได้ตามรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราจะต้องลดค่าของ R_s ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้

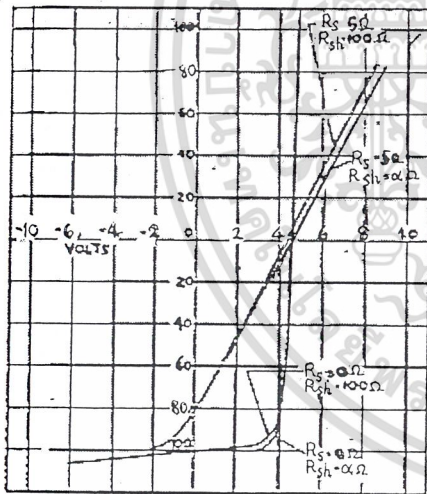


Fig. 2.14 Theoretical $I-V$ characteristic for various converters that include series and shunt resistance.

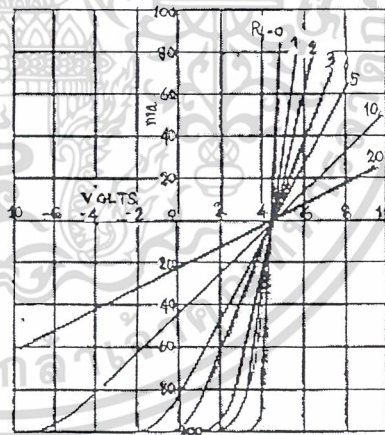


Fig. 2.15 Theoretical $I-V$ characteristic for various converters with different series resistance.

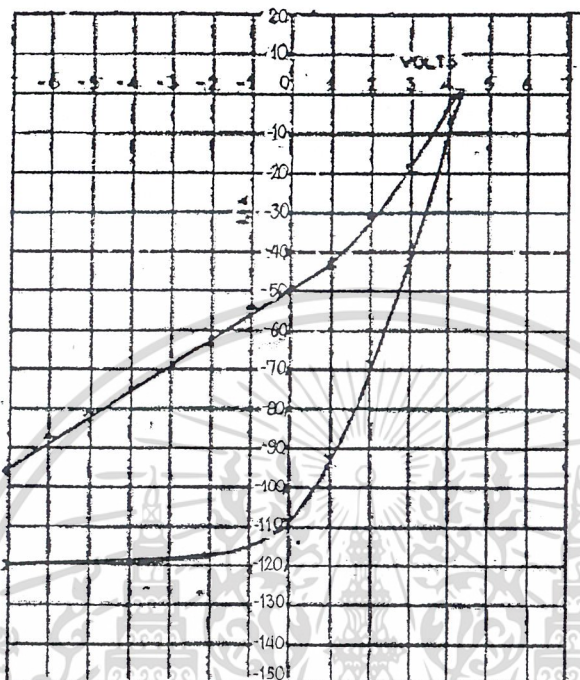
รูปที่ 2.14 V-I characteristic

รูปที่ 2.15 V-I characteristic สำหรับค่า R ต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงการทำงานเนื่องจากอุณหภูมิก็เป็นเรื่องสำคัญในอุปกรณ์ Semiconductor เมื่อ Short Circuit Current มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิส่วนมาก อุณหภูมิส่วนมากจะเปลี่ยนเนื่องจากความต้านทาน R_s อายุการใช้งาน แต่อุณหภูมิจะมีผลต่อ Open Circuit Voltage (V_{oc}) มากซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$dV_{oc}/dT = -0.0288 \text{ Volt/องศาเซลเซียส}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

ถ้า output power มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเส้นตรงกับ V_{oc} แล้ว power จะลดลงในอัตรามากกว่า $1/2$ %/องศาเซลเซียส

การคำนวณค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากนิยามของค่าฟิลแฟคเตอร์

$$FF = \frac{\text{พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดจากผลคูณของ } I_m \text{ และ } V_m}{\text{พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดจากผลคูณของ } I_{sc} \text{ และ } V_{oc}}$$

$$I_m \times V_m = 120 \text{ mA} \times 0.4 \text{ V}$$

$$I_{sc} \times V_{oc} = 289 \text{ mA} \times 0.55 \text{ V}$$

ดังนั้นค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์ = 0.53 สำหรับเซลล์ตัวอื่น ๆ ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีการเดียวกัน

การคำนวณค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์

จากนิยามของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์(mw)} \times 100}{\text{พลังงานที่ได้จากแสง (mw/cm}^2\text{)} \times \text{พ.ท.ของเซลล์(cm}^2\text{)}}$$

ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าค่าสูงสุดที่เซลล์จะสามารถจ่ายออกมาได้กับค่าพลังงานที่ได้รับจากแสง

ปัจจุบันมีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์กันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่กำลังต่ำ ๆ จนถึงงานที่ต้องใช้กำลังสูงๆ อย่างไรก็ตามการใช้เซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ในกรณีที่สถานที่ห่างความเจริญหรือในที่ราคากระแสไฟฟ้ามีราคาแพงหรือการบำรุงรักษากระทำได้ลำบาก

2.1.6 แพลตฟอร์มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวกำหนดความเร็วในการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็ม เมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องใช้ไฟฟ้า 12 Vdc กระแสจากแผงเซลล์จะจำกัด maximum power ของเครื่องใช้ด้วย ซึ่งขนาดของกระแสที่ได้ขึ้นกับแพลตฟอร์ม 7 ประการดังนี้

1. ปริมาณของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์
2. อุณหภูมิของแสง
3. จำนวนของเซลล์ในแผงเซลล์
4. พื้นที่ของแต่ละเซลล์
5. ชนิดของsilicon
6. ขั้นตอนของการชาร์จแบตเตอรี่
7. ผลกระทบของความสูญเสียของระบบ เช่นที่เกิดจาก cable , blocking diode

แผงเซลล์มาตรฐานนั้นถูกออกแบบมาสำหรับชาร์จแบตเตอรี่แบบ lead acid ขนาด12V

แบตเตอรี่เหล่านี้จะต้องชาร์จที่ขั้วด้วยแรงดันประมาณ 13V และจะสูงถึง 15V เมื่อใกล้จะชาร์จเต็ม อย่างไรก็ตามแรงดันสูงสุดที่ต้องการสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็ม จะมีค่าสูงกว่า15V เพราะระบบมีการสูญเสีย ซึ่งเกิดจาก Voltage drop ระหว่างแผงเซลล์กับแบตเตอรี่ เนื่องจากสายไฟและblocking diode ดังนั้นเพื่อให้ชดเชยความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ แรงดันสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์ควรจะมีค่าประมาณ 16V ดังนั้นในการอธิบายเรื่องแพลตฟอร์มต่อไปจากนี้จะใช้ output voltage 16V กราฟรูปที่2.21 ซึ่งแสดง I-V curve จุดที่เราสนใจคือจุดที่ตัดกับเส้นประที่ 16V

ผลจากปริมาณรังสีที่ตกกระทบ (effect of irradiance)

เมื่อแสงตกกระทบแผงเซลล์เป็นการ warm up อุณหภูมิภายในเซลล์ ทำให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ดังนั้นถ้าหากแสงที่มากตกกระทบมีความเข้มสูงมาก ก็จะทำให้เกิดอุณหภูมิภายในสูงขึ้นด้วย

ปริมาณรังสีตกกระทบ 1000 W/m^2 เมื่อผิวหน้าเซลล์ถูกแสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งถ้าแผงเซลล์ถูก fixed อยู่กับที่ ก็จะมีแค่ช่วงเที่ยงเท่านั้นที่ได้รับแสงตรงๆ (แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าเซลล์)

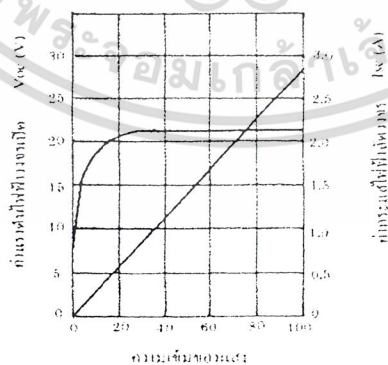
ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้กระแสสูงสุดเกือบทั้งวัน ทำได้โดยการเอียงแผงเซลล์เปลี่ยนไปตามดวงอาทิตย์ให้เผชิญหน้ากับดวงอาทิตย์นานที่สุด ซึ่งการทำเช่นนี้เราเรียกว่า 'Tracking'

เป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณรังสีตกกระทบ ให้ตกกระทบแผงเซลล์ให้สูงกว่า 1000 W/m^2 โดยการใช้กระจก หรือเลนส์รวมแสงไปยังเซลล์ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณรังสีตกกระทบอาจจะไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผงเซลล์ ซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิด Over-heating และเกิดความเสียหายต่อเซลล์ที่ได้รับแสงน้อยได้ ซึ่งเซลล์ทั้งหมดภายในแผงเซลล์ก็จะร้อนขึ้นด้วย ทำให้จำเป็นต้องมีการระบายความร้อน (cooling) แบบพิเศษ ดังนั้นจึงไม่แนะนำให้มีการรวมแสงสำหรับแผงเซลล์มาตรฐานทั่วไปไม่ว่าด้วยวิธีใดก็ตาม

เมื่อมีเมฆหมอกปกคลุมมาก ปริมาณรังสีที่ส่องมายังพื้นโลกและแผงเซลล์ก็จะน้อยลงตามไปด้วย ในวันที่หมอกหนามาก ปริมาณรังสีตกกระทบแผงเซลล์อาจจะลดลงถึง 100 W/m^2 หรือน้อยกว่า

ยิ่งหมอกหนาเท่าไร กระแสที่ 16V จะมีค่าต่ำจะเกือบเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงว่ากระแสชาร์จะมีค่าต่ำมากด้วย

รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นลักษณะสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์คือ กระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง (ปริมาณรังสีที่ตกกระทบ) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่แปรตามความเข้ม



รูปที่ 2.17 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อ Voc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

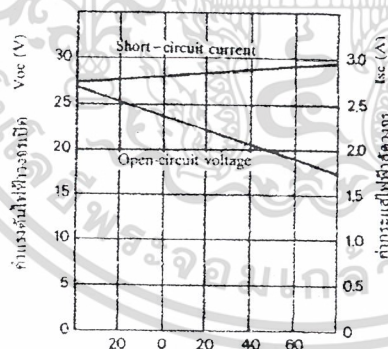
ผลกระทบจากอุณหภูมิของเซลล์ (effect of cell temperature)

ปริมาณตกกระทบเซลล์ (irradiance) มีค่า 1000 W/m^2 หมายถึง การที่ดวงอาทิตย์ส่องตรงมายัง แผงเซลล์ ซึ่งพบว่าจะทำให้เซลล์ร้อนขึ้นกว่าอากาศโดยรอบประมาณ 30 องศาเซลเซียส (85 องศาฟาเรนไฮท์)

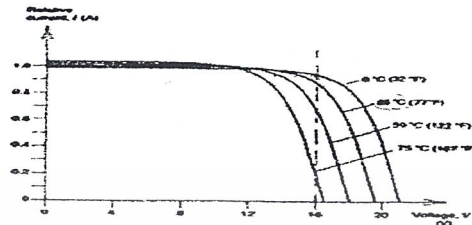
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเมื่อแสงตกกระทบแผงเซลล์ทำให้เกิดการ warm up อุณหภูมิภายในเซลล์ ทำให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ดังนั้นถ้าหากแสงที่มากกระทบมีความเข้มสูงมากก็จะทำให้เกิดอุณหภูมิภายในสูงขึ้นด้วย แต่ยังมีอุณหภูมิของเซลล์อีกสาเหตุหนึ่ง ที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง ซึ่งผลก็คือจะทำให้พลังงานลดลงเมื่อเซลล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ,2.19 และ 2.20

รูปที่ 2.18 แสดงผลของอุณหภูมิ ของเซลล์ที่ได้รับปริมาณรังสีตกกระทบ 1000 W/m^2

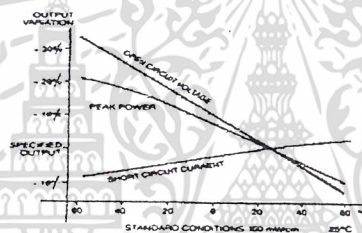
จากกราฟจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 0 องศาC V_{oc} จะตกลงขณะที่ I_{sc} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แม้ว่า I_{sc} จะเพิ่มขึ้นก็ตามแต่ก็ไม่พอที่จะชดเชยผลจากการลดลงของ V_{oc} จากกราฟแสดงให้เห็นว่า กระแสที่ 16 A มีค่าลดลงเนื่องมาจากการลดลงของ V_{oc} ดังนั้นหากต้องการได้ maximum current output แผงเซลล์จะต้องจัดตั้งเพื่อให้ถ่ายเทอากาศได้สะดวกเพื่อรักษาอุณหภูมิของเซลล์ให้เย็นอยู่เสมอ



รูปที่ 2.18 แสดงผลของอุณหภูมิ ของเซลล์ที่ได้รับปริมาณรังสีตกกระทบ 1000 W/m^2



รูปที่ 2.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส



รูปที่ 2.20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ output

ผลจากจำนวนเซลล์ทั้งหมดในแผงเซลล์ (effect of the number of cells in module)

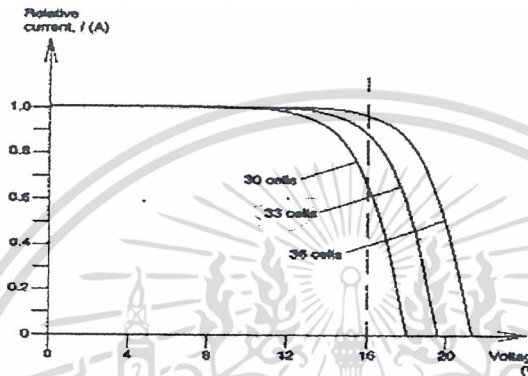
จำนวนของเซลล์ใน 1 แผงเซลล์ (module) มีผลกับแรงดันอย่างยิ่ง จากที่เคยกล่าวแล้วว่า แต่ละเซลล์จะให้แรงดันได้ประมาณ 0.5V เมื่อนำแต่ละเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเป็น 1 แผงเซลล์ V_{oc} ก็จะเพิ่มขึ้นทีละ 0.5V ด้วยโดยที่ไม่มีผลกับกระแส I_{sc}

รูปที่ 2.21 แสดง I-V curve สำหรับจำนวนเซลล์ต่าง ๆ กัน ที่ 1000W/m^2 สำหรับแผงที่มีจำนวนเซลล์ 30 เซลล์ กระแสที่ค่าแรงดันโหลด 16 V มีค่าต่ำกว่า I_{sc} ค่อนข้างมาก ส่วนแผงเซลล์ที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวน 33 เซลล์ หรือมากกว่า จะให้กระแสที่ค่าแรงดัน 16V ใกล้กับค่า I_{sc} มากกว่ามาก แต่ก็ไม่มีประโยชน์หรือความจำเป็นที่จะต้องใช้เซลล์เกิน 33 เซลล์ ใน 1 แผง เพราะจะทำให้ราคาของแผงเซลล์เพิ่มขึ้น แผงเซลล์ที่ประกอบด้วยเซลล์เกิน 33 เซลล์นั้น จะจำเป็นก็ต่อเมื่อใช้สำหรับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ เพราะจะสามารถชดเชยแรงดันที่ตกลงเนื่องจากการที่เซลล์ทำงานในที่มีอุณหภูมิสูง

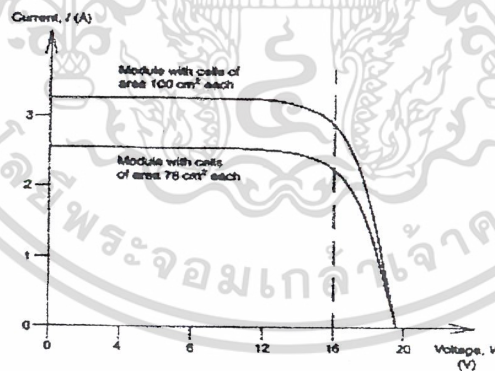
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์ที่ประกอบด้วยเซลล์น้อยกว่า 33 เซลล์นั้น ไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12V ให้เต็มได้ที่ maximum current แต่อย่างไรก็ตามกระแสชาร์จต่ำๆที่ 16V ก็จำเป็นเมื่อระบบไม่มีเครื่อง regulate charging

แต่ละเซลล์ของ thin film silicon ให้แรงดันสูงกว่า crystalline silicon เล็กน้อย จำนวนค่าสุดของเซลล์ในแผงเซลล์ชนิด thin film silicon ที่ใช้สำหรับชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12V คือ 25 เซลล์



รูปที่ 2.21 ผลของจำนวนเซลล์ที่มีต่อ V-I curve
ผลจากพื้นที่รับแสงของเซลล์ (effect of cell area)



รูปที่ 2.22 ผลของพื้นที่ที่มีต่อ V-I curve

maximum current จากแผงเซลล์ (I_{sc}) ถูกกำหนดโดยขนาดของแต่ละเซลล์ ที่ระดับของปริมาณรังสีที่ตกกระทบ (irradiance) ต่อหน่วยพื้นที่เดียวกัน เซลล์ที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจะให้กระแส I_{sc} สูงกว่าเซลล์ที่มีพื้นที่เล็ก

รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบ I-V curve ที่ 1000 W/m^2 สำหรับแผงเซลล์ 2 แผง ที่มีจำนวนของ single-crystal silicon เท่ากัน เซลล์ในแต่ละแผงพื้นที่ 78 cm^2 และ 100 cm^2 ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผงเซลล์ที่ 2 ให้กระแสที่ 16V สูงกว่าแผงแรกอยู่ 25% เพราะว่าพื้นที่ของเซลล์ใหญ่กว่าอยู่ 25% ดังนั้นเห็นได้ว่า ขนาดของเซลล์มีผลโดยตรงกับกระแสจริง

ผลจากความแตกต่างของชนิดของเซลล์ (effect of type of silicon)

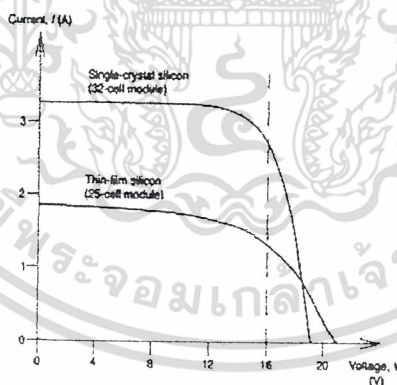
เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดพื้นที่ของเซลล์เท่ากัน single-crystal silicon ให้กระแสสูงสุด polycrystalline silicon ให้กระแสน้อยกว่าเล็กน้อย และ thin film silicon ให้กระแสประมาณครึ่งหนึ่งของกระแสที่ได้จาก single-crystal silicon

ชนิดของ silicon มีผลต่อราคาของแผงเซลล์ด้วยคือ ถ้าสำหรับเซลล์ที่มีพื้นที่เท่ากัน single-crystal silicon ราคาแพงที่สุด และ thin film silicon ราคาถูกที่สุด

รูปที่ 2.17-2.22 นี้ แสดงให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงแฟกเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แบบ single crystalline silicon ในรูป I-V curve

ถ้าสำหรับเซลล์แบบ thin film silicon I-V curve ที่ได้จะแตกต่างไปเล็กน้อยเพราะว่า ซิลิกอนที่ใช้ในการผลิตนั้นใช้ amorphous silicon แทน crystalline silicon

รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบ I-V curve ระหว่าง แผงเซลล์ขนาดเดียวกันที่ทำจาก thin film silicon และ single-crystalline silicon จะเห็นว่า curve ของ thin-film silicon มีค่าต่ำกว่า เพราะว่า thin film ผลิตกระแสน้อยกว่าถ้าเปรียบเทียบที่ขนาดของแผงเซลล์เท่ากัน



รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบ I-V curve ระหว่าง thin film กับ single cell

2.2 เทคนิคในการทำเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 การเตรียมซิลิกอน

ในการทำซิลิกอนให้มีความบริสุทธิ์สูงนั้นจะใช้วิธี Chemical Vapor Deposition Technology (CVD) เป็นวิธีทำให้ซิลิกอนอยู่ในรูปสารประกอบ Trichlorosilane (SiHCl_3) เสียก่อน เพราะ Trichlorosilane มีจุดเดือดต่ำเพียง 31.8 องศาเซลเซียส จึงง่ายต่อการแยกสารนี้ออกจากสารเจือปนอื่น ๆ ได้ง่าย Trichlorosilane นี้เตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดเกลือกับแร่ซิลิกอนดิบที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ใน Fluid-bed Reactor



เมื่อเตรียม Trichlorosilane บริสุทธิ์สูงได้แล้วจึงนำมาแยกกลับเป็นซิลิกอนอีกครั้งหนึ่ง โดยปฏิกิริยา Reduction ด้วยไฮโดรเจนที่กระทำบนฐานผลึกซิลิกอนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยากลับขึ้น

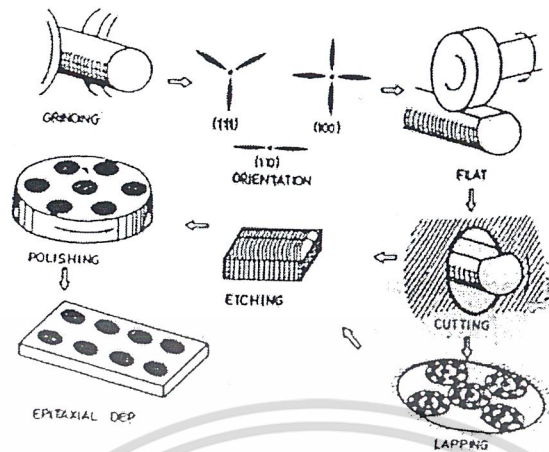


2.2.2 การปลูกผลึกซิลิกอนจากของเหลว

หลังจากได้ Si บริสุทธิ์มาแล้ว เราจะทำการศึกษาการปลูกผลึก การปลูกผลึกซิลิกอนนั้นทำได้โดยการดึงผลึกจากของเหลวโดยอาศัยเมล็ดผลึกที่ทราบทิศทางผลึกที่แน่นอนเป็นวิธีการที่นิยมใช้กัน เรียกว่าวิธีของ Czochalski และนำไปทำให้ผลึกมีความบริสุทธิ์สูงโดยใช้วิธี Floating Zone

2.2.3 การเตรียมแว่นผลึก

เมื่อเตรียมแท่งผลึกซิลิกอนได้แล้ว จะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อทำเป็นแว่นผลึกอีกทีหนึ่ง เริ่มต้นตั้งแต่การกลึงแท่งผลึกให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ แล้วจึงนำไปบากด้านข้างเพื่อกำหนดทิศทางผลึก นำแท่งผลึกดังกล่าวไปตัดเป็นแว่น ๆ ด้วยใบเลื่อยที่มีคมด้านในแล้วจึงนำแว่นผลึกนั้นไปกัดด้วยน้ำยาเคมีเพื่อลดจุดบกพร่องทางผลึกที่ผิวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัด หรือฝนขัดทั้งด้วยวิธีทางเมคานิคัล กระบวนการขั้นสุดท้ายได้แก่การขัดมันเพื่อให้เป็นผิวกระจก แว่นผลึกที่ผลิตสร้างขึ้นจะมีความหนาประมาณ 200-300 ไมครอน แล้วจึงนำไปใช้งานหรือปลูกชั้นผลึกที่มีคุณภาพดีทับอีกชั้นหนึ่งได้ ขั้นตอนกระบวนการเตรียมแว่นผลึกแสดงดังรูป 2.24



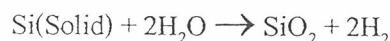
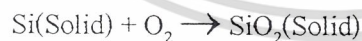
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอน

กรรมวิธีการผลิตแผ่นผลึกซิลิกอนดังกล่าวข้างต้นนั้นมีการสูญเสียเนื้อผลึกเนื่องจากการขัดเรียบ การขัดมัน การกัดด้วยน้ำยาเคมี ฯลฯ ถึง 60% ดังนั้นกรรมวิธีเทคโนโลยีซิลิกอนแบบพลาสมาจึงถูกนำมาใช้ ขั้นตอนของเทคโนโลยีซิลิกอนแบบพลาสมาที่จำเป็นต่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้แก่

1. Thermal Oxidation
2. Solid State Diffusion
3. Photolithography
4. Metallization
5. Annealing

2.2.4 Thermal Oxidation

เป็นการปลูกชั้นออกไซด์บาง ๆ บนแผ่นผลึกซิลิกอน มักทำที่อุณหภูมิสูง ปฏิกริยาทางเคมีที่ใช้อาจเป็นได้ทั้งแบบออกซิเจนแห้งและออกซิเจนเปียก คือ



ก๊าซที่มีส่วนผสมของตัวทำออกซิเดชันได้แก่ ออกซิเจนและ/หรือไอน้ำจะไหลเข้าไปในเตาที่มีแผ่นผลึกซิลิกอนวางไว้ด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม อุณหภูมิ เวลาและอัตราการไหลของก๊าซในเตาจะเป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นออกไซด์ตลอดจนคุณภาพของชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้น

หน้าที่สำคัญของชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้น ได้แก่ การใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ซึมของสารเจือปน ความหนาต่ำสุดที่จะทำหน้าที่นี้จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า $2000\text{\AA}$ ความหนาปกติที่นิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

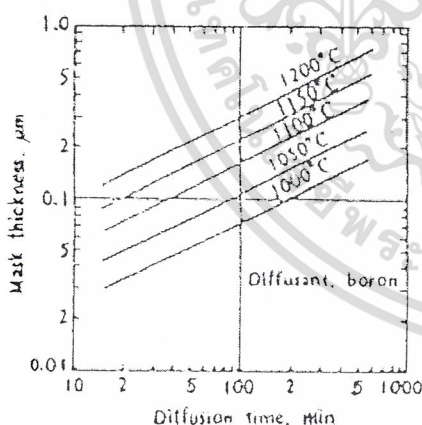
กันในการทำหน้าที่เป็นหน้าฉากสำหรับการแพร่ซึมนี้จะมีค่าประมาณ $5000\text{\AA}$ ในตำแหน่งที่ต้องการจะสร้างหัวต่อพีเอ็นจำเป็นต้องมีการเปิดช่องหน้าต่างของชั้นออกไซด์เพื่อทำการแพร่ซึม

2.2.5 Solid State Diffusion

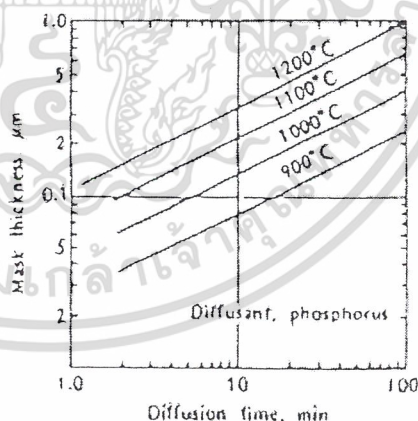
Solid State Diffusion คือ กระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนลงในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเพื่อสร้างหัวต่อพีเอ็น โดยสามารถควบคุมชนิดและความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ตามต้องการ

การแพร่ซึมสารเจือปนนี้แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ Predeposition และ Drive-in สำหรับ Predeposition นั้น ได้แก่ การชักพาให้สารเจือปนเข้าสู่สารกึ่งตัวนำเพียงชั้น ๆ ส่วน Drive-in นั้น ได้แก่ การแพร่ซึมสารเจือปนให้เข้าลึกลงไปเนื้อสารกึ่งตัวนำเพื่อให้มีการกระจายความเข้มข้นของสารเจือปนในรูปลักษณะที่ต้องการ โดยมีข้อเดิมสารเจือปนเพิ่มลงไปอีก

ในกรณีที่มิมีชั้นออกไซด์ที่เปิดหน้าต่างไว้ การแพร่ซึมจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่เปิดไว้เท่านั้น บริเวณที่มีชั้นออกไซด์ปิดกั้นไว้ จะไม่มีการแพร่ซึมเกิดขึ้น แต่ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวก็มีขีดจำกัด บางเกินไปไม่ได้ ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้าฉากสำหรับการแพร่ซึมของ โบรอนและฟอสฟอรัสในซิลิกอนมีแสดงดังรูปที่ 2.25 และรูปที่ 2.26 ตามลำดับ



รูปที่ 2.25 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ใช้กันการแพร่ซึมของโบรอน



รูปที่ 2.26 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ใช้กันการแพร่ซึมของฟอสฟอรัส

2.2.6 Photolithography

Photolithography ได้แก่ขั้นตอนการถ่ายแบบจากฟิล์มหรือแผ่นกระจกลงสู่แผ่นผลึก โดยอาศัยน้ำยาไวแสงที่เรียกว่า photoresist ซึ่งจะมีความรู้สึกไวต่อแสงอุลตราไวโอเล็ตได้ดี น้ำยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวแสงที่ใช้จะเป็นสารละลายที่มีความเหนียวหนืดคล้ายน้ำหวาน เพื่อการยึดจับที่ดีกับผิวแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยความหนาบางที่ต้องการ

คุณภาพของชั้นไวแสงที่เตรียมบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ดีหมายถึง ความคมคายของลวดลายที่สร้างขึ้น ในการทำแบบของลายนิ้วมือเพื่อสร้างผิวสัมผัสของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ต้องการความคมชัดของชั้นโลหะที่หนาและแคบเพื่อให้แสงตกกระทบเซลล์มากที่สุด ในขณะที่พาหะถูกรวบรวมด้วยขั้วไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

2.2.7 Metallization

Metallization ได้แก่ การทำขั้วโลหะให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้น Metallization เป็นขั้นตอนการผลิตที่มีความสำคัญมาก เพราะหากขั้วโลหะที่สร้างขึ้นมีคุณภาพไม่ดีแล้ว ก็จะไม่สามารถนำเอาลักษณะสมบัติที่แท้จริงของสิ่งประดิษฐ์เหล่านั้นออกมาใช้งานได้ ขั้วโลหะที่ใช้กับซิลิกอนจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. เป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกกับซิลิกอน
2. มีการนำไฟฟ้าที่ดี ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยที่แรงดันไฟฟ้าไม่ตก
3. มีแรงยึดเหนี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ดี
4. เป็นโลหะที่ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายต่อสภาพแวดล้อม
5. เชื่อมต่อกับสายภายนอกได้ง่าย
6. มีราคาถูก

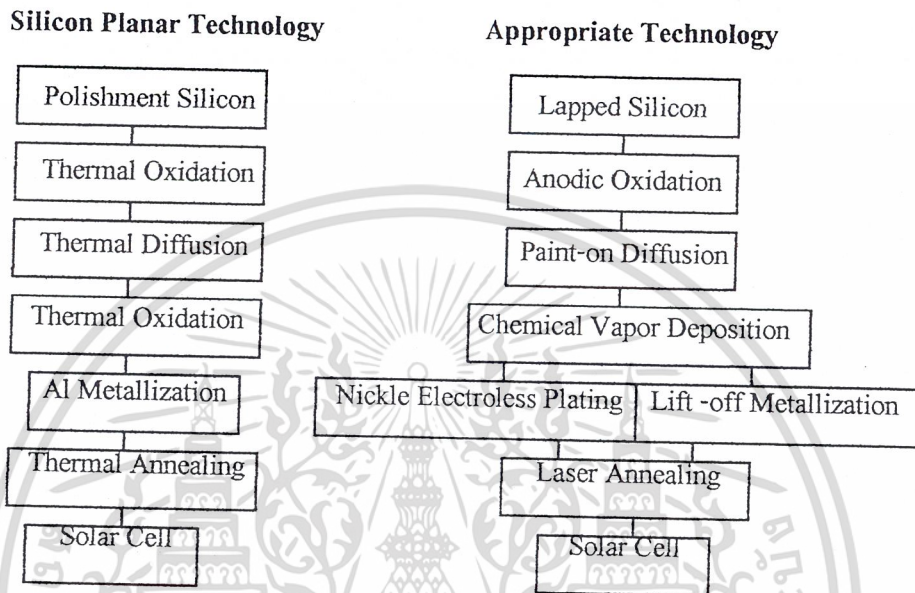
โลหะที่มีคุณสมบัติทุกอย่างเป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นนั้นหาได้ยาก อะลูมิเนียมดูเหมือนจะเป็นโลหะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตของเทคโนโลยีซิลิกอนแบบพลาสมาโดยทั่วไป แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมักจะใช้เป็นชั้นโลหะอะลูมิเนียมที่มีโลหะชนิดอื่น ๆ ปิดทับอีกหลายๆ ชั้นเพื่อให้ได้ขั้วโลหะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน

2.2.8 Annealing

Annealing เป็นขั้นตอนการผลิตหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ เพราะถ้าเพียงการทำ Metallization แต่อย่างเดียวไม่ได้เป็นการรับประกันว่าผิวสัมผัสที่สร้างขึ้นจะมีคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางแมคานิกส์ การทำให้อะลูมิเนียมและซิลิกอนที่บริเวณผิวรอยต่อ (Interface) เป็นสภาพสารผสม (Alloy) จะช่วยให้ได้ผลตามต้องการ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า Annealing ซึ่งเป็นการอบความร้อนแก่สิ่งประดิษฐ์ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยที่อุณหภูมิที่เหมาะสม

หากเราพิจารณาจากขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนแล้ว จะเห็นว่า การใช้ Silicon Planar Technology ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

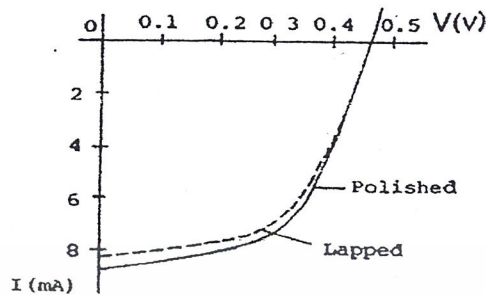
โดยทั่วไปนั้นสิ้นเปลือง มีประสิทธิภาพในการผลิตต่ำ ทำให้ราคาเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาแพง จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาแทนที่แต่ละขั้นตอนให้เหมาะสมดังข้อเสนอนี้ใน flow-chart ที่แสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27เปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผลิตแบบมาตรฐานและแบบที่ใช้เทคโนโลยีเหมาะสม

2.2.9 การใช้แผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดหยาบเป็นวัสดุเริ่มต้นในการทำเซลล์แสงอาทิตย์

ในกระบวนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอน ตั้งแต่การแตงตัดแผ่นผลึก ขัดผ่นแผ่นผลึก การกัดด้วยน้ำยาเคมี การขัดมันผิวแผ่นผลึก เป็นขั้นตอนที่กินเวลา สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและมี loss ของเนื้อวัสดุมาก สำหรับเทคโนโลยีเหมาะสมที่จะกล่าวถึงนี้จะเน้นถึงการใช้แผ่นผลึกซิลิกอนที่ไม่ได้ผ่านการขัดมัน (Polishing) แต่เป็นเพียงแผ่นผลึกขัดหยาบ (Lapped Wafer) เพื่อใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการทำเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อทำการทดลองนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดหยาบมาทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบกับกับสมรรถนะของเซลล์ฯ ที่สร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดมัน ปรากฏผลว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดหยาบมิได้มีข้อด้อยกว่า ดังผลแสดงในรูปที่ 2.28

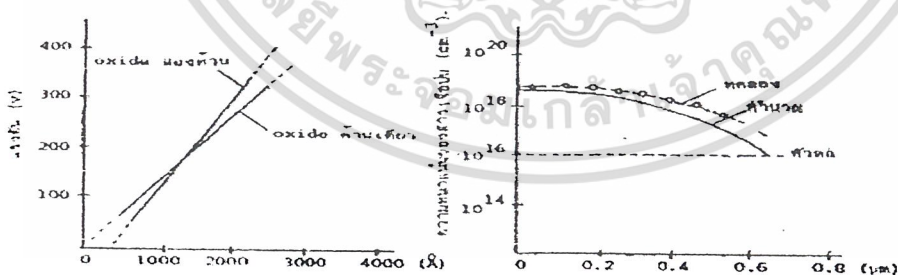


รูปที่ 2.28 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดหยาบ เปรียบเทียบกับของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบขัดมันที่มีพื้นที่รับแสงเท่ากัน

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าคุณภาพของหัวต่อพีเอ็นที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกแบบขัดหยาบอาจมีคุณภาพด้อยอยู่บ้าง เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของหัวต่อที่เกิดจากจุดบกพร่องทางผลึกหรือกระแสรั่ว และอัตราการรวมตัวที่ผิวสูงขึ้น แต่ก็สามารถชดเชยกับการเพิ่มของความสามารถในการดูดกลืนแสง เนื่องจากผิวผลึกมีความหยาบขึ้น

2.2.10 Anodic Oxidation

การพัฒนาเทคนิคของ Anodic Oxidation นี้มีจุดประสงค์หลายประการได้แก่ การทำชั้นออกไซด์ของซิลิกอนโดยวิธีทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิห้อง และใช้เครื่องมือในการใช้งานง่าย ๆ ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะหนาเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ ชั้นออกไซด์และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำ Anodic Oxidation

รูปที่ 2.30 ตัวอย่างของ Impurity Profile ที่วัดได้โดยวิธีการทำ Anodic Oxidation

แล้วลอกผิวเพื่อวัดค่าความต้านทานจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟคุณภาพของชั้นออกไซด์ที่ได้จะไม่ดีนัก เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของปฏิกิริยาออกซิเดชันและความบริสุทธิ์ของสารละลายที่ใช้ จุดประสงค์อีกประการได้แก่ การนำเอาเทคนิคนี้มาใช้ประโยชน์ในการวัดหาลักษณะความหนาแน่นของสารเจือปน (Impurity Profile) ที่เกิดขึ้นจากการแพร่ซึมว่ามีรูปลักษณะเช่นใด และมีความลึกของหัวต่อเท่าไร โดยการทำ Anodic Oxidation เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์บาง ๆ ที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอน แล้วจึงนำไปลอกออกด้วยน้ำยาเคมี ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ที่มีความลึกต่างๆ จะบอกถึง Impurity Profile และจุดที่ Type ของสารกึ่งตัวนำเกิดเปลี่ยนแปลงจะบอกความลึกของหัวต่อ ดังตัวอย่างของผลการทดลองในรูปที่ 2.30 เป้าหมายในการใช้งานอีกอันหนึ่งของชั้นออกไซด์ที่พ่นขึ้นได้แก่ การใช้เป็นชั้นกั้นการแพร่ซึม ชั้นออกไซด์ที่สามารถทำหน้าที่เช่นนี้ควรมีความหนาแน่นเกินกว่า $2000 \text{ \AA}^0$ จึงจะเพียงพอ แต่ได้พบว่าการใช้เทคนิค Anodic Oxidation นี้มีขีดจำกัดที่ค่าความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ประมาณ $2000 \text{ \AA}^0$ เนื่องจากลักษณะสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ อย่างไรก็ตามการใช้ชั้นออกไซด์ที่บาง ($<2000 \text{ \AA}^0$) นั้นเพียงพอแล้วต่อการแพร่ซึมที่ใช้เทคนิคแบบ Paint-on Diffusion ขีดจำกัดอีกประการหนึ่งของเทคนิคนี้ได้แก่ แวนผลึกซิลิกอนที่ใช้ทำชั้นออกไซด์ เนื่องจากการดูดซับแวนผลึกที่มีขนาดโตให้ติดกับขั้วไฟฟ้าข้างหนึ่งนั้นกระทำไม่ได้ไม่สะดวกนัก จึงต้องมีการดัดแปลงตัวจับแวนผลึกให้มีความสามารถยึดจับแวนผลึกได้ดีและมีจำนวนมาก

2.2.11 Paint-on Diffusion

เมื่อได้พิจารณาจากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่ หัวต่อพีเอ็นที่สร้างขึ้นจากชั้นแพร่ซึมที่เป็น Heavily Doped และมีความลึกของหัวต่อพีเอ็นต้น ๆ แล้ว ความจำเป็นต้องใช้วิธีการแพร่ซึมแบบ Solid State Diffusion จึงมีน้อยลง ลักษณะเด่นของวิธี Paint-on Diffusion คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ไม่สูงมากนักเพื่อที่จะให้หัวต่อพีเอ็นมีความลึกที่เหมาะสม ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับกรณีของการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่ารูปลักษณะภายนอกของผิวหลังการแพร่ซึมจะมีความสกปรกหลงเหลือให้เห็นบ้าง เนื่องจากการใช้สารเคมีที่ไม่สะอาดนัก

ลักษณะการแพร่ซึมแบบ Paint-on นี้ได้แก่ การลดขั้นตอนของการแพร่ซึมแบบ Predeposition เพราะการทาสารเจือปนบนแวนผลึกเป็นการนำสารเจือปนจำนวนมากพอไปไว้ที่ผิวของแวนผลึกเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนที่เหลือจึงได้แก่การ Drive-in เท่านั้น

เทคนิคการทำ Paint-on Diffusion นี้สะดวกทั้งใช้ในการแพร่ซึมแวนผลึกทั้งด้านเดียวและสองด้าน แล้วแต่จะทาสารเจือปนนั้นหน้าเดียวหรือสองด้าน หรือจะเลือกหาที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง การสร้างชั้นออกไซด์เพื่อกันการแพร่ซึมไม่จำเป็นนัก หรืออาจใช้ชั้นออกไซด์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการทำ Amodic Oxidation ก็เพียงพอแล้ว ปัญหาหนึ่งของเทคนิคนี้ได้แก่ ความสม่ำเสมอในการทาสารเจือปน จึงอาจจะพัฒนามาเป็นแบบ Spin-on Diffusion ได้

2.2.12 Chemical Vapor Deposition (CVD)

เทคนิคการทำฟิล์มบางโดยวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) ที่เป็นเทคโนโลยีเหมาะสมนี้ได้แก่ การทำชั้นคีนอกออกไซด์ (SnO_2) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปลักษณะต่าง ๆ เช่น

1. ใช้เป็นชั้นกั้นการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
2. ใช้เป็นขั้วโลหะ โปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
3. ใช้สร้าง Heterojunction ของเซลล์แสงอาทิตย์
4. ใช้สร้าง Semiconductor-Insulator-Semiconductor (SIS)
5. ใช้เป็น Window Effect ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.13 Nickel Electroless Plating

ในกรรมวิธีการทำผิวสัมผัสโลหะที่ใช้ในเทคโนโลยีซิลิกอนแบบพลาสมา นั้นได้แก่ Aluminium Metallization ซึ่งอาศัยการทำให้อะลูมิเนียมหลอมละลายจนกลายเป็นไอภายใต้สุญญากาศ กรรมวิธีดังกล่าวต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากและมีราคาแพง นอกจากนั้นการใช้วัสดุสิ้นเปลืองยังไม่มีประสิทธิภาพเพราะมีอะลูมิเนียมเพียงไม่กี่ส่วนที่ใช้งานจริง ๆ เนื้อวัสดุส่วนใหญ่กระจายไปติดส่วนอื่น ๆ และบางส่วนก็ต้องถูกตัดทิ้งไปในขั้นตอนการทำ Photolithography

การพัฒนาการสร้างผิวสัมผัสโลหะโดยวิธี Electroless Plating จะเป็นเทคโนโลยีเหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ โลหะที่ใช้ชุบได้แก่ นิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่มีเสถียรภาพดีและบัดกรีตะกั่วได้ เทคนิคการชุบนิกเกิลแบบไร้ไฟฟ้านี้ เป็นกรรมวิธีที่ใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ คือ ใช้บีกเกอร์อุ่นน้ำยาชุบให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วจึงจุ่มแซ่แวนผลึกลงไปในน้ำยาจะเกิดชั้นนิกเกิลพอกหนาที่ผิวซิลิกอน แต่จะไม่เกิดขึ้นกับผิวซิลิกอนไดออกไซด์ ดังนั้นเนื้อนิกเกิลที่ใช้ทำผิวสัมผัสจึงถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตที่ต่ำ

ชั้นนิกเกิลที่ชุบได้จะติดเฉพาะผิวซิลิกอนและผิวโลหะเท่านั้น ดังนั้นหากเจาะช่องออกไซด์ให้เป็นลวดลายแล้วจึงนำไปชุบ ชั้นนิกเกิลที่ได้จะมีลวดลายตามช่องที่เจาะไว้ จึงสะดวกมากเพราะไม่ต้องถ่ายแบบเพื่อกัดลวดลายบนชั้นโลหะอีก ชั้นออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากากในการชุบนี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นการสะท้อนแสงได้ดีอีกด้วย

2.2.14 Lift-off Metallization

Lift-off Metallization นี้เหมาะกับการทำลวดลายนิ้วมือของขั้วโลหะเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะลวดลายดังกล่าวมักมีขนาดเล็ก แต่บิกโลหะที่ใช้มีหน้ากว้าง (น้อยกว่า 100 ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร) ความคมของเส้นโลหะที่ได้จากเทคนิคนี้เพียงพอสำหรับการใช้งาน แต่ถ้าแถบโลหะมีความละเอียดและหน้าแคบ เทคนิคนี้จะใช้การไม่ค่อยได้ผล เนื่องจากความคมคายของลวดน้อยลง และอาจเกิดการขาดของแถบโลหะได้ ข้อเสียของเทคนิค Lift-off Metallization อีกประการหนึ่งได้แก่ การเกิด Contamination แก่เครื่องฉาบไอโลหะภายใต้สุญญากาศ เพราะขณะที่จะฉาบไอโลหะนั้นผิวของแว่นฟลักมีสารไวแสงฉาบอยู่ ในสภาวะสุญญากาศที่มีค่าสูง ๆ เช่นนี้ อาจเกิดการปลดปล่อยสิ่งแปลกปลอมที่มาจากสารไวแสงนี้ได้ และอาจทำให้อายุการใช้งานของเครื่องฉาบไอสุญญากาศเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร ดังนั้น เทคนิคนี้จึงเป็นเทคนิคที่ไม่ขอแนะนำให้ใช้งาน นอกจากจะมีการปรับปรุงเทคนิคใหม่เสียก่อน

2.2.15Laser Annealing

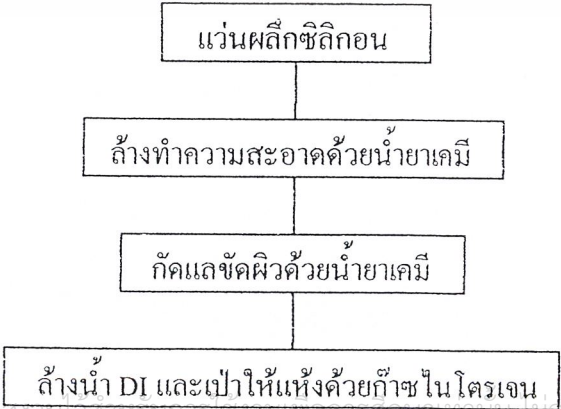
เทคนิคของเลเซอร์นี้จะมีประโยชน์ต่อกรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายลักษณะ ได้แก่

- 1.Laser Annealing สำหรับ Ion Implanted Solar Cell ให้มี Damage น้อยลง
- 2.Laser Induced Diffusion เพื่อสร้างหัวต่อพีเอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3.Laser Recrystallization เพื่อเพิ่มขนาด Grain Size ของ Poly-crystalline Solar Cell
- 4.ปรับปรุงคุณภาพของหัวต่อพีเอ็นที่ทำขึ้น โดยวิธี Thermal Diffusion ได้แก่การลด Dead Layer ที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์

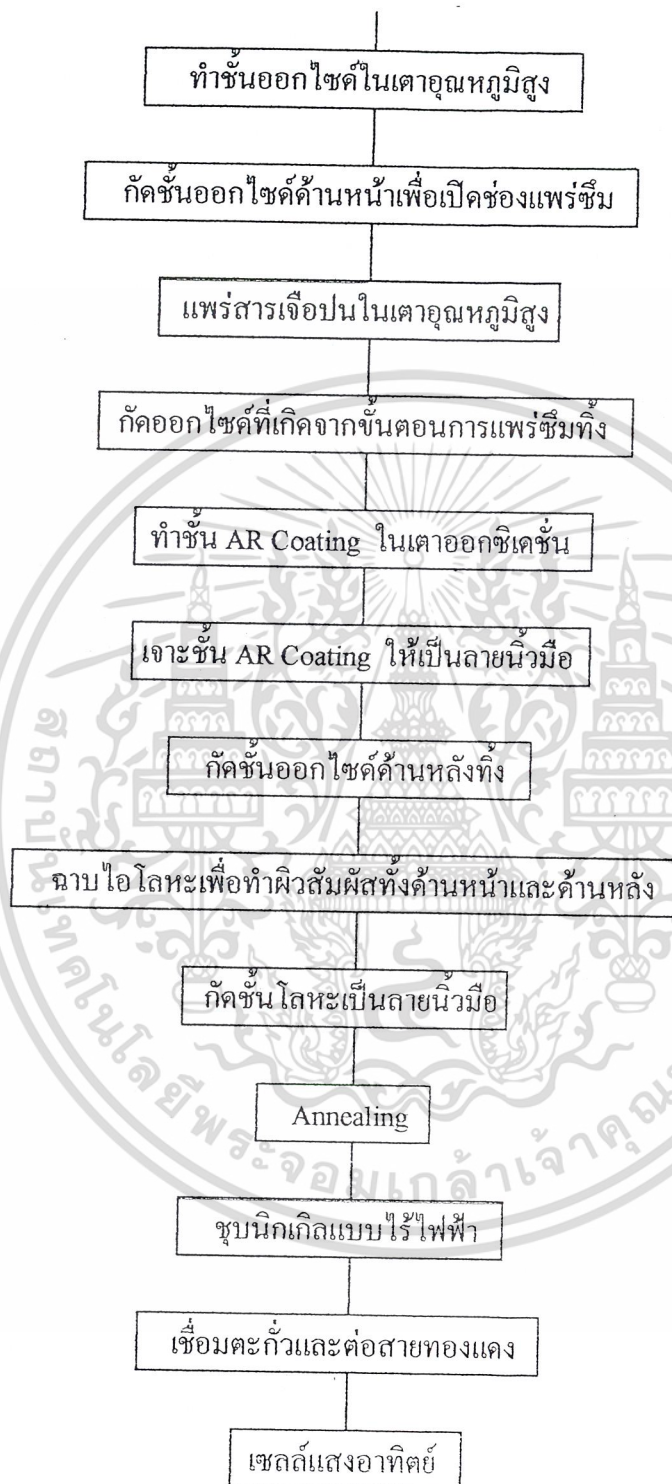
2.3กรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1วิธีการผลิตSingle Cell แบบหัวต่อพีเอ็น

โครงสร้างหัวต่อพีเอ็นเป็นแบบที่ประดิษฐ์ง่ายและมี reproducibility สูงด้วยกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เทคโนโลยีซิลิกอนแบบพลาสมา โดยมีขั้นตอนตามแผนภูมิดังต่อไปนี้ สำหรับการทำให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นอาจมีการคัดแปลงวิธีการและเงื่อนไขการผลิตบ้างเพื่อความเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นอาจเป็นพีหรือเอ็นก็ได้ แล้วแต่ว่าจะเลือกทำ หัวต่อพีเอ็นหรือเอ็นพี ในที่นี้ขอยกตัวอย่างกรรมวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนที่เริ่มต้นด้วยชนิดพี โดยใช้แผ่นผลึกที่มีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ใน order ของ $1\Omega\text{-cm}$ มีความหนาประมาณ 200 ไมครอน และมีผิวขัดมันเป็นกระจกทางด้านหน้า ส่วนด้านหลังเป็นผิวขัดหยาบธรรมดา

ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นจากการใช้ Trichlorosilane ล้างไขมันและสิ่งสกปรกจากผิว และล้างตามด้วย Acetone และน้ำ DI ตามลำดับ จากนั้นจึงกัดผิวด้วยกรด HNO_3 และ HF แล้วจึงล้างด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนที่แห้งและสะอาด

นำแผ่นผลึกซิลิกอนไปสร้างชั้นออกไซด์ในเตาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยออกซิเจนเปียก โดยมีอัตราการไหลของออกซิเจนผ่านน้ำ DI (อุณหภูมิประมาณ 85-90 องศาเซลเซียส) ประมาณ 0.4 l/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมงครึ่ง จะได้ชั้นออกไซด์ที่หนาประมาณ $7500 \text{ \AA}$ แผ่นผลึกซิลิกอนจะมีสีม่วงอมเขียว(คล้ายสีปีกแมลงทับ)

นำแผ่นผลึกที่มีชั้นออกไซด์ปกคลุมทั้งสองหน้ามาฉายชั้นโวลแฟนแบบทางบวกทางด้านหน้าโดยใช้เครื่องปั๊มแผ่นผลึก อบสารโวลแฟนให้แข็งตัวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาประกบกับหน้ากากในเครื่อง Mask Aligner ฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Polymerization ล้างด้วยน้ำยาเคมีเพื่อให้สารโวลแฟนส่วนที่เกิดปฏิกิริยา Polymerization ละลายหลุดไป นำแผ่นผลึกดังกล่าวไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารโวลแฟนส่วนที่เหลือแข็งตัว และยึดเกาะแผ่นผลึกได้ดีขึ้น

หลังจากที่ทา Wax ทับบนชั้นออกไซด์ด้านหลังแล้วจึงนำแผ่นผลึกดังกล่าวไปใส่ในน้ำยาคัดซิลิกอนไดออกไซด์ด้วย Buffered $\text{HF}(\text{NH}_4\text{F } 115 \text{ gm}, \text{HF} 240 \text{ ml}, \text{H}_2\text{O } 160 \text{ ml})$ เพื่อเปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่ซึมสารเจือปน

ล้าง Wax และสารเจือปนที่เหลือด้วย Trichloroethylene-Acetone-DI Water ตามลำดับ แล้วล้างผิวให้สะอาดด้วย $\text{Hot H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} (3:1)$ และน้ำ DI จุ่มกักในน้ำยา Buffered HF และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้งหนึ่ง เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจนสะอาด แผ่นผลึกก็พร้อมที่จะนำเข้าเตาแพร่ซึมต่อไป

การแพร่ซึมสารเจือปนกระทำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส โดยใช้สารเจือปนที่มีอยู่ในสารประกอบ POCl_3 ซึ่งเป็นของเหลว ก๊าซนาพาที่ใช้ ได้แก่ ไนโตรเจนที่ Bubble ผ่าน POCl_3 ผสมกับ ไนโตรเจนและออกซิเจนด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีอัตราการไหลรวมประมาณ 1.5 l/min เมื่อนำแผ่นผลึกเข้าไปในเตาเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำชั้นออกไซด์ก่อนด้วยออกซิเจนแห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจึงทำการนำพาสารเจือปนไปยังผิวแผ่นผลึกเพื่อการ Predeposition จากนั้นจึงทำการ Drive-in ต่อเมื่อเกิดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะทำการแพร่ซึมทั้ง แล้วจึงนำไปวัดด้วยเครื่อง โพรบส์เข็มเพื่อ ตรวจสอบคุณสมบัติและค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นแพร่ซึมที่เกิดขึ้นใหม่ หัวต่อพีเอ็นที่ทำขึ้น ควรมีความลึกอยู่ระหว่าง 0.3-0.6 ไมครอน

นำแผ่นผลึกที่มีหัวต่อพีเอ็นแล้วไปเข้าเตาออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้น AR Coating ที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสด้วยออกซิเจนเปียก ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ควรหนาประมาณ 800-1000 Å จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกไปกัดชั้น AR Coating เพื่อเปิดช่องทำผิว สัมผัสด้วยเทคนิค Photolithography ด้วยชั้นคอนคลายคลึงกับที่กล่าวไว้ข้างต้น ทา Wax กับลวด ลายทางด้านหน้าแล้วจุ่มในน้ำยาซักออกไซด์เพื่อกัดออกไซด์ทางด้านหลังทิ้งเสียล้างแผ่นผลึกด้วย Trichloroethylene-Acetone-DI Water เป่าแห้งด้วยไนโตรเจนสะอาด แล้วจึงนำไปอบแห้งในเตา อุณหภูมิสูงเพื่อไล่สิ่งสกปรก

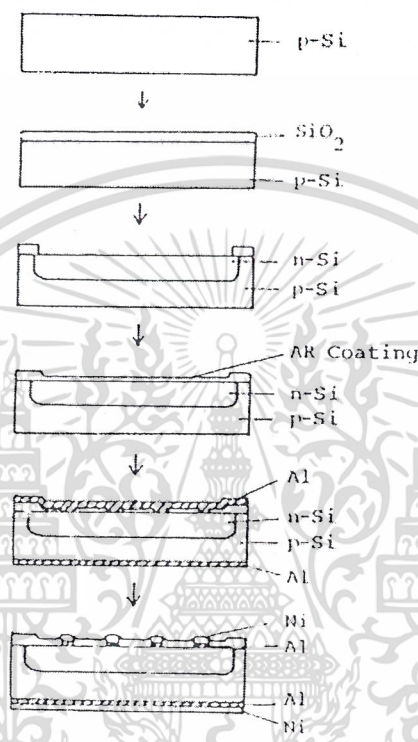
นำแผ่นผลึกเข้าไปไว้ในเครื่อง Vacuum Evaporator อุดสุญญากาศให้มีค่า 10^{-6} Torr ด้วย Rotary Pump และ Diffusion Pump ตามลำดับ ฉายแสงหลอดไฟทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ แผ่นผลึกให้สูงขึ้นเพื่อขับไล่สิ่งสกปรกหรือคราบน้ำที่อาจติดอยู่ที่ผิว ลดอุณหภูมิให้แผ่นผลึกเย็น เป็นปกติ แล้วจึงเริ่มทำ Metallization ได้ การทำ Metallization ควรมีอัตราการระเหยของไอโลหะ ที่เหมาะสม โลหะที่ใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม ความหนาของชั้นโลหะที่ใช้ทำผิวสัมผัสทั่วไปจะมีค่า ประมาณ 5000 Å

เมื่อทำ Metallization ทั้งสองด้านของแผ่นผลึกแล้ว จึงใช้เทคนิค Photolithography เพื่อกัดขั้ว โลหะด้านหน้าให้เป็นลวดลายนิ้วมือตรงกับช่องลวดลายที่เปิดชั้น AR Coating ไว้เดิม นำผิวสัมผัสดังกล่าวไป Anneal ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม

แผ่นผลึกในสภาพที่ทำถึงขั้นตอนนี้ มีโครงสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สมบูรณ์แล้ว แต่ขั้วโลหะอะลูมิเนียมนั้นต่อสายไฟฟ้าไม่ได้ด้วยวิธีบัดกรีธรรมดา จึงต้องนำเอาโลหะที่บัดกรีได้ ไปจาบทับอะลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่ง ได้แก่ ชั้นนิกเกิลที่เตรียมได้โดยวิธีชุบแบบไร้ไฟฟ้า น้ำยาชุบ นิกเกิลจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และ pH 8-10 ขณะที่ทำการชุบ การควบคุม อุณหภูมิและ pH ของน้ำยาให้มีค่าคงที่และสม่ำเสมอเป็นเงื่อนไขที่สำคัญในการชุบนิกเกิลที่ดี นิกเกิลจะติดดีกับชั้นอะลูมิเนียมและซิลิกอน แต่จะไม่ติดกับชั้นออกไซด์เลย ชั้นนิกเกิลที่จาบทับ อะลูมิเนียมนี้จะมีสีโลหะด้านเมื่อหน้าพอสมควร

นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นนิกเกิลติดทับไว้นำไปอาบตะกั่วและต่อสายไฟฟ้าด้วยหัว แรงบัดกรี ก็เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น รูปที่ 2.8 แสดงถึง สภาพของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นสุดท้าย

ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

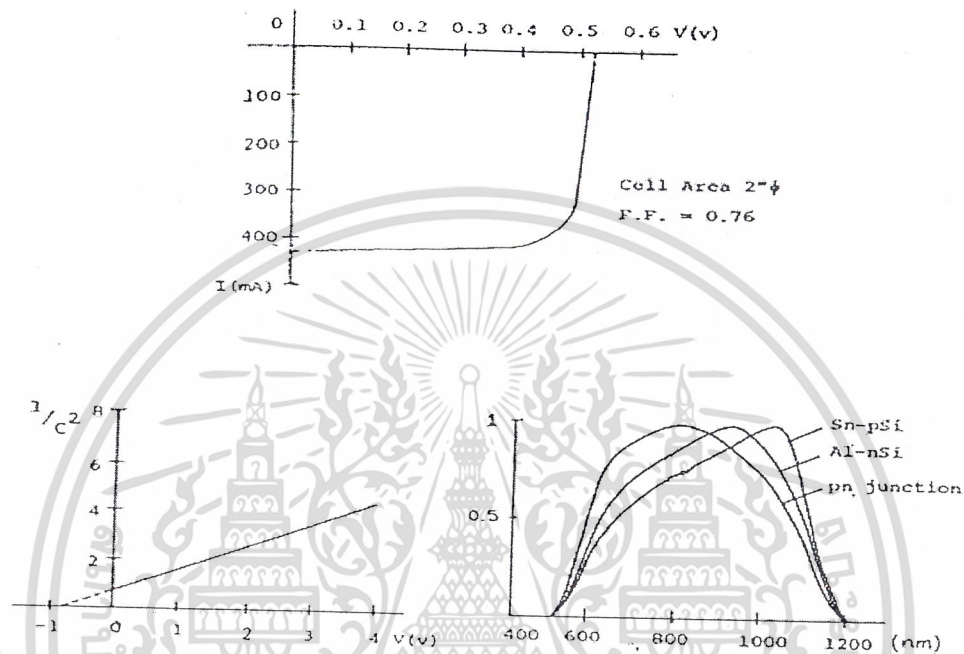


รูปที่ 2.31 สภาพของเว่นผลึกซิลิกอนที่ขั้นตอนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จ

นำเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบหั่วต่อพีเอ็นที่สร้างขึ้นด้วยขั้นตอนการผลิตดังกล่าวไป

ตรวจสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันด้วยเครื่อง Curve Tracer จะได้ผลดังตัวอย่างในรูปที่ 2.32

รูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34 เป็นลักษณะสมบัติแคแปซิแตนซ์-แรงดันและ spectrum response ของ
เซลล์ที่ทดลองสร้างขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 2.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

รูปที่ 2.33 ลักษณะสมบัติแคแพซิแตนซ์-แรงดัน

รูปที่ 2.34 Spectrum Response

2.3.2 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Polycrystalline

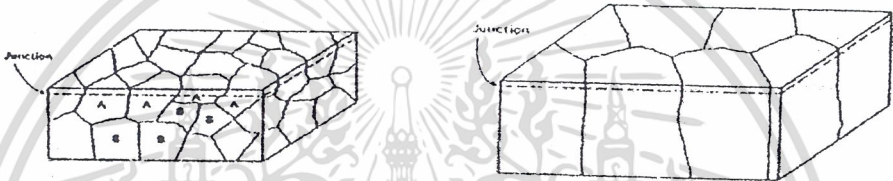
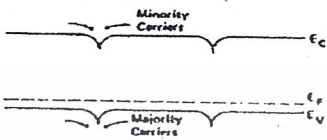
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จาก Polycrystalline ที่มีโครงสร้างแบบ Fibrous Orientation ในทางปฏิบัตินั้นมีหลักใหญ่อยู่ 2 ข้อ เพื่อที่จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดี คือ

1. ผลึกย่อยจะต้องมีขนาดโตกว่า 100 ไมครอน และเนื้อผลึกจะต้องดีพอที่จะให้ค่าความยาวแพร่ซึมของพาหะที่เหมาะสม เพื่อให้การเก็บสะสมพาหะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
2. จะต้องไม่มี Grain Boundary ขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ต้องมีโครงสร้างแบบ Fibrous Orientation ดังรูป 2.35

เมื่อผลึกมีโครงสร้างแบบ Polycrystalline ผลึกย่อยแต่ละส่วนจะมี grain Boundary ขึ้น Grain Boundary จะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ อิทธิพลของ Grain Boundary มีทั้งต่อกระแสโฟโตและกระแสรั่วของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อผลึกย่อยมีขนาดเล็ก และอัตราการเร็วในการรวมตัวที่ผิวมีค่าสูง เวลาชีวิตของพาหะในผลึกย่อยจะสั้นมาก ในการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า Grain Boundary ทำหน้าที่เป็น Sink ของพาหะข้างน้อย และเป็น Barrier สำหรับพาหะข้างมาก ดังรูปที่ 2.35 จึงส่งผลให้ค่ากระแสโฟโตน้อยลง กระแสมีค่าน้อยลง และทำให้ค่าความต้านทานจันลดน้อย ในขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.35 อิทธิพลของ Grain Boundary

รูปที่ 2.36 ผลึกย่อยแบบ Fibrous Orientation

รูปที่ 2.37 ผลึกแบบ polycrystalline

ที่นำมาประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

หากผลึก Polycrystalline มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.37 กล่าวคือ ผลึกย่อยมีทิศทาง

กระจัดกระจาย ผลึกย่อยส่วนที่จะมีบทบาทต่อการเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ส่วนที่อยู่ส่วนบนเท่านั้น(คือส่วนที่เป็น A ในรูปที่ 2.37) แต่ส่วนที่อยู่ด้านล่าง(คือส่วนที่เป็น B ในรูปที่ 2.37) จะถูกแยกจากหัวต่อพีเอ็นด้วย Grain Boundary ที่อยู่เหนือผลึกย่อยเหล่านั้นและเป็นลักษณะที่ทำให้เวลาชีวิตของพาหะมีค่าน้อยมาก และเป็นสาเหตุให้เซลล์มีสมรรถนะต่ำแต่ถ้าโครงสร้างของผลึกย่อยเป็นแบบ Fibrous Orientation ดังรูปที่ 2.36 พาหะในแต่ละผลึกย่อยจะมีส่วนในการทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าของเซลล์โดยที่ไม่คายหรือรวมตัวกันก่อนเนื่องจาก Grain Boundary ผลึกย่อยแต่ละส่วนจึงเปรียบเสมือนเซลล์แสงอาทิตย์ย่อย ๆ ต่อขนานกันอยู่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก Polycrystalline ที่มีโครงสร้างแบบ Fibrous Orientation นี้จึงมีสมรรถนะใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก Single Crystal

การเตรียมแผ่นผลึก

วัสดุเริ่มต้นเป็นแผ่นผลึกแบบโพลีคริสตัลไลน์ ซึ่งได้จากวิธีการปลูกผลึกแบบหล่อ การเตรียมแผ่นผลึกจะใช้น้ำยาเคมีเพื่อลดความบกพร่องที่ผิวหน้าอันจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่ผิว ลดน้อยลง ซึ่งจะนำไปสู่ประสิทธิภาพของเซลล์ที่สูงขึ้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

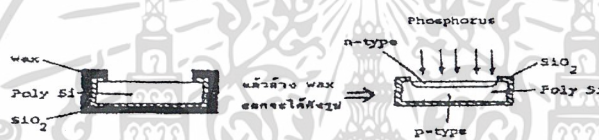
ล้างฝุ่นและคราบไขมัน

- แช่ใน Trichloro-ethylene ใน Ultrasonic Cleaner
 - แช่ใน Acetone ใน Ultrasonic Cleaner
 - แช่ในน้ำปอลดอออน (DI) ใน Ultrasonic Cleaner
 - จุ่มในน้ำ DI เย็น
 - ต้มใน Acetone 5 นาที
 - ต้มใน Trichloro-ethylene 5 นาที
 - ต้มใน Acetone 5 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI เย็น 2 นาที
 - ต้มในน้ำ DI 3 บีกเกอร์ติดต่อกัน
 - จุ่มในน้ำ DI เย็นที่ไหลรินจนสะอาด
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- การกัดผิว (etching) เพื่อลดความบกพร่อง
- ต้มในกรด HNO_3 70% 10 นาที
 - ต้มในน้ำ DI 5 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI เย็นที่ไหลรินจนสะอาด
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - จุ่มในน้ำกรด HF 50% ที่อุณหภูมิห้อง 2 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI เย็นที่ไหลรินจนสะอาด
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การปลูกชั้นออกไซด์ด้วยความร้อน

กระทำในเตาเปิดเป็นการปลูกออกไซด์แบบเปียก(wet oxydation) โดยผ่านก๊าซ ออกซิเจนเข้าไปในน้ำ DI อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แล้วเลยเข้าไปในท่อควอทซ์ของเตา อุณหภูมิของเตา 1000 องศาเซลเซียส นำแผ่นผลึกไว้ในเตา 2 ชั่วโมง 30 นาที จะได้ออกไซด์ของซิลิกอน ออกไซด์ที่ได้จะเคลือบผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึก ทำการกัดออกไซด์ที่ด้านหน้าออกยก เว้นบริเวณขอบเพื่อให้เป็นบริเวณที่ต้องการสร้างหัวต่อพีเอ็นดังนี้

ผิวด้านหน้าทา Apizon wax เฉพาะที่ขอบ ส่วนด้านหลังทา Apizon wax ทั้งหน้า รวมทั้งทา Apizon wax ที่สันของแผ่นผลึกด้วย หลังจากนั้นนำไปลอยในน้ำยา buffer HF โดยคว่ำผิวด้านล่าง ออกไซด์บริเวณที่ไม่มี Apizon wax เคลือบจะถูกกัดออกเป็นดังรูปที่ 2.38(ก)



รูปที่ 2.38(ก)ผิวด้านหน้า รูปที่ 2.38(ข)ผิวด้านหลัง

การแพร่ซึมฟอสฟอรัส

เพื่อสร้างชั้นเอ็นบนซับสเตรตเทคนิคพีให้เป็นหัวต่อพีเอ็นโดยกระทำในเตาเปิดที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ใช้ POCl_3 เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปน แซ่ POCl_3 ในน้ำที่อุณหภูมิ ห้องผ่านก๊าซไนโตรเจน 0.12 ลิตร/นาที เข้าไป bubble POCl_3 เข้าเตา 15 นาที ระหว่างนั้นผ่านก๊าซ ผสม $\text{O}_2 + \text{N}_2$ เข้าเตาด้วย (O_2 มีอัตราไหล 1.8 ลิตร/นาที และ N_2 มีอัตราไหล 1.5 ลิตร/นาที) ขั้นตอนนี้เป็นการ Predeposition หลังจากนั้นปิ้งคว่ำ POCl_3 ให้มีเฉพาะก๊าซผสม $\text{O}_2 + \text{N}_2$ ผ่านเตา ปลอยแผ่นผลึกไว้ในเตาอีก 10 นาที เพื่อเป็นการ drive-in นำเอาแผ่นผลึกออกจากเตา กัดออกไซด์ ที่คลุมอยู่ออกด้วยน้ำยา buffer HF จะได้ชิ้นตัวอย่างที่มีโครงสร้างดังรูป 2.38 (ข)

การกัดผิวหน้าของซิลิกอน

ในขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาเคมีซึ่งมีส่วนผสมของ HNO_3 70% 2 ส่วน HF 50% 1 ส่วน และ CH_3COOH glacial 1 ส่วน โดยปริมาตร กัดผิวหน้าของซิลิกอนด้วยเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้หัวต่อบาง ลง เพื่อลดชั้น dead layer ซึ่งมีอัตราการรวมตัวกันใหม่ (recombination rate) สูง ความลึกของหัว ต่อสามารถบอกได้ด้วยค่าความต้านทานแผ่น (R_s , Sheet resistance) คือถ้าความต้านทานแผ่นน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึกหัวต่อจะมาก และถ้าความต้านทานแผ่นมากความลึกของหัวต่อจะน้อย โดยความต้านทานแผ่นเฉลี่ยของชั้นแพร์ซิมมีค่า

การทำขั้นตอนการสะท้อนแสง

กระทำในเตาเปิด โดยการปลูกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ โดยใช้ไอน้ำเดือดเป็นเวลา 7 นาที โดยมีเตาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ได้ออกไซด์หนาประมาณ $1000\text{\AA}$ ด้านหน้าที่ถูกได้ไปด้วยฟอสฟอรัสซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะเป็นสียฟ้า ส่วนด้านหลังชั้นสเตรทชนิดพีมีความเข้มข้นพาหะต่ำจะเป็นสีน้ำเงิน

การทำขั้วอิเล็กโทรด

เอาชิ้นตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการทำขั้นตอนการสะท้อนแสงมาเคลือบด้วย photoresist แบบบวก โดยการหยดลงบนผิวด้านหน้าของซิลิกอนแล้วปล่อยให้ค่อย ๆ แผ่กระจายออกเต็มผิวหน้า เพื่อให้ได้ชั้น photoresist ค่อนข้างหนา เพราะผิวของโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนหยาบ ถ้าบางจะเคลือบไม่ตลอดผิว หลังจากนั้นนำไปทำ soft bake ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่มี pattern ของอิเล็กโทรดเป็นเวลา 2 นาที นำไป develop เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปทำ hard bake ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

แล้วนำไปจุ่มในน้ำยา buffer HF เพื่อกัดออกไซด์ด้านหน้าที่ไม่มี photoresist คลุม ออกไซด์จะถูกกัดออกทั้งหมด

- การทำอิเล็กโทรดด้านหลัง นำเอาชิ้นตัวอย่างไปจุ่มด้วยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ ซึ่งมีความดันประมาณ 3×10^{-7} Torr ชั้นอะลูมิเนียมหนา $3500\text{\AA}$
- การทำอิเล็กโทรดด้านหน้า หลังจากจุ่มด้วยไออะลูมิเนียมที่ด้านหลังแล้วนำไปชุบนิกเกิลแบบไร้ไฟฟ้า เป็นเวลา 5 นาที นิกเกิลจะติดตาม pattern ด้านหน้าที่ออกไซด์ถูกกัดออก และติดบนอะลูมิเนียมที่ด้านหลังด้วย หลังจากนั้นจะล้าง pattern ของ photoresist ด้านหน้าออกด้วย Acetone ล้างด้วยน้ำ DI

การชุบตะกั่วแบบบัดกรี

นำเอาตะกั่วบัดกรีมาใส่ในถ้วยสะเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ต้มให้ร้อนพอหลอมเหลวโดยการควบคุมอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เอาชิ้นตัวอย่างมาทาดด้วยฟลักซ์ที่ด้านหน้า แล้วนำไปลอยบนตะกั่วบัดกรีเหลวโดยคว่ำหน้าลงเป็นเวลาประมาณ 5-10 วินาที ตะกั่วบัดกรีจะเคลือบผิวด้านหลังทั้งหมด หลังจากนั้นนำเอาแถบทองแดงเล็ก ๆ ไปบัดกรีติดบนตะกั่วทั้งสองหน้าเพื่อให้เป็นขั้ววัด นำไปล้างฟลักซ์ออกด้วย Trichloro-ethylene ตามด้วย Acetone และน้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นฟิล์มซิลิคอนแบบ
โพสิทีฟชนิดลบ

p-type

ออกซิเจนชั้นความวุ่น

p-type

silicon dioxide
(SiO_2)

หน้าชั้นฟิล์ม

n-type
p-type

กัด SiO_2 ออกหมดและกัด
ผิวหน้าขึ้นเอ็นเพื่อทำ
dead layer

n-type หลังจากถูกกัดผิวหน้า
ออกบาง ๆ
p-type

ทำชั้นด้านการสะท้อนแสง

antireflection
coating (SiO_2)

ใช้โฟโตลิโกราฟีทำ
pattern ด้านหน้าและกัด
 SiO_2 ออก แล้ววาง Al
ในสุญญากาศ

positive photoresist

SiO_2

Al

ชุบฟิล์มแบบไวไฟ

Al

Ni

Al

Ni

ล้าง photoresist
ออกด้วย Acetone

Ni

SiO_2

Al

Ni

ชุบตะกั่วบัดกรีในถ้วย
สแตนเลส

ตะกั่วบัดกรี

Al

Ni

ตะกั่วบัดกรี

ภาพขนาดเล็กลงของจริง
ของเซลล์แสงอาทิตย์
แบบซิลิคอนโพสิทีฟชนิดลบ



ซิลิคอนด้านหน้า

แผ่นของตะกั่วบัดกรีเข้ากับ

ซิลิคอนด้านหน้า

แผ่นของตะกั่วบัดกรีเข้ากับ

รูปที่ 2.39 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน

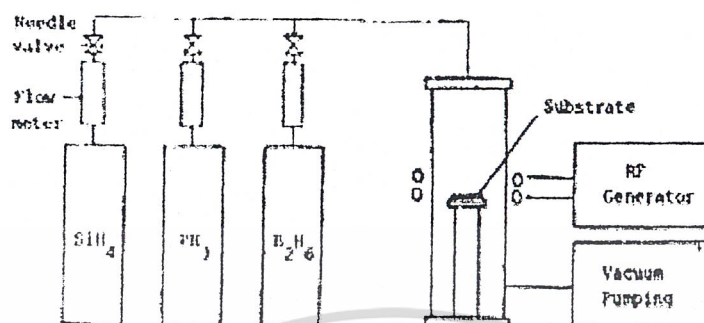
การเลือกใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของผลึกหรือ Polycrystalline ยังมีราคาแพงและใช้เนื้อวัสดุเกินความจำเป็นอยู่ การใช้อะมอร์ฟัสซิลิกอนเป็นวัสดุสำหรับทำเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นไปตามเป้าหมายการลดราคาต้นทุนการผลิตอย่างแน่นอนเพราะอะมอร์ฟัสซิลิกอนทำง่ายและไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุเพราะเป็นแผ่นฟิล์มบาง หากแต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าไม่สูงนักเนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารที่เป็นอะมอร์ฟัส เช่น การมี Intergap Stage จำนวนมาก เป็นผลให้ค่าเวลาชีวิตของพาหะมีค่าต่ำ แต่ก็มีมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนจนมีค่าสูงถึง 6% คุณสมบัติที่น่าสนใจของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

1. มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามอยู่ระหว่าง 1.5–2.0 eV ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์
2. ทำเป็นฟิล์มบางได้ง่ายบนฐานโลหะหรือแก้ว
3. มีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงสูงฟิล์มบางจึงสามารถดูดกลืนแสงเกือบทั้งหมดได้
4. สามารถเติมสารเจือปนเพื่อกำหนดชนิดการนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบ n-type และ p-type

Glow Discharge Deposition

วิธีการเตรียมอะมอร์ฟัสซิลิกอนที่นิยมกันมากที่สุดวิธีหนึ่ง ได้แก่ Glow Discharge Deposition โดยใช้ SiH_4 เป็นวัสดุเริ่มต้น ก๊าซ SiH_4 จะไหลผ่านเข้าไปใน Reaction Chamber และแยกสลายตัวเนื่องจาก Glow Discharge ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง อะมอร์ฟัสซิลิกอนที่เกิดจากการแยกสลายตัวของ SiH_4 จะ deposit ลงบนฐานโลหะหรือแก้วที่วางอยู่บนแท่นใน Reaction Chamber นั้นในขณะเดียวกันอาจมีการเติมก๊าซ PH_3 หรือ B_2H_6 เข้าไปใน Reaction Chamber ด้วยเพื่อทำให้เกิด อะมอร์ฟัสซิลิกอนที่เป็น n-type และ p-type ก๊าซแต่ละชนิดจะถูกควบคุมปริมาณโดย Needle Valves และ Flowmeters ให้แรงดันก๊าซภายใน Reaction Chamber มีค่าประมาณ 0.1-1 Torr ขณะที่ทำ Glow Discharge จะเกิด อะมอร์ฟัสซิลิกอนขึ้นด้วยอัตราความเร็วประมาณหลายไมครอนต่อชั่วโมง อุณหภูมิของฐานที่รองรับจะมีผลต่อคุณสมบัติของ อะมอร์ฟัสซิลิกอน เพราะหากอุณหภูมิของฐานสูงจะเป็นผลให้อะตอมของซิลิกอนมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบขึ้น คุณสมบัติทางผลึกจะเด่นชัดขึ้นตามลำดับ รูปที่ 2.40 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ทำ อะมอร์ฟัสซิลิกอนโดยวิธี Glow Discharge Deposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 ระบบเครื่องมือที่ใช้ทำ อะมอร์ฟัสซิลิกอน โดยวิธี Glow Discharge Deposition

รูปที่ 2.40 ระบบเครื่องมือที่ใช้ทำ อะมอร์ฟัสซิลิกอน โดยวิธี Glow Discharge Deposition

ก๊าซที่ใช้การเตรียม อะมอร์ฟัสซิลิกอน ได้แก่ SiH_4 , PH_3 และ B_2H_6 นั้นเป็นก๊าซพิษและติดไฟเมื่อทำ ปฏิกิริยากันออกซิเจน ดังนั้น ระบบท่อก๊าซและองค์ประกอบทั้งหมดจะต้องไม่มีรอยรั่วแม้แต่นิดเดียว จึงควรออกแบบให้ระบบทั้งหมดอยู่ในตู้ที่ปิดมิดชิด ทั้งก่อนเริ่มและหลังการใช้งานต้องเติมก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนเข้าไปไว้เสมอเพื่อความปลอดภัย และเนื่องจากปฏิกิริยาแยกสลายตัวของ SiH_4 นั้นอาจจะไม่สมบูรณ์เต็มที่ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้งานค่อนข้างต่ำ (~300 องศา) จึงอาจมีก๊าซ SiH_4 ไหลออกมาด้วย ดังนั้น จึงต้องออกแบบทางก๊าซออกของระบบให้เหมาะสม เช่น มีการถ่ายเทก๊าซออกจากระบบสู่ภายนอกโดยมิให้เป็นอันตรายต่อผู้ทำงาน

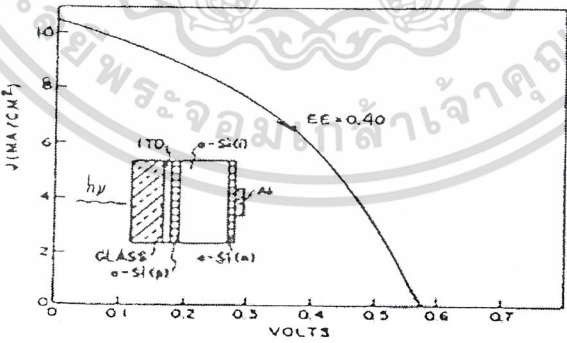
Spear ได้ใช้วิธี Glow Discharge Deposition นี้ทดลองสร้างหัวคอปี้เอ็นของ อะมอร์ฟัสซิลิกอนขึ้นโดยใช้แก้วเป็นขั้วโลหะทั้งสองข้างอุณหภูมิของฐานที่ใช้มีค่าประมาณ 300 องศา และก๊าซที่ใช้มีค่าปริมาณการไหล 0.1 cc./sec ด้วยแรงดันก๊าซ 0.8 torr อะมอร์ฟัสซิลิกอนเกิดขึ้นด้วยอัตราความเร็ว 0.8 °ต่อวินาที ชั้นเอ็นนั้นทำได้โดยใช้ SiH_4 และ PH_3 ส่วนชั้นพินันทำได้โดยใช้ SiH_4 และ B_2H_6 ชั้นทั้งสองหนาประมาณ 1 ไมครอน อะมอร์ฟัสซิลิกอน ที่ทำได้โดยวิธี Grow Discharge Deposition นี้มีผลตอบสนองทาง Photoconductivity สูงและได้มีการวิเคราะห์ว่าหากอุณหภูมิในการเตรียมสูงกว่า 200 องศาจำนวนของแขนขา(Dangling Bond) จะมีน้อยลงนอกจากนี้ยังตรวจพบว่า อะมอร์ฟัสซิลิกอน มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามทางแสง (Optical Forbidden Gap) ประมาณ 1.55 eV ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมมากในการทำเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากอะมอร์ฟัสซิลิกอน โดยใช้แก้วเป็นฐาน และใช้ขั้วโลหะโปร่งแสง ITO (Indium Tin Oxide) ทางด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทดลองสร้างขึ้นมีแสดงดังรูปที่ 2.41 คือเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

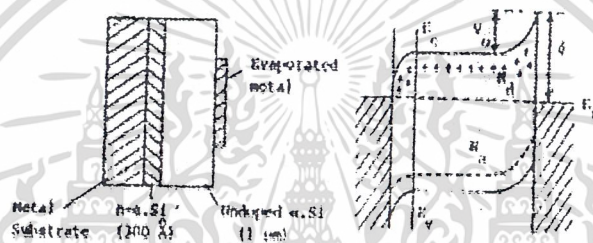
แบบ p-I-n ชั้นพินั้นหนาหลายร้อยอังสตรอมและเตรียมด้วย $\text{SiH}_4 + 1\% \text{B}_2\text{H}_6$ จากนั้นจึงสร้างชั้น I ทั้หนาประมาณ 1 ไมครอน และสร้างชั้นเอ็นหนาหลายร้อยอังสตรอมด้วย $\text{SiH}_4 + 1\% \text{PH}_3$ ทั้บีก ชั้นหนึ่งชั่วโลหะทางด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ อะลูมิเนียม ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีแสดงดังรูปที่ 2.41 เช่นเดียวกัน เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการ แปรพลังงานประมาณ 2.4% ค่า F.F. ของเซลล์ที่ทดลองสร้างขึ้นนี้มีค่าต่ำ เพราะพาหะที่ถูกกระตุ้น ด้วยแสงถูกดักจับไว้ก่อนด้วย Intergap State ก่อนจะนำมาใช้งาน จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความต้านทาน อนุกรมของเซลล์มีค่าสูงและพบว่าหากเซลล์แสงอาทิตย์มีความหนาเกิน 1 ไมครอน จะทำให้ กระแสโฟโตมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความยาวในการแพร่ซึมของโฮลในอะมอฟสซิลิกอน มีค่า ประมาณ 1 ไมครอนเท่านั้น และหากมีการเติมสารเจือปนในชั้น I ก็จะทำให้ค่าความยาวในการแพร่ ซึมมีค่าสั้นลงและส่งผลให้กระแสโฟโตลดลงเช่นเดียวกัน

นอกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอฟสซิลิกอนจะมีโครงสร้างแบบ pn และ p-I-n แล้ว ยังมีการทดลองสร้างแบบฮอตกี้เบเรียด้วยฐานที่ใช้ได้แก่ แผ่น Stainless Steel แล้วสร้าง ชั้น อะมอฟสซิลิกอนที่เป็น n-type หนาประมาณ 300 อังสตรอม เพื่อทำผิวสัมผัสแบบ โอห์มมิกแล้ว สร้างชั้น อะมอฟสซิลิกอนที่ไม่มีการเติมสารเจือปนหนาอีก 1 ไมครอน โลหะที่ใช้ทำหัวต่อแบบ ฮอตกี้เบเรีย ได้แก่ อะลูมิเนียม โครเมียม ทอง พาราเดียม พลาตินัม ฯลฯ ดังมีโครงสร้างตามรูปที่ 2.42 พลาตินัมเป็นโลหะที่ให้ค่าความสูงของแบเรียมากที่สุด และพบค่าสามารถให้ค่าแรงดันวงจร เปิดไม่แพ้เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็นทีเดียว



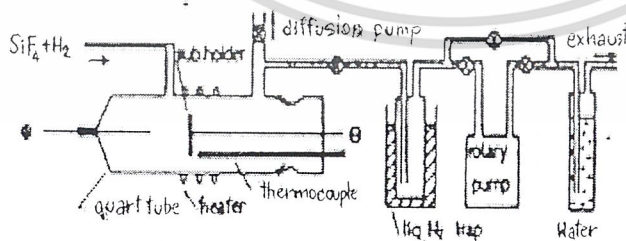
รูปที่ 2.41 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ p-I-n ที่ทำจาก อะมอฟสซิลิกอนและ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้

นอกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก อะมอฟสซิลิกอน จะมีโครงสร้างแบบ pn และ p-I-n แล้ว ยังมีการทดลองสร้างเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบข้อค้แบเรียด้วยฐานที่ใช้ ได้แก่ แผ่น Stainless Steel แล้วสร้างชั้น อะมอฟสซิลิกอน ที่เป็น n-type หนาประมาณ 300 อังสตรอม เพื่อทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกแล้วจึงสร้างชั้น อะมอฟสซิลิกอนที่ไม่มีการเติมสารเจือปนหนาอีก 1 ไมครอน โลหะที่ใช้ทำหัวต่อแบบข้อค้แบเรีย ได้แก่ อะลูมิเนียม โครเมียม ทอง พาราดีนัม ฯลฯ ดังมีโครงสร้างตาม รูปที่ 2.42 พลาตินัมเป็นโลหะที่ให้ค่าความสูงของแบเรียมากที่สุด และพบว่าสามารถให้ค่าแรงดันวงจรเปิด ไม่แพ้เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัว คอพีเอ็นทีเดียว



รูปที่ 2.42 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบข้อค้แบเรียที่ทำจาก อะมอฟสซิลิกอน

นอกจากการใช้ SiH_4 เป็นวัสดุเริ่มต้นในการทำอะมอฟสซิลิกอน แล้วยังมีการใช้ SiF_4 ผสมกับ H_2 แทน ได้อีกด้วย เพื่อลดปัญหาทางด้านก๊าซพิษและติดไฟ ทำให้สามารถเปลี่ยนการทำ Glow Discharge ด้วยความถี่สูงมาเป็น D.C. Discharge ได้ทำให้เครื่องมือง่ายและใช้งานสะดวกขึ้นดังตัวอย่างในรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 การเตรียมอะมอฟสซิลิกอน โดยใช้ $\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ ด้วยวิธี D.C. Discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ส่วนประกอบของ PHOTOVOLTAIC PLANT

3.1 จุดเด่นของ Solar Photovoltaic

ลักษณะที่สำคัญ ๆ ของ Solar Photovoltaic มีดังนี้คือ

1. Solar Photovoltaic array สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานได้ จึงจำเป็นต้องมีการสำรองแบตเตอรี่ไว้ใช้เมื่อต้องทำงานทั้งคืนหรือทำงานขณะที่ไม่มีแสงอาทิตย์

2. ค่าพลังงานที่ได้รับและการทำงานของ PV array ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิศาสตร์ ภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อม เช่น ตำแหน่งละติจูด การแพร่กระจายและการสะท้อนของรังสี ความเร็วลม เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของ load ที่ต่อกับระบบด้วย

3. การทำงานของ array ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของการส่องสว่างของแสงอาทิตย์ การเกิดเงาบางส่วนบนผิวสัมผัสของ array จะมีผลกระทบจากการต่อต้าน array output

4. การทำงานของ array ขึ้นอยู่กับมุมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบผิวสัมผัส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดรังสี เพราะว่าปริมาณของพลังงานที่ดูดซึมจากเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับมุม

5. ค่าเอาต์พุตและการทำงานของ array ขึ้นอยู่กับทั้งในกรณีที่ array ถูกติดตั้งให้ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracking) หรือมุมถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ (fix tilt)

6. PV array จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงต้องใช้ intermediate dc-to-ac inverter ในการแปลงกระแสด้วย

8. PV จะแตกต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐานทั่วไป คือ ไม่สามารถพิจารณาเป็น constant voltage source หรือ constant current source ได้ เพราะทั้ง load voltage , load current และค่าพลังงานที่ได้จาก PV array ต่างก็ขึ้นอยู่กับ load ทั้งสิ้น

9. ถูกออกแบบมาสำหรับ specific load และ system loss ซึ่งจะทำงานเมื่อ load และ loss มีการเปลี่ยนแปลง หรือถ้า intermediate BOS และ subsystem ทำงานแตกต่างไปจากนี้ได้ออกแบบไว้ในตอนแรก

การเลือกสถานที่ติดตั้ง

1. การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ประโยชน์สูงสุดจะต้องคำนึงถึงสถานที่ติดตั้งของแต่ละประเทศเป็นหลัก สำหรับประเทศไทยนั้น ตำแหน่งที่ตั้งจะอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ประมาณ 15 องศาเหนือ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ผลดีที่สุดคือ หันแผงหน้าหรือด้านรับแสงไปทางทิศใต้

โดยทำมุมกับพื้นราบ 15 องศา (ในกรณี fix tilt) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สถานที่ติดตั้งต้องปราศจากเงาไม้มายังในระหว่างวัน หรือปราศจากเศษใบไม้ที่จะตกมาปกปิดแผง เนื่องจากอาจเกิดการบังเงาขึ้นแล้วจะทำให้เกิด Hot Spot ขึ้นที่ตัวเซลล์ที่ถูกบังเงานั้น อาจจะทำให้เกิดความเสียหายได้ หรือทำให้ได้กำลังไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าปกติ

- 3. ควรเลือกสถานที่ที่มีฝุ่นละอองหรือเศษผงน้อย
- 4. ควรเป็นสถานที่ที่ไม่มีฟ้าผ่าบ่อย
- 5. สถานที่จะต้องมีพื้นฐานแข็งแรงในการยึดติดระบบ
- 6. ควรเลือกตั้งบริเวณที่ห่างไกลจากแหล่งที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาก

3.2ส่วนประกอบของ Stand-alone PV System

Stand-alone PV System จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๆ 3 ส่วน คือ

- 1.PV array
- 2.Battery storage
- 3.Balance-of-System(BOS)

ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญ ๆ ในการออกแบบ PV System ก็คือ PV array และ battery capacity ซึ่งทั้งสองส่วนนี้นับเป็นอย่างน้อย 70% ของต้นทุนทั้งหมดของระบบ ดังนั้นในการออกแบบจึงมักจะให้ความสำคัญกับทั้งสองส่วนนี้เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยปกติแล้วส่วนของ BOS จะขึ้นอยู่กับค่า capacities ของ array และแบตเตอรี่ ดังนั้นขั้นตอนแรกที่ต้องทำก็คือทำการออกแบบ array และ battery capacity เสียก่อน ซึ่งโดยปกติแล้วค่า array peak power และ battery capacity นั้นจะขึ้นอยู่กับบริเวณที่ติดตั้งระบบ ไม่ว่าจะเป็นสภาพทางภูมิศาสตร์ ภูมิอากาศ หรือสภาพแวดล้อม เป็นต้น

3.2.1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนแบ่งได้เป็นสองชนิด ใหญ่ๆ คือแบบผลึก และแบบอะมอร์ฟัส และแบ่งย่อยได้ดังนี้

- 1. เซลล์แสงอาทิตย์ แบบ ผลึกเดี่ยว
- 2. เซลล์แสงอาทิตย์แบบ ผลึกโพลี
- 3. เซลล์แสงอาทิตย์แบบ อะมอร์ฟัส

ตระกูล	ประสิทธิภาพ(%)	พลังงาน	ราคา	วัตถุดิบ	ความเชื่อถือในการผลิต
ซิลิกอนผลึกเดี่ยว	15-24	Bad	Bad	Good	Very Good

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

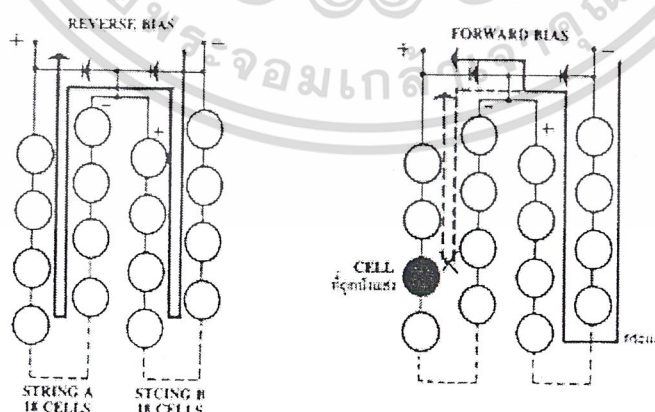
โพลีซิลิกอน	10-17	Good	Good	Good	Good
อะมอฟสซิลิกอน	8-13	Very Good	Very Good	Very Good	Good

ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นจุดเด่นจุดด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่างๆ

จากตาราง เห็นว่า ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด ตามมาก็คือโพลีซิลิกอน และอะมอฟสซิลิกอนอย่างไรก็ตาม แบบโพลี และ แบบ อะมอฟส ยังมีโอกาสที่จะลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าแบบผลึกเดี่ยว นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีความแตกต่างในเรื่องการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆอีกด้วย

ภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (SOLAR MODULE) นอกจากจะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ หลากหลายเซลล์ต่อกันแบบอนุกรม หรือแบบขนานก็ตามแต่ (ซึ่งโดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะถูกออกแบบให้ใช้กับระบบไฟฟ้าขนาด 12V จึงต้องนำขึ้นเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 32-36 เซลล์ ก็จะได้แรงดัน 16-18V เพื่อที่จะประจุไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ขนาด 12 V ได้) แล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก คือ

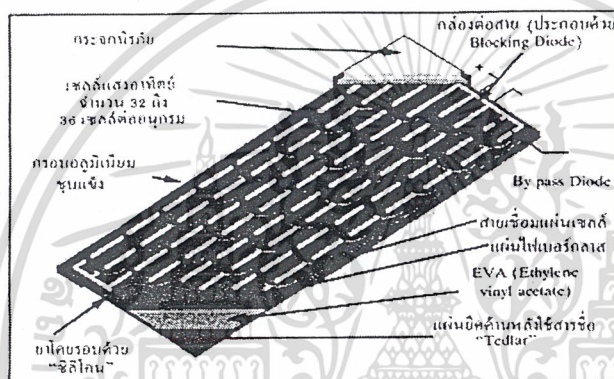
1. BYPASS DIODE - เป็นไดโอดที่ต่อกร่อมระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แถว เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสชาดวงจรและทำให้เกิดจุดไหม้บนเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีเงามาบังบนเซลล์ในขณะที่ใช้งานปกติ BYPASS DIODE ถูกต่อแบบ REVERSE BIAS กระแสในเซลล์แต่ละแถวก็จะไหลตามปกติ แต่เมื่อเซลล์ตัวใดตัวหนึ่งถูกเงาบังหรือขาดวงจร BYPASS DIODE ก็จะถูกต่อแบบ FORWARD BIAS กระแสจะไหลผ่านตัวไดโอดโดยไม่ผ่านเซลล์แถวนั้นๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการต่อแบบ bypass diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.BLOCKING DIODE เป็นไดโอดที่ต่อไว้ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลกลับ ไปสู่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ไม่มีแสงแดด เรียกกระแสนี้ว่า DARK CURRENT LEAKAGE ซึ่งส่วนใหญ่ BLOCKING DIODE นี้มักจะมียู่แล้วในส่วนของกล่องรวมสาย (JUNCTION BOX) ที่หลังแผงเซลล์ที่ซื้อมา



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.2.2 แบตเตอรี่

คุณสมบัติ ชนิด และการเลือกใช้แบตเตอรี่ใน photovoltaic power plant

ชนิดของแบตเตอรี่

Lead-acid Batteries โดย เทคโนโลยี flooded lead-acid battery สำหรับระบบ photovoltaic system นั้นเป็นการใช้การเก็บพลังงานที่ใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่สำหรับ automobile flooded lead-acid นี้ถูกผลิตขึ้นสำหรับงานที่หลากหลายและใช้แบตเตอรี่หลายๆตัว โดยผู้ผลิตจะบอกคุณสมบัติต่าง ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่แบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ต้องการการดูแลรักษาบ่อยครั้งคอยดูน้ำที่หายไประหว่างการดำเนินงาน , ราคาที่แพงเพราะเนื่องจกมันใช้ lead-acid ดังนั้นจึงหนักจึงขนย้ายลำบากและเสียค่าก่อสร้างสำหรับวางแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นแต่ที่แบตเตอรี่แบบนี้ใช้งานอย่างมากในระบบ photovoltaic เนื่องจากความแข็งแรงทนทาน, อายุการใช้งานนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

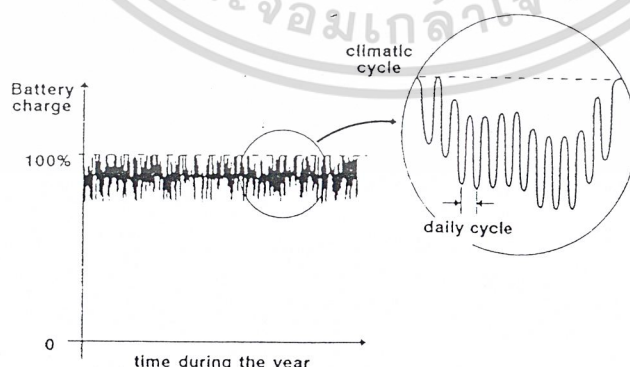
VRLAs โดยVRLAใช้หลักการทางelectrochemicalง่ายคล้ายกับแบบ flooded lead-acid โดยข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คืออายุการใช้งานที่สั้นการแบบ lead-acidจึงทำให้ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยกว่า จึงทำให้ราคาของระบบสูงขึ้นแต่ข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าก็คือขนาดค่าน้ำมันนั้นต่อการการดูแลรักษาที่น้อยมาก, น้ำหนักเบากว่าเนื่องจากทำมาจากตะกั่ว โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานเป็นกำลังสำรองในอุปกรณ์ระบบโทรคมนาคมหรือ uninterruptible power supplies หรือสถานที่ที่ไม่ต้องมีห้องพิเศษในการเก็บรักษา

Advanced Batteries แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบบ ระบบzin/bromineซึ่งใช้ในphotovoltaic system นั้นข้อได้เปรียบคือ มีราคาที่ต่ำ, น้ำหนักเบาเนื่องจากหลอมจากพลาสติกทำให้ขนย้ายง่าย, ทนทาน, ใช้งานได้ในหลายรูปแบบ แต่ข้อด้อยคือต้องการการดูแลรักษาสูงซึ่งต้องบำรุงรักษา pump ใช้สำหรับหมุนเวียน electrolyte, และประสิทธิภาพใช้งานที่ต่ำ

Nickel-Cadmium Battery ถ้าพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของแบตเตอรี่นั้น Nickel-Cadmium Battery เป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์อย่างมาก เนื่องจาก ไม่มีปัญหาจากการใช้ที่ deep cycle เลย แต่ข้อเสียคือ มีราคาแพง และหาได้ยาก จึงถูกจำกัดใช้ในระบบเล็กๆ

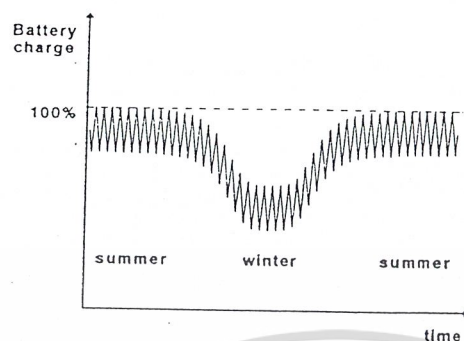
การดำเนินงานของแบตเตอรี่ในระบบphotovoltaic

แบตเตอรี่จะดำเนินการได้ในสถานะที่จำกัด ณ การออกแบบแต่ละชนิดจะมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยากรูปที่3.3จะแสดง daily cycle โดยแบตเตอรี่จะถูก charge ในช่วงเวลากลางวันและจะ discharge ในเวลากลางคืน โดยค่า depth of discharge ในแต่ละวัน ต้องไม่สูงมากนั้นสำหรับระบบที่ไม่มี การback-up ไว้



รูปที่ 3.3 แสดง daily cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดง seasonal cycle

การเลือกใช้และการออกแบบแบตเตอรี่

คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบ ไฟฟ้าแสงอาทิตย์

1. มี Cycle life สูง สำหรับการใช้งานแบบ Deep cycle
 2. ต้องการการบำรุงรักษาค่า
 3. ประสิทธิภาพในการชาร์จสูง
 4. มีความสามารถที่จะดำรงอยู่ในสถานะที่ถูก discharge จนหมด
 5. อัตรา self-discharge ต่ำ
 6. มีความเชื่อถือได้สูง (reliable)
 7. อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลให้การทำงานของแบตเตอรี่ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย
- ปัจจัยที่จำเป็น สำหรับการพิจารณาเลือกแบตเตอรี่ สำหรับการสร้างระบบจริงๆ
1. ง่าย หรือมีเพียงพอให้นำไปใช้ได้
 2. ระยะทาง เวลา และราคาในการขนส่งไปยังบริเวณที่ติดตั้ง (ในกรณี ระบบมีขนาดใหญ่)
 3. ราคาของ usable capacity ตลอด 1 cycle
 4. ราคาของ usable capacity ทั้งหมด ตลอด cycle life
 5. การบำรุงรักษาระหว่างใช้งาน
 6. น้ำหนัก
 7. ราคาและ ความยากง่ายในการหาซื้อ control unit ถ้าหากจำเป็นต้องใช้

สำหรับในระบบ photovoltaic นั้นส่วนใหญ่นิยมที่จะใช้แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle Lead

Acid เพราะต่อ depth of discharge สูงเพื่อลดจำนวนแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ส่วนใหญ่จะแบ่งตาม

ขนาด 2,6,12,24V สำหรับการเลือกขนาดแรงดันของ cell นั้นควรจะเลือกขนาด 2V มากกว่าแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6,12V เพราะว่าแผ่น plate จะหนากว่าและ cell จะรักษา electrolyte ได้มากกว่าโดยปกติอายุการใช้งานของ 2 Volt จะประมาณ 2750 deep cycle เมื่อเปรียบเทียบกับ 700 deep cycle ของแบตเตอรี่ 6, 12 Volt และแบบ 2 Volt ยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยกว่าเพราะไม่ต้องเติมน้ำบ่อยๆเนื่องจาก cell แบบ 2 Volt มี reservoir สำหรับ electrolyte ที่ใหญ่กว่าโดยการตรวจสอบแบตเตอรี่นั้นทำได้โดยตรวจดูว่าแรงดัน cell แต่ละ cell ด้วย voltmeter และเปรียบเทียบการอ่านค่าของ cell ทั้งหมดค่านั้นจะบอกถึงความเท่ากันของ cell ทั้งหมดได้ โดยแรงดัน cell ควรอยู่ภายใน 0.05 volts ตัวอย่างเช่นค่าที่อ่านได้สูงสุดเป็น 2.15 volt ค่าที่อ่านได้ต่ำสุดเป็น 2.10 volt โดยถ้ามีค่าแตกต่างมากกว่านี้ควรจะเป็นแบตเตอรี่ แต่สำหรับการตรวจสอบโดยทั่วไปที่ใช้กับแบบ 6,12 volt ทำได้โดยใช้ hydrometer อ่านค่าโดยที่ full charge ค่าที่อ่านได้ควรจะเป็น 1.270 จุด (specific gravity) โดยจะแสดงค่าได้ดังต่อไปนี้

Charge level	Specific Gravity	Voltage 2 V n	Voltage 6 V n	Voltage 12 V n	Voltage 24 V n
100.00%	1.270	2.13	6.38	12.75	25.50
75.00%	1.224	2.08	6.24	12.48	24.96
50.00%	1.170	2.02	6.06	12.12	24.24
20.00%	1.097	1.94	5.82	11.64	23.28
0.00%	1.045	1.89	5.67	11.34	22.68

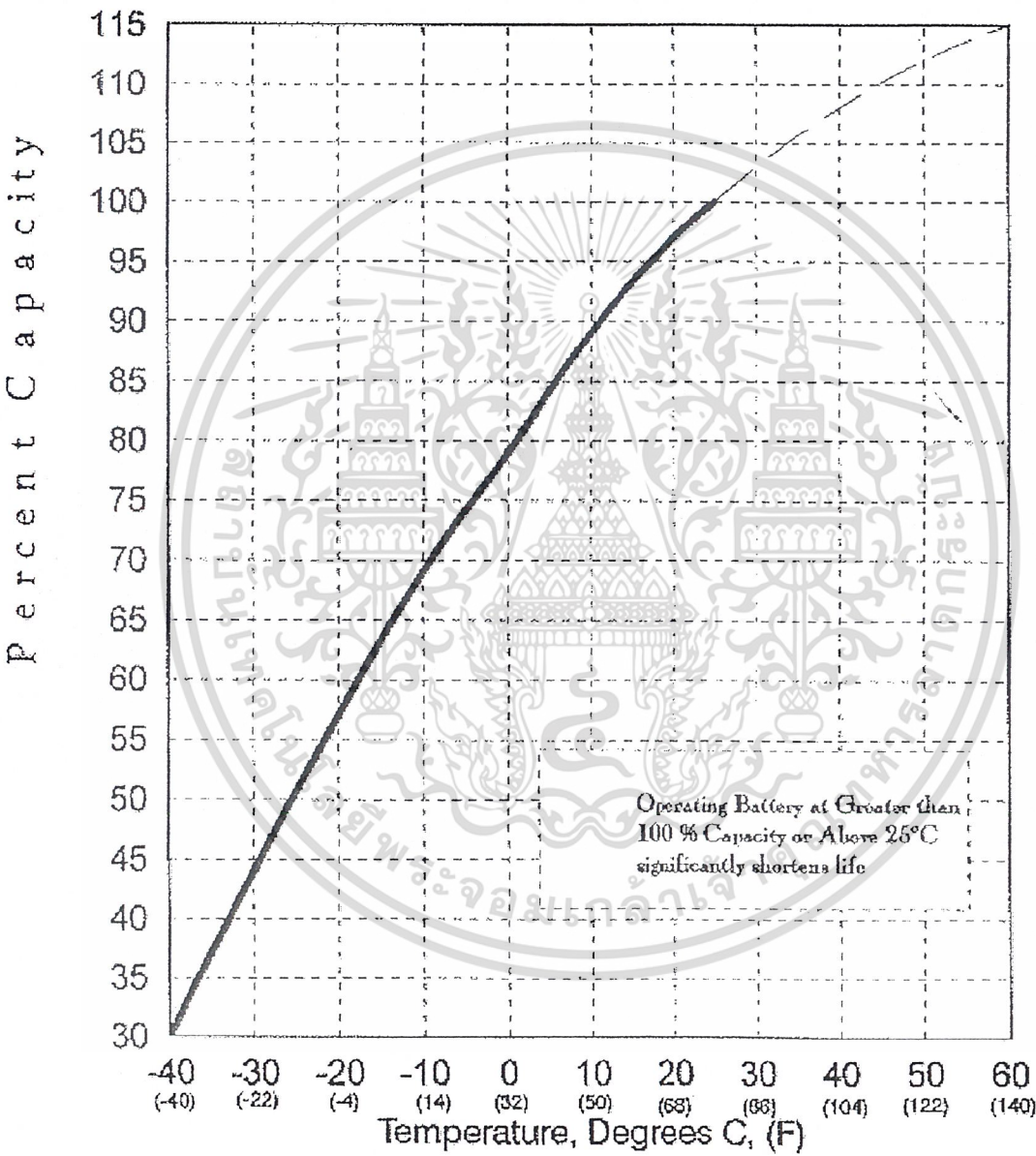
ตารางที่ 3.2 แสดง State of charge

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ cycling, deep – discharge มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบที่ใช้ใน photovoltaic power plant โดยแรงดัน cell อยู่ในฟังก์ชันของ อุณหภูมิ, อายุ, อัตรา discharge, และชนิดของ cell ในช่วงของการ discharge แรงดันจะหล่นลงมาจากค่าเริ่ม 1.98 volts/cell ไปที่ 1.85 และ 1.65 volts/cell ขึ้นอยู่กับอายุและการใช้งาน ดังนั้นผู้ผลิตจะต้องระบุแรงดันต่ำสุดในการ cut off สำหรับการ discharge กำลังที่คงที่นั้นกระแสของแบตเตอรี่จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้เข้ากับแรงดันที่ลดลง โดยค่ากระแสสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ค่า end of discharge ส่วนในระหว่างช่วงเวลาในการ charge แรงดันจะอยู่ในช่วง 2.2 volt/cell (ตอนเริ่มต้น) และสูงเท่ากับ 2.65 volt/cell ที่ end of charge โดยขึ้นกับชนิดของแบตเตอรี่ capacity ของแบตเตอรี่ lead-acid ซึ่งอยู่ในรูปของ amp-hours (Ah) หรือ kilowatt-hours (kWh) โดยค่านี้จะบ่งบอกว่าเร็วแค่ไหนในการ discharge ของแบตเตอรี่อยู่ในรูปของค่า depth of discharge (DOD) โดยค่า depth of discharge ที่สูงๆ (มาก 70-80%) จะทำให้ส่งพลังงานได้สูงแต่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 3.6 และการ charge ที่ไม่สมบูรณ์ก็เป็นส่วนสำคัญที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ลดลงดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรออกแบบให้มีการcharge,depth of dischargeและอายุการใช้งานที่เหมาะสม

CAPACITY
vs. Battery Temperature

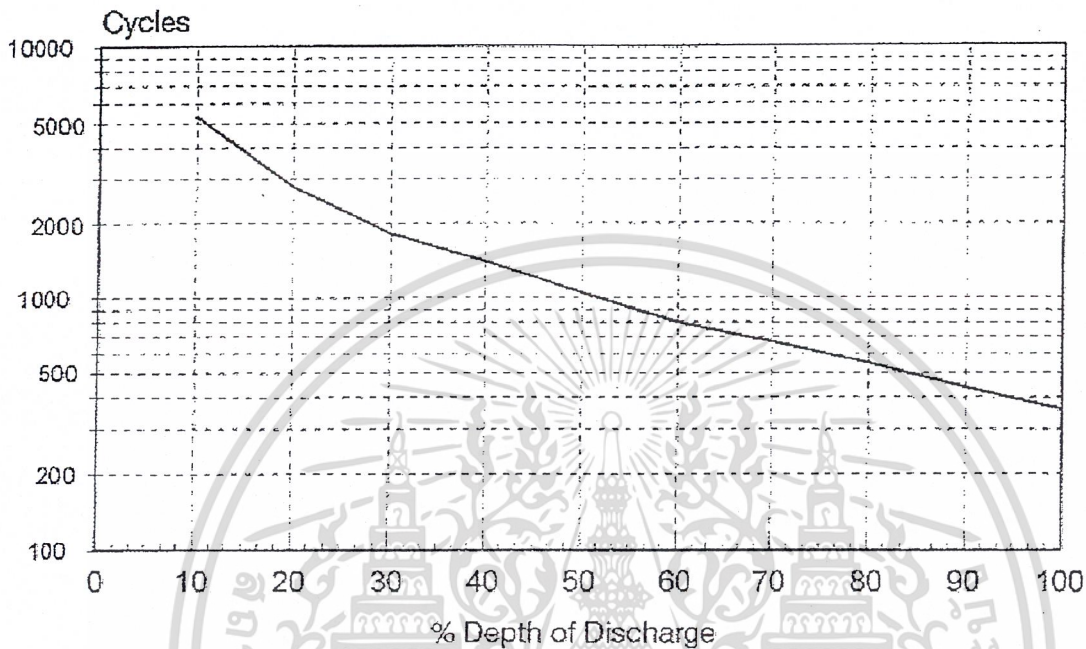


รูปที่ 3.5 ผลของอุณหภูมิต่อ capacity battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Expected Life Cycles

Sealed AGM Batteries



รูปที่ 3.6 แสดง % Depth of Discharge

หมายเหตุ

คำนิยามต่างๆ เกี่ยวกับแบตเตอรี่

1. Capacity หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่

2. Ah units of capacity หมายถึง หน่วยที่ใช้ในการวัดค่า capacity ของแบตเตอรี่ คือหน่วย ampere-hour(AH) ซึ่งวัดได้โดยขณะที่ discharge ให้กระแสไหลออกคงที่ค่าหนึ่ง แล้วนับเวลาจนกระทั่ง discharge หมด แล้วนำค่ากระแสคูณกับเวลา จะได้ค่า Ah เช่นแบตเตอรี่ที่มี capacity 80 Ah สามารถจ่ายกระแส 8 A เป็นเวลา 10 h หรือ สามารถจ่ายกระแสได้ 4A เป็นเวลา 20 h จะเห็นว่า capacity ที่วัดได้ จะขึ้นอยู่กับกระแส discharge ซึ่งจะมีผลกับว่าแบตเตอรี่จะถูกใช้ไปเร็วแค่ไหน เมื่อกระแส discharge เพิ่มขึ้น capacity ที่ได้รับจริงๆ จะมีค่าลดลง ดังนั้น ค่า capacity จึงถูกเจาะจงไว้ เรียกว่า ค่า C rate ของกระแส discharge ซึ่งก็คือค่า capacity Ah หารด้วยค่า discharge time(n) ซึ่งจะถูกเขียนด้วยตัวเล็ก เช่น แบตเตอรี่ มี spec 30 Ah ที่ C/10 หรือ C/16 หมายความว่า แบตเตอรี่นี้สามารถจ่ายกระแส 3A ได้ในเวลา 10 ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.Cycle depth หมายถึง เปอร์เซนต์ที่ใช้บอกว่า แบตเตอรี่ถูกใช้ไปมากเท่าไร ก่อนจะถูกชาร์จใหม่

- shallow cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ discharge น้อยกว่า 50% ก่อนจะถูกชาร์จใหม่
- deep cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ discharge ตั้งแต่ 50% ขึ้นไป ก่อนจะถูกชาร์จใหม่

4.Cell life - เมื่อใช้แบตเตอรี่ไปสักกระยะหนึ่ง ความจุของการชาร์จจะลดลงเหลือ 80% ของแบตเตอรี่ตอนที่ซื้อใหม่ ซึ่ง 20% ที่สูญเสียไปนั้น มีสาเหตุมาจาก cycling และ อายุการใช้งาน จำนวน cycle และอายุการใช้งาน จำนวน cycle ที่ชาร์จ ก่อนที่ capacity จะลดลงเหลือ 80% จะเรียกว่า cycle life ซึ่งขึ้นอยู่กับ cycle depth , discharge current และอุณหภูมิในบางลักษณะที่นำไปใช้งาน แบตเตอรี่จะถูกใช้น้อยมาก เช่น นำไปใช้เป็น standby battery ซึ่งถูกชาร์จอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดกรณีฉุกเฉินจึงถูก discharge แต่แบตเตอรี่เหล่านี้ จะมีความจุลดลงอย่างถาวรโดยอายุของมัน ซึ่งเราเรียกว่า calender life หรือ standby life ซึ่งวัดอยู่ในหน่วยปี และมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อม

3.2.3 BOS (Balance of system)

Balance of system คืออุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ PV System ประกอบไปด้วย

- 1.Mechanical BOS
- 2.Electrical BOS
- 3.Electronic BOS

Mechanical BOS จะประกอบไปด้วยพวกโครงสร้างรองรับแผง ซึ่งสิ่งสำคัญของ Mechanical loss คือความแข็งแรงทนทาน เพราะพวกนี้ส่วนมากจะใช้ภายนอก ดังนั้นจะต้องทนแดดทนฝนได้

Electrical BOS ประกอบไปด้วยพวกเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ สวิตช์เกียร์ เป็นต้น

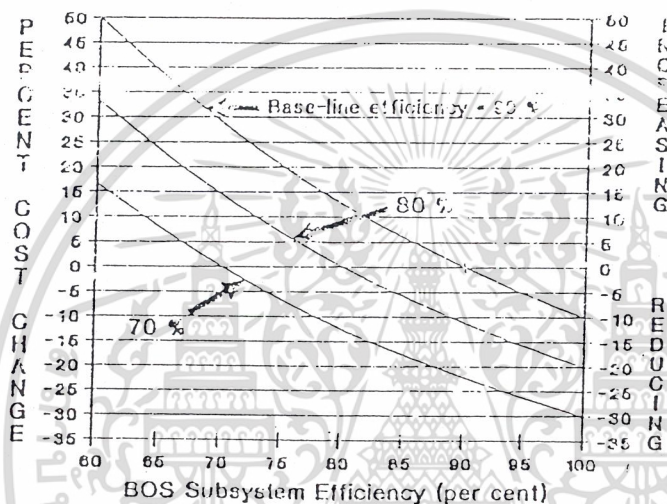
Electronic BOS ประกอบไปด้วยพวก battery charge controller, Inverter, Maximum Power Tracker ซึ่งพวกนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบมากกว่า Mechanical BOS และ Electrical BOS

ซึ่งในระบบ PV System จะต้องอาศัยการทำงานของ BOS ประกอบกับ PV Module โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายของ PV System จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้

- 1.PV Module/Array → มีผลต่อราคาของ PV System มากที่สุด
- 2.Battery → มีผลทางด้านราคารองลงมา
- 3.BOS System → มีผลทางด้านราคาน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก BOS System เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของระบบ เพราะฉะนั้นถ้าหากเราสามารถทำการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ BOS ได้ก็เท่ากับว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของ PV System ด้วย ซึ่งจะทำให้เราสามารถลดขนาดของระบบลงได้เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ดังกราฟรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นถึงผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของ BOS กับปริมาณค่าใช้จ่ายของระบบที่ลดลง



รูปที่ 3.7 แสดงผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของ BOS กับปริมาณค่าใช้จ่าย

เนื่องจาก Electronic BOS มีความสำคัญและมีผลต่อระบบ PV System มากกว่า Mechanical BOS และ Electrical BOS เพราะฉะนั้นต่อไปเราจะเห็นกล่าวถึงในรายละเอียดของ Electronic BOS

Electronic BOS

Electronic BOS ที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปในระบบ PV System เช่น

1. power conditioning system
2. maximum power tracker
3. Dc-Ac inverter
4. Control Unit ที่มี Low Voltage Cut off Unit (LVCU)

สำหรับการเลือก Electronic BOS เพื่อนำไปใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพควรจะต้องคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-จะต้องใช้งานภายนอก → เพราะฉะนั้น Electronic BOS ที่เลือกจะต้องสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้

-ความเชื่อถือได้ของ Electronic BOS → เนื่องจาก Electronic BOS มีผลต่อการทำงานของระบบ เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่อุปกรณ์ Electronic BOS จะต้องมีความเสถียรภาพ

-การป้องกัน → เนื่องจากในการทำงานอาจจะเกิดสิ่งที่จะมีผลกับระบบได้ เช่น ในระบบ Grid-Connect อุปกรณ์ที่ต่อระหว่าง PV กับ Grid จะต้องทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่นๆ เพื่อที่จะสามารถตัดตัวมันออกจากระบบได้ในกรณีที่เกิดมีพลังงานไหลย้อนกลับมาเข้าในระบบ

-เนื่องจากการใช้งานใน PV System จะใช้งานในระยะยาว ดังนั้นอุปกรณ์ Electronic BOS ที่ใช้จะต้องได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมในระยะยาวได้

Power Conditioning System (PCS)

ในการใช้งาน Electronic BOS นั้นโดยทั่วไปจะเป็นการใช้งานในรูปแบบของ Power Conditioning System (PCS) ซึ่งจะเป็น unit ที่รวมอุปกรณ์ Electronic BOS ไว้ด้วยกัน ซึ่งในระบบ Grid-Connect PV System แล้ว PCS จัดว่าเป็นสมองในการทำงานเลยทีเดียว

หน้าที่เบื้องต้นของ PCS

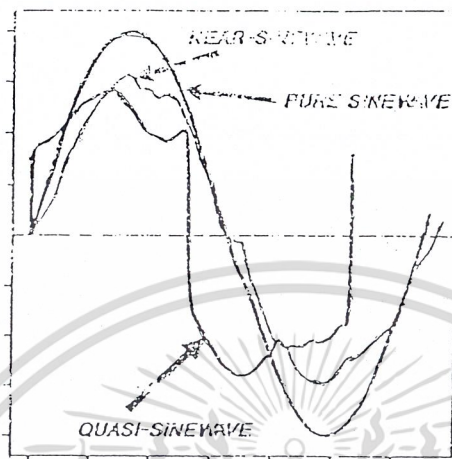
หน้าที่เบื้องต้นของ PCS คือการแปลงพลังงานที่ผลิตได้จาก PV Array ในรูปของ DC ไปเป็น AC ซึ่งจะคล้ายคลึงกับหน้าที่ของ Inverter ใน Stand alone PV System และยังสามารถเรียงกระแสจากไฟ ac (utility network) ไปเป็น dc เพื่อ charge เข้าไปในแบตเตอรี่ ดังนั้น PCS จึงเหมาะกับ Grid-connected plant และ PCS นั้นมีความซับซ้อนมากกว่าในด้านหน้าที่ของการทำงาน โดยมันจะคอยปรับค่ากระแสและแรงดันที่ได้ให้อยู่ ณ ค่า maximum power และเมื่อเป็นจากไฟ De-Ac แล้ว PCS จะ matching ไฟ ac ที่ผลิตได้ให้เข้ากับ ไฟ ac ที่โครงข่ายการไฟฟ้า (utility network) และการป้องกันของระบบ PV System จะขึ้นกับ PCS เพราะฉะนั้นพฤติกรรมของ PCS ก็จะเป็นตัวแสดงให้เห็นพฤติกรรมของ PV System

หน้าที่อีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ PCS ก็คือ เมื่อ PV System ไม่สามารถผลิตกำลังงานได้ตามที่กำหนดไว้แล้ว เช่น หลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกแล้ว PCS ก็จะทำการตัด PV System ออกจาก Grid และเมื่อถึงเวลาที่ PV System สามารถผลิตพลังงานได้ตามที่กำหนด PCS ก็จะต่อ PV System เข้ากับระบบอีกครั้งหนึ่ง

นอกจากนี้ PCS จะทำหน้าที่เป็นตัวกันชนระหว่าง Grid line กับ PV System ในกรณีที่เกิดสิ่งต่าง ๆ ที่จะกระทบกับ PV System เช่น Over Voltage transient เนื่องจาก lightning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

out put ของ PCS

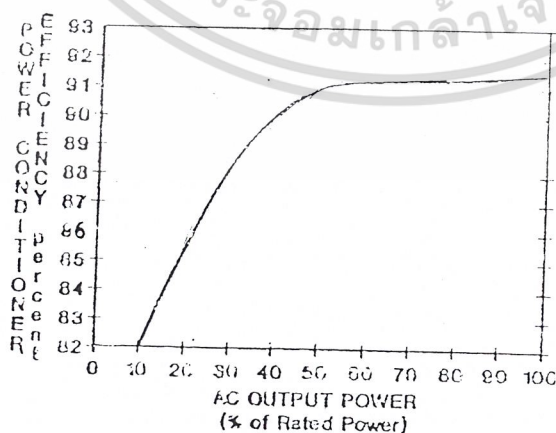


รูปที่ 3.8 แสดง out put ของ PCS

จากรูปจะเห็นได้ว่า out put ของ PCS จะขึ้นอยู่กับการใช้งานว่าเหมาะสมกับอันใด ซึ่ง PCS ที่ out put เป็น sinewave จะมีราคาสูงที่สุด

in put ของ PCS ส่วนมากอยู่ในช่วงระหว่าง 118-600 V ซึ่ง PCS นั้นสามารถต่อ input กับ PV Array ได้เลยในกรณีที่เราไม่มีระบบของ battery มาเกี่ยวข้อง ซึ่ง input นั้นสามารถแปรได้ $\pm 30\%$ ของ rate input

ประสิทธิภาพโดยทั่วไปของ PCS ในการแปลงพลังงานมักจะมากกว่า 90 % แต่ต้องทำงานอยู่ในระหว่าง 50-100% rate power ซึ่งถ้าน้อยกว่านี้ก็จะลดลงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟประสิทธิภาพของ PCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของ output อื่น ๆ นั้นควรจะเป็นดังนี้

-output current ควรจะมีค่า ripple ไม่ควรเกิน 10% ของ rate กระแส และ reactive current ควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 lagging-0.95 leading

-Harmonic current distortion ควรจะน้อยกว่า 5 %rms

-Total voltage harmonic distortion ไม่ควรเกิน 2%

-ในส่วนของความถี่นั้น PCS ยังคงทำงานได้ดีในความถี่ที่ผิดเพี้ยนในช่วง $\pm 1\text{Hz}$

-อุณหภูมิรอบข้างควรอยู่ระหว่าง 0-55 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของ battery ควรอยู่ในช่วง -10 ถึง +70 องศาเซลเซียส

การป้องกันต่าง ๆ ที่สามารถหาได้ใน PCS

-Over-and under-frequency at the output terminals

-Direct-current, over-and under voltage

-AC-current fault, over-and under voltage

-Inverter component malfunction

-Loss and return of utility line voltage

-Array output over-current

-Inverter over-temperature

-Induce lightning surges

Maximum Power Tracker(MPPT)

MPPTนี้เป็นอุปกรณ์ electronic DC to DC converter โดยจะ converter ค่า V_{DC} และ I_{DC} ที่ได้จากแผง solar cell ไปเป็นไฟกระแสตรงที่มี voltage สูงขึ้นเพื่อ match แบตเตอรี่และ solar cell เพื่อจะหาจุดที่ใช้งานได้สูงสุดในการดำเนินงาน ซึ่งโดยปกติ solar cell เมื่อได้รับแสงมาอย่างไรก็จะให้กำลังงานไปอย่างนั้นตัวอย่างเช่นแผง solar cell ที่ rated จะต่อให้ 75watt แต่ที่เกิดขึ้นจริงไม่ใช่ 75watt เนื่องจาก ณ แสงขนาดนั้นแผงจ่ายการแสดออกมาได้ 4.4 แอมป์แต่แบตเตอรี่ตั้งค่าไว้ที่ 13 v (ภายใต้สถานะ charge) ดังนั้นกำลังจะเป็น 4.4 คูณกับ 13 เท่ากับ 57.2watt ดังนั้นพลังงานจะหายไป 20% และในกรณีที่เกิดสถานะที่มีเมฆมากหรืออุณหภูมิสูงค่าแรงดันที่ได้จะไม่ถึง 17 v (สำหรับแผง 75w) จะลดลงมาเหลือแค่ 14 – 15v ซึ่งเมื่อรวมกับและอาจไม่พอในการ charge แบตเตอรี่

INVERTER

เนื่องจาก photovoltaic plant เป็นโรงจักรกระแสตรงแต่ส่วนใหญ่ load ที่ใช้ทั่วไปเป็น load ที่ใช้ไฟกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องมี INVERTER ไว้คอยแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 เฟส sinewave Inverter ชนิดประสิทธิภาพสูง

Serial No.	Rated continuous Output Power (KW)	Surge Power (kw)	Nominal Input DC Voltage (V)	Maximum Input DC Voltage(V)	Minimum Input DC Voltage(V)	Max NO-Load Power drain(W)
1	0.5	1.0	12	25	10	2.0
2	1.0	1.8	12	25	10	4.0
3	3.0	5.0	24	50	20	10.0
4	5.0	8.0	48	100	40	15.0
5	10.0	15.0	60	120	50	30.0

ตารางที่ 3.3แสดงค่า 1เฟส sine wave ชนิดประสิทธิภาพสูง

- สามารถรับค่า input ได้ในช่วงที่กำหนด Maximum, Minimum input ดังตาราง 3.1
- สามารถใช้ในระบบ stand-alone ได้ โดยไม่ต้องต่อกับ grid line
- ประสิทธิภาพจะมีค่าไม่น้อยกว่า 90% ที่พิกัดโหลด แต่ถ้ารับโหลดประมาณ40-90% ประสิทธิภาพจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 87%
- Inverter จะถูกออกแบบโดยใช้ Solid State ทั้งหมด ไม่มีการใช้พวก electro mechanical relay หรือพวก switch
- จะใช้ IGBT ในตัว Inverter เพื่อที่จะสามารถแปลงพลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงโดยตัว IGBT นี้จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากกระแสHarmonic ที่สูงและค่าpower factorที่ต่ำ
- สามารถปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ตั้งแต่ 20% ของ rated power จนถึง rated power และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ power factor ในช่วง 0.95 lagging-0.95 leading
- %THD ของกระแสไฟฟ้าที่เกิด 5% และ %THD ของ voltage ไม่เกิน 2%
- สามารถรับค่า ripple ของ input current ได้±10%
- ในระบบที่ใช้ battery storage, Inverter จะทำงานร่วมกับ Low Voltage cutoff ซึ่งจะตัด load ออกเมื่อ state of charge (SOC) ลดต่ำลงจนถึง Maximum depth of discharge (MDOD) ซึ่งจะเป็ค่าที่กำหนดตาม battery แต่ละรุ่นแต่ละยี่ห้อ ซึ่งโดยทั่วไป cut off voltage จะอยู่ประมาณ 1.85±0.02 V ที่ 25 องศาเซลเซียส สำหรับเซลล์ 2 V หรือ 11.1±0. V สำหรับ voltage 12 V โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิจะมีผลต่อ V ของ battery ด้วย โดย voltage ของ battery จะลดลง $-4\text{ mv}\pm 1\text{ mv}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส สำหรับเซลล์ battery 2 V

-ค่า continuous power ที่แสดงดังตารางหมายถึงค่า rate power ที่ Inverter ทนได้อย่างน้อย 10 ชั่วโมง

-Surge power ที่กำหนดดังตารางที่ 3.3 จะมีไว้สำหรับบอกปริมาณ Surge power ซึ่งทนได้ โดยระยะเวลาของการทนทานก็ขึ้นอยู่กับแต่ละยี่ห้อ ซึ่งในการ start โหลดพวก Inductance จะมีการทำให้เกิดการ surge power ขึ้นได้

-อุณหภูมิในการปฏิบัติงานของ Inverter คงอยู่ตั้งแต่ 0-155 องศาเซลเซียส

-ความชื้นในการปฏิบัติงานควรอยู่ที่ 0-90%

การ Protection ที่มีใน Inverter โดยทั่วไป เช่น

-การเปิดวงจรที่ terminal

-การ short circuit ทั้งทางด้าน input และ output terminal

-การกลับขั้วของ input

-over and under Voltage ที่ input terminal

3 เฟส sinewave Inverter

-output ความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 0.01\%$

-ประสิทธิภาพโดยทั่วไปไม่ต่ำกว่า 92% ที่ 100% ของโหลด และจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 90% ที่ประมาณ 40-90% ของพิกัดโหลด

-ในการออกแบบจะใช้ solid-state ทั้งหมด จะไม่ใช้พวก relay เลย

-อุปกรณ์ในการ switching จะใช้ MOSFET เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง

-%THD ของกระแส ส่วนใหญ่จะน้อยกว่า 5% ส่วน %THD ของ voltage โดยทั่วไปจะไม่เกิน 2%

-ในการทำงานของ Inverter จะใช้ไฟจาก PV โดยตรง

-Inverter จะอยู่ในช่วง On-line condition (ช่วงปฏิบัติงาน) ก็ต่อเมื่อกำลังงานที่ผลิตจากแผง PV จะต้องไม่น้อยกว่า 2 % ของขนาดพิกัดของ Inverter

-output current ของ Inverter จะมี ripple อยู่ในช่วง $\pm 10\%$

-สามารถทนแรงดันทั้งด้าน input และ output ได้ถึง 2000 Vrms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Serial No.	Rated continuous Output Power (KW)	Surge Power (kw)	Nominal Input DC Voltage (V)	Maximum Input DC Voltage(V)	Minimum Input DC Voltage(V)
1	5	9	48	100	35
2	10	18	60	120	45
3	30	50	120	240	90
4	50	90	120	240	90
5	100	150	120	240	90

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า 3 เฟส sine wave

การ Protection ที่มีใน 3 เฟส Inverter

- Open circuit terminal
- Short circuit ที่ input, output
- การกลับขั้วของ DC input
- over และ under voltage ที่ input และ output
- AC current fault ที่ output
- Inverter มีอุณหภูมิสูงเกิน
- Induce lightning surges

หมายเหตุ ถ้าจำแนกINVERTER ตามการเรียงกระแส สำหรับINVERTERที่ใช้ใน photovoltaic power plant จำแนกได้ดังนี้

- 1 Line commutated inverter(LCI) โดยLCIเป็นinverterแบบสองทางดังนั้นจะจ่ายไฟได้เมื่อได้รับสัญญาณ sine waveจาก utility
- 2 Self commutated inverter(SCI) โดยSCIเป็น inverterแบบทางเดียวโดยจะแปลงแรงดันด้วยตัวมันเองให้เป็น sine waveเพื่อจ่ายac load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์ควบคุม(CONTROL UNIT)

สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วย Rechargeable Battery นั้น จำเป็นต้องมีการป้องกันสำหรับปัญหาเหล่านี้

1. ความเสียหายของสายไฟหรือการเกิดไฟไหม้สายไฟ จากการเกิด short circuit
2. การเกิด over-discharge ของ lead-acid battery (แบตเตอรี่ชนิด lead- acid)
3. การชาร์จที่มากเกินไปของแบตเตอรี่

CONTROL UNIT (CU) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับป้องกันแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังสามารถแสดง

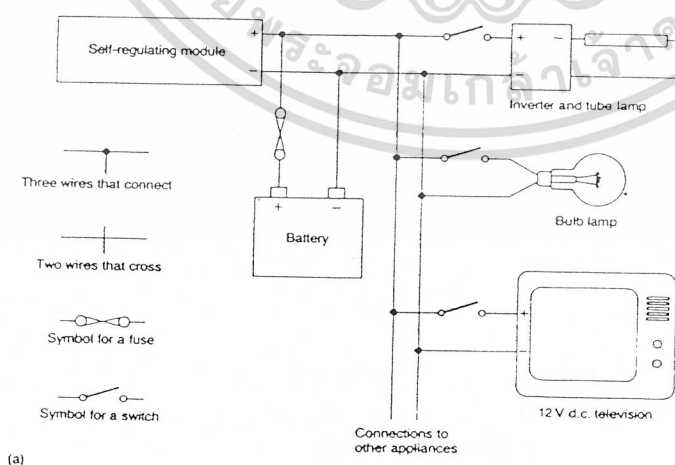
การทำงานของระบบทั้งหมด และสามารถตัดต่อวงจรได้ด้วย

การตัดสินใจเลือก CU มาใช้ สิ่งที่สำคัญที่จะต้องคำนึงคือ ราคา ความเชื่อถือได้ และ ความง่ายในการใช้งาน

ความปลอดภัยเบื้องต้นที่ระบบควรจะมีคือ

1. การป้องกันสายไฟ(short circuit protection)

ทำได้โดยการใส่ฟิวส์ (fuse) ใกล้กับแบตเตอรี่ เพื่อป้องกัน wiring หลีกเลียงการเกิดสายไฟไหม้ หรืออาจจะใช้ miniature circuit-breaker(MCB) แทนฟิวส์ก็ได้ ซึ่ง MCB มีคุณสมบัติในการเปิดวงจรได้เร็วกว่าฟิวส์เมื่อเทียบที่กระแสเท่ากัน เนื่องจากฟิวส์ต้องอาศัยการหลอม รูปที่ 3.10 แสดงการต่อฟิวส์



รูปที่ 3.10 แสดงการต่อฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การป้องกันเครื่องใช้ไฟฟ้าและแผงเซลล์

ในเครื่องใช้บางชนิดอาจใช้ฟิวส์ต่างหากเพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ แต่ต้องตระหนักด้วยว่า ฟิวส์จะทำให้เกิด voltage drop เล็กน้อยสำหรับอุปกรณ์นั้นๆ

ฟิวส์พิเศษ (extra fuse) ควรจะใช้สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความเสี่ยงในการเกิดการลัดวงจรสูง

blocking diode - เป็นไดโอดที่ต่อไว้ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลเข้าไปสู่แผงเซลล์ในขณะที่เกิดการลัดวงจรในแผงเซลล์ ซึ่งกระแสจะสูงมากสามารถทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้

3. การป้องกันความเสียหายซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่า เมื่อเกิดฟ้าผ่าใกล้ๆ สายไฟ จะทำให้เกิด induce high voltage ในสายไฟ ซึ่งสามารถทำลาย วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในCU และ INVERTER ด้วย

MOV(metal oxide varistor) เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับป้องกันกระแสรบกวนในวงจรซึ่งเกิดจากการเกิดฟ้าผ่า

4. ข้อควรระวังในการต่อขั้ว

การต่อขั้วของแบตเตอรี่และเครื่องใช้ไฟฟ้า ต้องระวังการต่อสลับขั้วกัน เพราะ ถ้ามีการต่อกลับขั้วกัน เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงบางชนิดจะไม่ทำงาน หรือบางชนิดอาจจะเสียหายได้ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้

การเกิด Over Discharge มีผลกระทบกับแบตเตอรี่อย่างไร

Low Voltage cutoff Unit (LVCU) with mechanical relay

Low Voltage cutoff Unit เป็นอุปกรณ์ตัดต่อชนิดหนึ่งซึ่งจะใช้ตัดต่อระหว่าง battery กับ PV array และระหว่าง battery กับ Load เมื่ออยู่ในสถานะที่กำหนด โดยอาศัยการทำงานของ Mechanical relay

หน้าที่หลักของ Low Voltage cutoff Unit มีอยู่ 2 ประการด้วยกัน คือ

1.LVCU จะทำหน้าที่ตัด load ออกจาก battery เมื่อ state of charge (SOC) ของ battery มาถึงจุด Maximum depth of discharge (MDOD) คือ สถานะที่ battery จำหน่ายไฟออกไปจนถึงขั้นต่ำสุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดแล้ว LVCU ก็จะทำให้การตัด load ออก LVDU จะต่อโหลดเข้ากับ battery อีกครั้งหนึ่งเมื่อ

battery charge ตัวเองจนถึงระดับที่สูงกว่า maximum depth of discharge

2.LVCU จะตัด PV array ออกจาก battery circuit เมื่อ voltage output ของ PV array มีค่า

น้อยกว่าค่าที่จะสามารถ charge battery ได้

คุณลักษณะอื่นของ LVCU ที่ใช้ Mechanical ได้

-ในการทำงานนั้น LVCU จะใช้พลังงานจาก battery ในการทำงานโดยจะต่อถาวรจาก battery เลย

-โดยทั่วไปใน battery ที่ใช้ใน LVCU จะตัด load ออกเมื่อ voltage ของ battery ต่ำลงเหลือประมาณ 11.1 ± 0.1 V ที่ 25 องศาเซลเซียส และจะทำการต่อกลับเมื่อ battery charge ตัวเองใหม่จนได้ volt ถึงประมาณ $12.3 \pm 5\%$ ที่ 25 องศาเซลเซียส

-LVCU จะมีกลไกที่สามารถป้องกันกระแสไหลจาก battery ไปสู่ PV array โดยจะไม่ได้ใช้ blocking diode ในการป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ แต่จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจและควบคุมปริมาณและทิศทางของกระแส โดยจะนำข้อมูลนี้ไปส่งการทำงานของ Mechanical Relay

-อุปกรณ์ relay ที่ใช้ใน LVCU นั้น อย่างน้อยที่สุดจะสามารถทนกระแสได้ 3 เท่าของกระแส short-circuit ที่ PV array

-เพื่อที่จะป้องกันการ ทำงานก่อนเวลาอันควรของทั้งการติดตั้งและการต่อ เพื่อจะลดการ surge ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของ relay เราจะใช้ time relay ในการถ่วงเวลาการปฏิบัติงานของ relay ประมาณ 5-10 วินาที เพื่อที่ relay จะได้ไม่ต้องใช้ตัดต่อบ่อย ซึ่งการตัดต่อบ่อยเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำให้เกิด surges ได้

-LVCU จะต้องมีความต้านทานที่จะสามารถทำให้เกิด voltage drop ไม่เกิน 0.05 V ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Serial or Type No.	Nominal Battery Voltage (V)	Maximum Charging Current (A)	Maximum Parasitic Current when charging (mA)	Maximum Load Current (A)	Maximum Array Voltage (V)
1	12	5	50	10	25
2	12	10	100	20	25
3	12	30	100	40	25
4	24	10	50	20	50
5	24	30	50	40	50
6	48	10	50	20	100
7	48	30	50	50	100

ตารางที่ 3.5แสดงตัวอย่างของ LVCU 7 ขนาด

-LVCU จะมีไฟแสดงสถานะบอกสถานะการทำงานของมัน โดยทั่วไปจะมี LED อย่าง

น้อย 4 หลอดที่บอกสถานะ เช่น

-ไฟบอกสถานะเมื่อ voltage จาก PV มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ voltage ที่ battery

ต้องการในการ charge

-ไฟที่บอกสถานะเมื่อกำลังมีการ charge battery อยู่

-ไฟที่บอกว่า battery มี voltage มีค่ากำลังใกล้ถึงจุดสูงสุดของมันแล้วโดยจะมี

ลักษณะเป็นไฟกระพริบ

-ไฟที่บอกว่าขณะนี้ SOC ของ battery ถึงจุดต่ำแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-อุณหภูมิในการปฏิบัติงานของ LVCU อยู่ระหว่าง 0-55 องศาเซลเซียส

-ความชื้นในการปฏิบัติงานควรอยู่ที่ 0-95%

Low-Voltage cutoff Unit(LVCU) with MOSFET

คุณลักษณะของ Low-Voltage cutoff Unit ชนิดนี้จะคล้ายกับแบบ Mechanical relay แต่มี

ข้อแตกต่างกันตรงที่จะใช้ MOSFET เป็นอุปกรณ์ตัดต่อเท่านั้น

Serial or Type No.	Nominal Battery Voltage (V)	Maximum Charging Current (A)	Maximum Parasitic Current when charging (mA)	Maximum Load Current (A)	Maximum Array Voltage (V)
1	12	10	50	20	25
2	12	30	100	50	25
3	24	50	100	50	50
4	24	50	100	75	50
5	48	50	100	100	100
6	60	50	100	100	125
7	96	50	100	100	200

ตารางที่ 3.6แสดงตัวอย่างของ LVCU with MOSFET

Battery Charge-Controller Unit

Battery Charge-Controller Unit จะอาศัยหลักการทำงานของ MOSFET ในการตัดต่อ โดย

จะไม่ใช้อุปกรณ์พวก relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่หลักของ Battery Charge-Controller Unit มีอยู่ 2 ประการคือ

- 1.จะคอยตรวจสอบ SOC ของ battery ไม่ให้เกิดการ over voltage โดยมันจะทำการตัด battery จาก PV array เมื่อ state-of-charge ของ battery ถึงจุด fully charge ก็คือ charge เต็มแล้ว และ จะทำการต่อวงจรอีกครั้งเมื่อ SOC ของ battery ต่ำกว่าระดับ fully charge แล้ว
- 2.จะทำการตัดต่อวงจรระหว่าง battery กับ PV array เมื่อ voltage ที่ออกมาจาก array น้อย

มากจนไม่สามารถทำการ charge battery ได้

คุณลักษณะอื่นๆ ของ Battery Charge Controller

- ในการทำงานนั้น battery charge controller จะนำพลังงานจาก battery มาใช้
- ใช้ time delay ในการถ่วงเวลาในการตัดต่อวงจร เพื่อลดเวลาหรือจำนวนครั้งของการ ทำงานของ MOSFET ในการตัดต่อ เพราะการตัดต่อบ่อยเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิด surges โดยค่า time delay จะอยู่ประมาณ 5-10 วินาที
- MOSFET สามารถทนกระแสได้ประมาณ 2 เท่าของ PV short circuit current

Serial or	Nominal	PV Array	Maximum	Maximum
Type	Battery	Charging	Parasitic Current	PV Array
No.	Voltage (V)	Current (A)	when charging	Voltage (V)
			(mA)	
1	12	20	50	25
2	12	50	100	25
3	24	50	100	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้ส่วนหนึ่งของการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอื้ออำนวยให้แก้ไขได้/ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	24	50	100	50
5	48	30	100	100
6	96	30	100	200
7	96	30	100	200

ตารางที่ 3.7แสดงตัวอย่างของ Charge Controller

1. อุปกรณ์แสดงระดับการชาร์จ (meter) ใช้วิธีวัดแรงดันจริงๆ ที่แบตเตอรี่ แสดงคังรูป

(a) และ รูป (b)แสดงเครื่องมือ 3 ชนิด สำหรับแสดงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ซึ่งถ้ามี อุปกรณ์นี้
อย่างเดียวยังต้องใช้ต้งจรงเองเมื่อเห็นว่าระดับแรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่าปกติ



Figure 4.4 Monitoring the state of charge of lead-acid batteries by measuring voltage.
(a) Circuit for connecting a voltmeter. Separate wires connect to the battery terminals to avoid the voltage drop along the main current-carrying wires.
(b) Examples of state-of-charge meters: 1 four-figure digital voltmeter; 2 control unit with three charge indicator LEDs showing battery states of 'FULL', 'OK', or 'LOW'; 3 expanded-scale voltmeter.

รูปที่ 3.11 a, b เครื่องมือวัดระดับแรงดันแบตเตอรี่

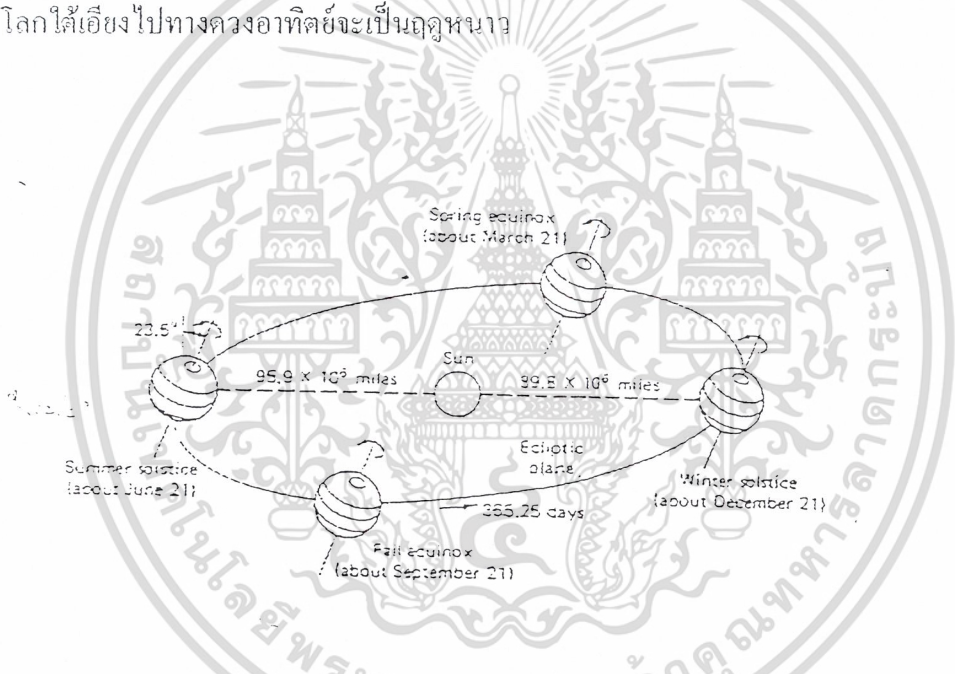
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการคำนวณและพิจารณาในการหาขนาดโรงจักรพลังงานแสงอาทิตย์

4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ของตำแหน่งดวงอาทิตย์กับโลก (Sun Positions in Relation To the Earth) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ขณะที่โลกหมุน แสดงดังรูปที่ 4.1 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรี โดยแกนหมุนของโลกจะเอียงทำมุม 23.5 องศา กับแนวตั้งฉากของระนาบวงโคจรในการอ้างอิงระนาบของการโคจรทำได้โดย ถ้าชี้โลกเหนือเอียงไปทางดวงอาทิตย์ในฤดูร้อน และในทางกลับกันถ้าชี้โลกใต้เอียงไปทางดวงอาทิตย์จะเป็นฤดูหนาว

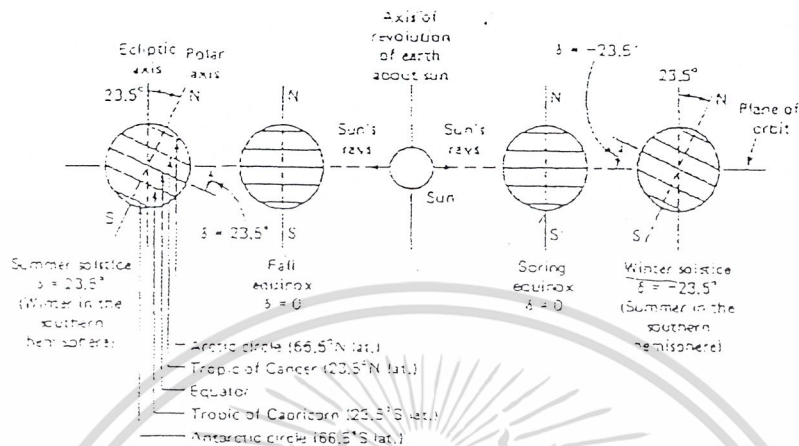


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของ โลกรอบดวงอาทิตย์

เส้นอาร์กติก (Arctic Circle) และเส้นแอนตาร์กติก (Antarctic Circle) เส้นทรอปิกออฟ แคนเซอร์ (Tropic of Cancer) และเส้นทรอปิกออฟแคพริคอน (Tropic of Capricorn) มีความสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ใน 4 ฤดู ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยในฤดูหนาวดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากโลกที่สุด และเป็นช่วงที่ขั้วโลกเหนือจะเอียงหนีออกจากดวงอาทิตย์ 23.5 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์กติก จะมีมืดโดยสมบูรณ์ และบริเวณใต้เส้นแอนตาร์กติกจะสว่างโดยตลอด ส่วนในฤดูร้อน ดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากโลกที่ใกล้เช่นกัน ซึ่งขั้วโลกเหนือจะเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์ 23.5 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์กติกจะสว่างตลอดและบริเวณใต้เส้นแอนตาร์กติกจะมีมืดโดยสมบูรณ์ ส่วนในฤดูใบไม้ร่วงจะมีกลางวันเท่ากับกลางคืน ซึ่งขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้จะมีระยะห่างจากดวงอาทิตย์เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์และแสดงตำแหน่งของเส้นอาร์กติกและเส้นแอนอาร์กติก ด้วยเหตุนี้รังสีที่ส่องมาบนโลกจึงเป็นฟังก์ชันทางเรขาคณิต มุมพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดัง แสดงได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับผิวโลกดังรูปที่ 4.3 โดยกำหนดให้จุด P เป็นจุดที่อยู่บนผิวโลก

ละติจูด (Latitude) L คือ มุมจากระนาบเส้นศูนย์สูตรถึงจุด P ละติจูดที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรจะกำหนดให้มีค่าเป็นบวก จากรูปที่ 4.3 ละติจูดจะเป็นมุมระหว่างเส้น OP (โดยที่ O เป็นจุดศูนย์กลางของโลก) กับโปรเจกชันของเส้น OP บนระนาบเส้นศูนย์สูตร

Declination δ คือ มุมที่รังสีของดวงอาทิตย์กระทำกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร กำหนดให้มุม Declination ที่เอียงไปทางขั้วโลกเหนือมีค่าเป็นบวก จากรูปที่ 4.3 มุม Declination เป็นมุมระหว่างเส้นจากจุดศูนย์กลางโลก ถึงจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์กระทำกับโปรเจกชันของเส้นนี้บนระนาบเส้นศูนย์สูตร จากรูปที่ 4.2 ค่าของมุม Declination จะมีค่าตั้งแต่ 0 องศา ในฤดูใบไม้ผลิ (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง +23.5 องศา ในฤดูร้อน (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้โลกที่สุด) และจาก 0 องศา ในฤดูใบไม้ร่วง (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง -23.5 องศา ในฤดูหนาว (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ไกลจากโลกที่สุด) โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุม Declination ตลอดปีจะสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = 23.45 \sin[360(284+n)/365] \text{ หน่วยเป็นองศา}$$

เมื่อ n เป็นจำนวนวันใน 1 ปี โดยในการคำนวณเราจะใช้ค่า Declination คงที่ตลอดทั้งวัน โดยค่า n หาจากตารางดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Month	N for I th Day of Month	For the Average Day of the Month		
		Date	N, day of the Year	δ Declination
มกราคม	I	17	17	-20.9
กุมภาพันธ์	31+I	16	47	-13.0
มีนาคม	59+I	16	75	-2.4
เมษายน	90+I	15	105	9.4
พฤษภาคม	120+I	15	135	18.8
มิถุนายน	151+I	11	162	23.1
กรกฎาคม	181+I	17	198	21.2
สิงหาคม	212+I	16	228	13.5
กันยายน	243+I	15	258	2.2
ตุลาคม	273+I	15	288	-9.6
พฤศจิกายน	304+I	14	318	-18.9
ธันวาคม	334+I	10	344	-23.0

ตารางที่ 4.1 แสดงการหาค่า n ใน 1 ปี

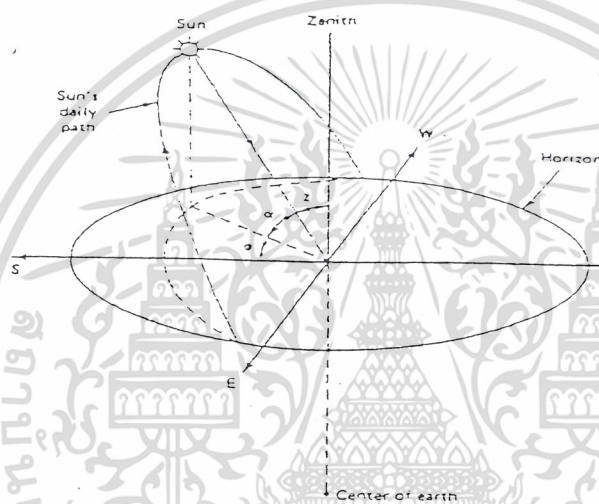
Hour Angle h คือมุมระหว่างจุดใด ๆ บนเส้นแวงกับทิศทางของดวงอาทิตย์บนโลกในรูปที่ 4.3 Hour angle ของจุด P คือ มุมที่วัดจากเส้นโพรเจกชัน OP บนระนาบเส้นศูนย์สูตรกับเส้นโพรเจกชันของเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์บนระนาบเส้นศูนย์สูตร โดยที่ ณ solar noon ของแต่ละท้องถิ่นจะมีค่า Hour angle เป็นศูนย์ โดยที่มุมจะหมุนเปลี่ยนไป 15 องศาต่อชั่วโมง(มุมช่วงเช้าจะเป็นลบ และเป็นลบ และมุมช่วงบ่ายจะเป็นบวก) ตัวอย่างเช่นที่เวลา 11:00 น. มุมจะเท่ากับ -15 องศา ส่วนที่เวลา 13:30 น. มุมจะเท่ากับ $+15$ องศา คูณกับ 1.5 ชั่วโมง เท่ากับ 22.5 องศา แต่สำหรับการคิดมุมที่ sunset hour angle (ω_s) คือมุมเมื่อพระอาทิตย์ขึ้นโดยที่ $\theta_z = 90$ องศา

ส่วนในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะต้องใช้มุมใหม่เพิ่มขึ้น 3 มุม จากมุมพื้นฐานข้างต้นเป็นตัวบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 โดยโลกจะหมุนไปทางทิศตะวันออก ส่วนดวงอาทิตย์จะปรากฏโดยการสังเกตบนโลกจะเห็นว่าดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปบนท้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าในลักษณะเป็นเส้นโค้งโดยจะค่อย ๆ ขึ้นจากทิศตะวันออก หลังจากนั้นจะเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก มุมที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ได้แก่

1. Zenith angle θ_z คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กระทำในแนวดิ่ง หน่วยเป็นองศา
2. Altitude angle α คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กระทำในแนวนอนหน่วยเป็นองศา
3. Azimuth angle ϕ คือ มุมของรังสีดวงอาทิตย์ที่วัดจากทิศใต้ไปทางทิศตะวันตกในแนวระนาบแนวนอน จะมีค่าเป็นบวกสำหรับซีกโลกเหนือ ส่วนสำหรับซีกโลกใต้จะวัดจากทิศเหนือไปทางทิศตะวันออกในแนวระนาบแนวนอนมีค่าเป็นบวก หน่วยเป็นองศา



รูปที่ 4.3 แสดงเส้นทางเดินของดวงอาทิตย์ และมุม Zenith angle θ_z ,

Altitude angle α , Azimuth angle ϕ

สำหรับรังสีของดวงอาทิตย์บนพื้นผิวเอียง จำเป็นที่จะต้องกำหนดมุมมากกว่า 3 มุม ให้สัมพันธ์กับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 อันได้แก่

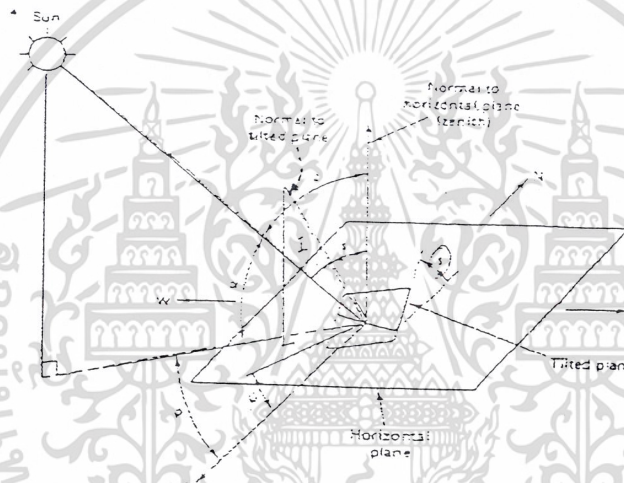
1. Slope (β) คือ มุมระหว่างพื้นผิวกับระนาบแนวนอน (Horizontal) โดยมุมเอียงจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 180 องศา
2. Surface angle ψ คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวกับทิศใต้วัดในแนวระดับ โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศตะวันตก
3. Incident angle θ คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากพื้นผิว ถ้าพื้นผิวกับระนาบแนวระดับวางทับกันจะได้ว่ามุม Incident angle θ และมุม Zenith angle θ_z จะเท่ากันโดยมุมนี้มีความสำคัญในการคำนวณปริมาณแสงที่จะตกลงบนแผง ถึงมีการตั้งค่าให้มีความสัมพันธ์กับมุมอื่นๆโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$

และสำหรับระนาบแกนนอน มุม incidence คือมุม Zenith ของดวงอาทิตย์(θ_z) โดยค่าของมุมจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา เมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือแนวระนาบ สำหรับที่สถานะนี้ ค่า Slope (β) เท่ากับ 90 องศา ดังนั้นจากสมการ จึงเป็น

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta$$



รูปที่ 4.4 แสดงมุมที่เกิดจากพื้นผิว ได้แก่มุม Tile angle β , Surface Azimuth angle ψ , Incident angle θ

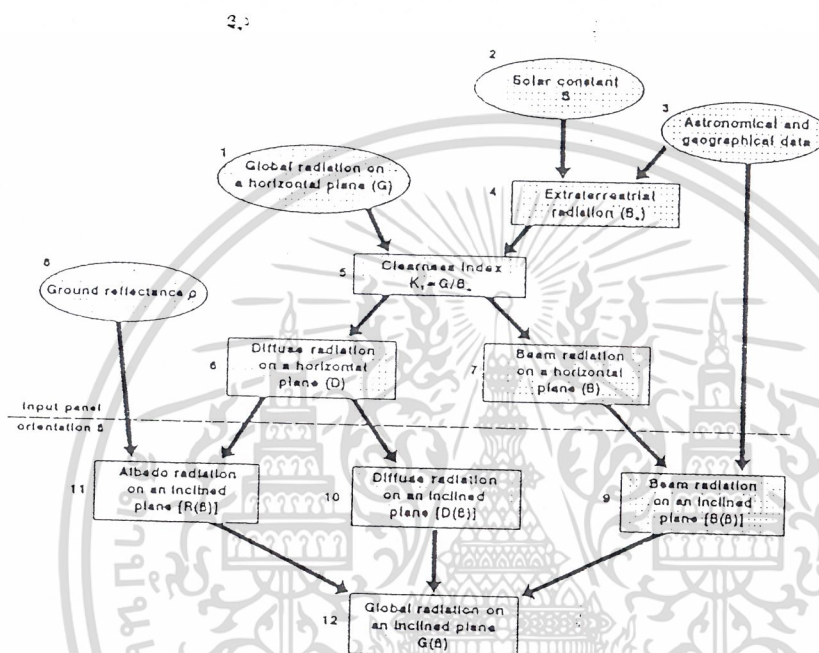
มุมเอียง และ ปริมาณแสงที่ตกลงบนแกน TRACKING

-Solar radiation เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบ สามารถแบ่งออกเป็น

- 1.Direct or Beam Radiation
- 2.Diffuse Radiation
- 3.Reflected Radiation

-การแผ่รังสีของทั้ง 3 แบบนี้ ขึ้นอยู่กับวันและเวลา receiving angle สภาวะแวดล้อมของบริเวณรอบ ๆ เป็นต้น โดยจะแตกต่างกันออกไป ส่งผลให้ค่า output นั้นแตกต่างกันด้วย จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลของแต่ละระบบเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

พิจารณาการแผ่รังสีที่ค่า tilt angle ต่าง ๆ กัน Global Radiation at different tilt angle $G(\beta)$

สมการที่ใช้พิจารณาคือ

$$G(\beta) = B(\beta) + D(\beta) + R(\beta)$$

โดยหาค่า B_0 ได้จาก

$$B_{\odot} = (24/\pi) S \{1 + 0.33 \cos(2\pi d_{\odot}/365)\} (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_{\odot} + \omega_{\odot} \sin\phi \sin\delta)$$

ϕ = ตำแหน่งละติจูดที่ PV array ติดตั้ง

 β = កម្រិត Tilt angle

δ = Solar declination ซึ่งหาได้จาก $23.45 \sin\{360 \times (284 + n) / 365\}$

n = วันที่ของปี โดยวันที่ 1 มกราคมมีค่าเป็น 1 และ 31 ธันวาคมมีค่าเป็น 365

๑) = มุมชั่วโม่งตำแหน่งดวงอาทิตย์ สำหรับที่ตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หมายเหตุ มุมที่ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นเรเดียน

โดย ค่า B_0 คือ ค่า irradiance ที่อยู่นอกบรรยากาศโลกโดยเป็นค่าที่อยู่ในช่วงประมาณ -3% ถึง +3% ของวงโคจรของโลก

ค่า clearness index K_T โดยค่านี้จะถูกคำนวณทุกๆเดือนในหนึ่งปีจาก

$$K_T = G/B_0$$

โดยค่า G เป็น Global radiation บนระนาบแนวนอน (สำหรับรายงานนี้ค่าตัวนี้ได้จากปริมาณพลังงานแสงจากกรมอุตุนิยมวิทยา)

และค่า K_T index ตัวนี้จะใช้ในการคำนวณ ค่า diffuse radiation ดังนั้น

$$D/G = 1 - 1.13K_T$$

ส่วนการคำนวณ B ได้จาก

$$B = G - D$$

โดยค่า B เป็นค่า Beam radiation ที่แนวระนาบ ถ้าจะหาค่า Beam radiation ที่ตกบนระนาบ TRACKING หาได้จาก

$$B(\beta) = B \cdot R_b$$

หมายเหตุค่า R_b (geometric factor R_b) คือค่าอัตราส่วนระหว่าง Beam radiation บนมุมเอียงกับค่าของมันที่ พื้นผิว tilted $\{ R_b = G_{b,T}/G_b = (G_{b,m} \cos \theta)/(G_{b,m} \cos \theta_z) = (\cos \theta)/(\cos \theta_z) \}$



รูปที่ 4.6 แสดงมุมของรังสีดวงอาทิตย์

เนื่องจาก diffuse radiation เกิดจากการที่ ลมแสงสะท้อนกับอากาศแล้วตกกระทบลงบนแผง ดังนั้นค่า diffuse radiation ที่ระนาบ TRACKING คำนวณได้จาก

$$D(\beta) = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \cdot D$$

ค่า reflected radiation (R) เป็น irradiance ที่สะท้อนจากพื้นผิวด้านที่แผงจึงทำให้ปริมาณแสงเพิ่มขึ้นโดยปกติ ค่า reflected ตัวนี้จะมีค่า ไม่มากเมื่อเทียบกับค่าตัวอื่นๆ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R(\beta) = \frac{1}{2} (1 - \cos\beta) \rho D$$

โดยค่า ρ(reflectivity)ของลักษณะของพื้นที่

หมายเหตุ สำหรับค่า reflectivity ของพื้นที่ต่างเป็นดังนี้

ลักษณะพื้นที่	ค่า reflectivity
พื้นที่แห้งเปล่า	0.2
พื้นที่ที่มีหญ้าปกคลุม	0.3
พื้นที่ทะเลทราย	0.4
พื้นที่หิมะ	0.5 - 0.8

การหาค่ามุมและค่าcosθ ของTRACKING แบบต่างๆ

1. สำหรับอุปกรณ์แบบ TRACKING แบบสองแกนค่า slope และ มุม incidenceจะเป็นดังนี้

$$\beta = \arccos(\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega)$$

$$\theta = 0$$

สำหรับในกรณี TRACKINGแบบหนึ่งแกน (เหนือ-ใต้,หมุนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วคงที่ค่า slope และค่ามุม incidenceจะเป็น

$$\beta = \arccos(\cos\omega \cos\phi)$$

$$\theta = \delta$$

ในกรณี TRACKING แบบหนึ่งแกน(แนวตะวันออก-ตะวันตก)

$$\beta = \arctan\{ (\cos\delta \sin\phi \cos\omega - \sin\delta \cos\phi) / (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega) \}$$

$$\theta = \arccos[\sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\omega]$$

สำหรับการออกแบบกรณี FIXแกน(ที่ไม่มีอุปกรณ์ TRACKING) ค่าของ slope และมุม incidence จะเป็น

$$\beta = \phi \text{ หรือให้ติดตั้งที่ } \phi + 15 \text{ องศา หรือ } \phi - 15 \text{ องศา}$$

$$\theta = \arccos(\cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta)$$

ดังนั้นเมื่อหาค่า β , θ จึงทำให้หาค่า B(β),D(β),R(β) ฉะนั้นแล้ว จึงหาค่า global radiationที่G(β) ได้

4.2คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของ PHOTOVOLTAIC

การออกแบบระบบและการทำงานของ SOLAR CELL อยู่บนรากฐานของคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง VOLTAGE และกระแสเซลล์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงต่างๆและการเปลี่ยนแปลง CELL TEMPERATURE(อุณหภูมิเซลล์)ต่างๆ สำหรับจุดประสงค์ในการออกแบบระบบรูปแบบจะถูกจัดให้อยู่ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสแรงดันและกำลังไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเซลล์ภายใต้ช่วงสภาวะดำเนินการต่างๆ ที่ถูกระบุไว้ และคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ต้องการข้อมูลจากผู้ผลิต SOLAR CELL นั้นๆ ด้วย

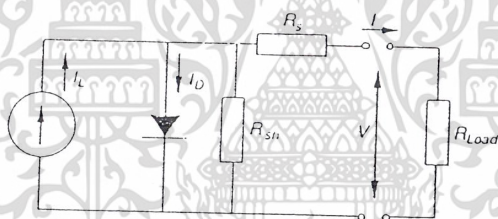
ในรูปที่ 4.7 เป็นวงจร EQUIVALENT CIRCUIT ที่ถูกใช้ในการคำนวณสำหรับเซลล์แต่ละตัวและใช้ในการประกอบ MODULE ของหลายๆ เซลล์ และในการประกอบ ARRAY ของหลายๆ MODULE โดยวงจรต้องการรูป PARAMETER 5 ตัว ตัวแรก I_L ตัวที่ 2 I_0 ตัวที่ 3 R_s ตัวที่ 4 R_{sh} และ PARAMETER CURVE FITTING ของ a ที่อุณหภูมิและปริมาณแสงที่ระบุไว้ โดยคุณสมบัติของกระแสและ VOLTAGE ของ MODEL นี้จะเป็นดังสมการต่อไปนี้ โดย

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \{ \exp[V + IR_s]/a \} - (V + IR_s)/R_{sh} \quad \text{---สมการ(4.1)}$$

และพลังงานจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$P = IV \quad \text{---สมการ(4.2)}$$

PARAMETER ทั้ง 5 ตัวนี้จะอยู่ใน FUNCTION ของ CELL TEMPERATURE



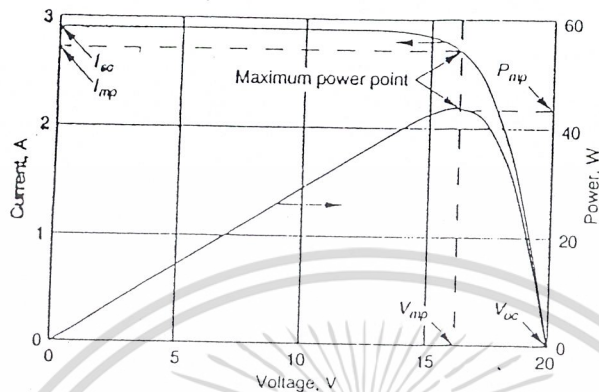
รูปที่ 4.7 วงจร Equivalent circuit

ลักษณะของกระแสและแรงดันของ PHOTOVOLTAIC ของ MODULE เป็นดังรูป 4.7 แกนของกระแส (ซึ่ง $V=0$) คือกระแส SHORT CIRCUIT และจุดตัดที่แกน VOLTAGE (ซึ่ง $I=0$) เป็น OPEN CIRCUIT VOLTAGE ซึ่งที่ MODULE นี้กระแสจะเกือบคงที่ถึงประมาณ 15 V และที่จุดนี้กระแส DIODE (I_D) จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมากสำหรับที่สภาวะ OPEN CIRCUIT ที่ประมาณ 20 V กระแส I_L ทั้งหมด (THE LIGHT CURRENT) จะผ่านตัว DIODE และต้านทานแบบขนาน (ความต้านทานแบบขนาน) สำหรับการเปรียบเทียบเซลล์ซิลิกอนขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณแสง $1000 \text{ W} / \text{M}^2$ แรงดัน OPEN CIRCUIT จะอยู่ประมาณ 0.6 V และกระแส SHORT CIRCUIT จะอยู่ประมาณ 20-30 มิลลิแอมแปร์

โดยพลังงานที่อยู่ใน FUNCTION ของ VOLTAGE ถูกแสดงในรูป 4.8 ภายใต้ I-V CURVE ค่า POWER ที่ได้สูงสุดนั้นจะอยู่ภายในสี่เหลี่ยมผืนผ้าของพื้นที่ใต้ CURVE นั้นที่จุด POWER สูงสุด (P_{mp}) กระแสสูงสุด (I_{mp}) แรงดันสูงสุด (V_{mp}) ในอุดมคติเซลล์ควรจะปฏิบัติภายใต้ค่า MAXIMUM POWER ณ จุด MAXIMUM POWER

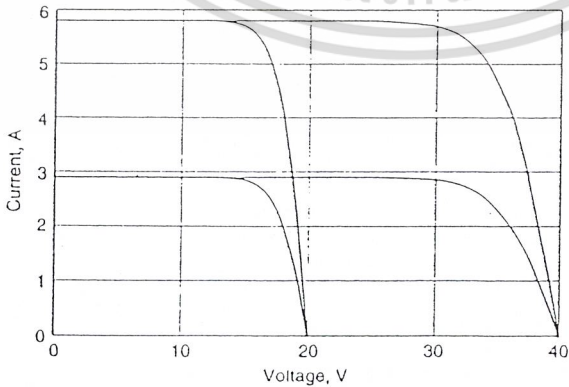
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงพลังงานภายใต้ V-I curve

เซลล์จะถูกหลอมรวมกันเป็น MODULE และหลายๆ MODULE จะถูกใช้เป็น ARRAY MODULE แต่ละ MODULE จะประกอบด้วยเซลล์ที่ต่อแบบขนานและอนุกรมเพื่อให้ได้ VOLTAGE ที่ต้องการ และ ARRAY ของหลายๆ MODULE อาจจัดอยู่ในช่วงการต่อแบบอนุกรมและขนาน สำหรับการบ่งชี้ MODULE หรือเซลล์ที่จะต่อแบบอนุกรม VOLTAGE จะเป็นตัวกำกับ และ เมื่อต่อแบบขนานกระแสจะเป็นตัวกำกับ ถ้าไม่มีการระบุลักษณะเฉพาะของเซลล์ และ MODULE จะเป็นการยากมากในการวิเคราะห์ความต้องการ รูป 4.9 แสดงคุณสมบัติของ CURVE I-V ของ MODULE ที่ต่อ 1 2 และ 4 ตัวในทั้งแบบต่ออนุกรมและขนาน



รูปที่ 4.9 แสดงคุณสมบัติของ I-V curve ของ Module ที่ต่อ 1, 2 และ 4 ตัวทั้งแบบอนุกรมและขนาน

เอกสารโดย CURVE I-V ทั้งหมดในส่วน นี้จะถูกดำเนินการภายใต้สมการ 4.1 โดย PARAMETER ทั้ง 5 ตัว ใน MODEL จะถูกได้รับโดยตรงโดยใช้การวัด คุณสมบัติ VOLTAGE

และกระแสของMODULE ที่สภาวะอ้างอิง โดยการวัดคุณสมบัติของไฟฟ้าของ PHOTOVOLTAIC นี้ จะถูกทำที่ปริมาณแสงอ้างอิง ที่ 1000 W / m^2 และที่อุณหภูมิโดยรอบที่ (AMBIENT TEMPERATURE) 25 องศาเซลเซียส และการวัดกระแสและแรงดันที่สภาวะอ้างอิงนี้มักถูกจัดอยู่ภายใต้สภาวะ OPEN CIRCUIT , SHORT CIRCUIT และสภาวะ MAXIMUM POWER แต่มันเป็นไปได้ที่จะหา PARAMETER ทั้ง 5 ตัว โดยใช้การวัดแค่ 3 ตัวนี้ อย่างไรก็ตามความต้านทาน shunt ของเซลล์ ใหม่ๆที่ผลิตได้ตอนนี้ จะสูงมากดังนั้น term สุดท้ายของสมการ 4.1 มักจะถูกตัดทิ้งไปแต่ที่สภาวะแรงดันต่ำ จำเป็นที่จะต้องพิจารณาความต้านทาน shunt เพราะ ถ้าไม่พิจารณาความต้านทานตัวนี้ ความชันที่ได้จะผิดคลบโดยค่าที่ได้จะอยู่ภายใต้หรือใกล้ๆกับแนวแกนนอนดังรูป 4.2 เมื่อความต้านทาน shunt ถูกทำให้เป็น INFINITY ก็ยังเหลือ PARAMETER อีก 4 ตัวที่ต้องหาภายใต้การวัดจุด 3 จุดที่อยู่บน CURVE I-V เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ PARAMETER ทั้ง 4 ตัวนี้ ที่สภาวะ SHORT CIRCUIT กระแส DIODE จะน้อยมาก(I_D) และ LIGHT CURRENT(I_L) จะเท่ากับกระแสที่ SHORT CIRCUIT

$$I_L = I_{sc} \text{ ---สมการ (4.3)}$$

ที่สภาวะ OPEN CIRCUIT กระแสจะถูกทำให้เป็น 0 และค่า 1 ที่อยู่ที่สมการ 4.1 จะถูกทำให้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับใน TERM ของ EXPONENTIAL ดังนั้น

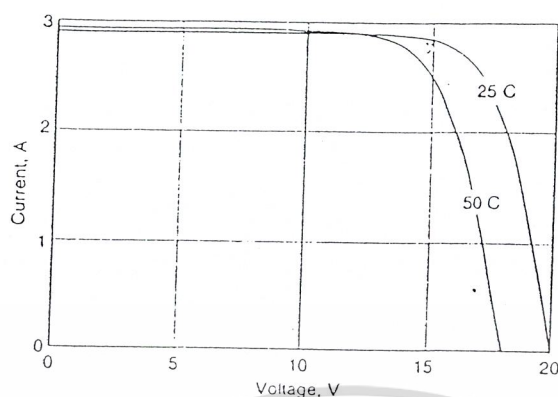
$$I_o = I_L \exp(-V_{oc}/a) \text{ ---สมการ (4.4)}$$

การวัด CURVE I-V ที่สภาวะ MAXIMUM POWER จะถูกแทนที่ลงไปในสมการ 4.1 และค่า I_o จากสมการ 4.4 และค่า I_L จากสมการ 4.3 โดยตัด 1 ทิ้งไป ผลจะได้ดังนี้

$$R_s = \{a \ln(1 - I_{mp}/I_L) - V_{mp} + V_{oc}\}/I_{mp} \text{ ---สมการ (4.5)}$$

สมการ 4.5 R_s จะเกี่ยวข้องกับ a แต่ค่า MAXIMUM ที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดด้วย R_s และ a เป็นค่าบวก ค่า R_s สูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ a เข้าใกล้ 0 และค่าของ a จะสูงสุดเมื่อ R_s เข้าใกล้ 0 ณ สภาวะอิสระอื่นๆ มีความจำเป็นเพื่อที่จะตัดสินใจค่าของทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้ซึ่งตามปกติผู้ผลิตจะไม่ได้อัดพารามิเตอร์ของทั้งคู่ที่สภาวะต่างไว้ ดังนั้นทางเราที่เราจะเลือกใช้ก็คือการใช้สภาวะที่จุด MAXIMUM POWER ซึ่งอนุพันธ์ของพลังงาน(ซึ่ง VOLTAGE มีค่า เท่ากับ 0) และซึ่งจากการคำนวณ ในกรณีนี้ในบางครั้งผลของสมการก็ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าลบสำหรับความต้านทานอนุกรม เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ 4.1 ผลที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยปรากฏการณ์ที่ยู่ยากทั้งหมดซึ่งเกิดขึ้นจาก โปรดอนทำงานร่วมกับเซมิคอนดักเตอร์ แทนที่ปัญหาโมเดลที่เพียงพอสำหรับการออกแบบระบบทั้งยังเพียงพอในการขยายค่าประมาณการของตัวแปรของอุณหภูมิที่สังเกต fourth equation มาจากการพิจารณาอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิบน Module ในลักษณะ V-I curve

จากรูป 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิบน module ในลักษณะของ I-V ที่ระดับปริมาณแสงคงที่ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิด VOLTAGE OPEN CIRCUIT ที่ลดลงและเพิ่มกระแส SHORT CIRCUIT อีกเล็กน้อยเพื่อว่า module สามารถรับซึ่งผลกระทบได้ มันจำเป็นที่ต้องรู้โมเดลของ พารา มิเตอร์ตัว I_0, I_L, a ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิความต้านทานอนุกรม (R_s) ได้ถูกระบุค่าให้เป็นอิสระจาก อุณหภูมิในโมเดลนี้สมการต่อไปนี้จะแสดงค่าปริมาณการที่ถูกต้องสำหรับ PHOTOVOLTAIC หลายๆ โมดูล

$$a/a_{ref} = T_c/T_{c,ref} \quad \text{--- สมการ(4.6)}$$

$$I_L = (G_T/G_{T,ref})[I_{L,ref} + \mu_{Lsc}(T_c - T_{c,ref})] \quad \text{--- สมการ(4.7)}$$

$$I_0/I_{0,ref} = (T_c/T_{c,ref})^3 \exp[EN_s/a_{ref}(1 - T_{c,ref}/T_c)] \quad \text{--- สมการ(4.8)}$$

ซึ่ง E เป็นค่าพลังงานของ MATERIAL BANDGAP 1.12 eV สำหรับซิลิกอนและ 1.35 eV สำหรับแกเรียมอาร์เซไน ค่า N_s เป็นจำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมใน module คูณกับจำนวน module ที่ต่อเป็นอนุกรมซึ่งปริมาณต่างๆ เหล่านี้จะถูกระบุไว้ในรูปของค่าอ้างอิง (REFERENCE = REF) ซึ่ง จะทำการวัดที่สภาวะ REF โดยสัมประสิทธิ์ของกระแส SHORT CIRCUIT จะถูกหาจากการวัดที่ สภาวะแสงอ้างอิงจากสมการดังนี้

$$\mu_{Lsc} = dI_{sc}/dT = \{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)\}/(T_2 - T_1) \quad \text{--- สมการ(4.9)}$$

ที่ T_2 และ T_1 ถูกวัด ณ สภาวะอุณหภูมิอ้างอิงและคล้ายๆกัน สัมประสิทธิ์ของแรงดัน OPEN CIRCUIT ก็ถูกหาจากการวัด

$$\mu_{V_{oc}} = dV_{oc}/dT = \{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)\}/(T_1 - T_2) \quad \text{--- 4.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นตอนนี้จึงเป็นไปได้แล้วที่สามารถจะระบุสมการของโมเดลที่ 4 ได้ถ้าเรารู้
 สัมประสิทธิ์ กระแส SHORT CIRCUIT และสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิแรงดัน OPEN CIRCUIT
 นั้นแสดงว่าสมการอิสระที่เพิ่มเข้ามาจะถูกพบจากการทดลองหาค่าของ $\mu_{V_{OC}}$ ซึ่งค่านี้ถูกหามาจาก
 การวิเคราะห์ของ dV_{OC}/dT ดังนั้น V_{OC} ที่ถูกอนุพันธ์แล้วในสมการ 4.4 ซึ่งอยู่ในรูปของค่า T จะถูก
 ใช้ในสมการ 4.6 และ 4.8 และใช้ในการหาของ $\mu_{I_{SC}}$ ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$a_{ref} = (\mu_{V_{OC}} T_{C,ref} - V_{OC,ref} + \epsilon N_s) / (\mu_{I_{SC}} T_{C,ref} / I_{L,ref} - 3) \quad \text{---สมการ(4.11)}$$

ถ้าค่า a_{REF} ที่หาได้จากสมการ 4.11 มากกว่า 0 แต่น้อยกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากสมการ 4.5 (ตัว
 อย่างเช่น ความต้านทานอนุกรมมีค่า เท่ากับ 0) ดังนั้นรูปแบบของ CELL MODULE ARRAY I-V
 จะสมบูรณ์ซึ่งค่าของ V_{OC} , I_{SC} , I_{MP} , V_{MP} , $\mu_{I_{SC}}$ และ $\mu_{V_{OC}}$ ซึ่งถูกวัด ณ สภาวะอ้างอิง จากสมการ 4.3-
 4.5, 4.11 ถูกใช้เพื่อในการหาค่า I_L , I_0 , R_s a ที่สภาวะอ้างอิง สมการ 4.6- 4.8 ถูกใช้เพื่อหาค่า I_0 , I_a a
 ที่อุณหภูมิเซลล์ใดๆ (CELL TEMPERATURE) ซึ่งขบวนการนี้จะสามารถหาค่า I_L ที่ REF จากสม
 การ 4.3 และหาค่า a_{REF} จากสมการ 23.2.11 หาค่า $I_{O,REF}$ จากสมการ 4.4 และหาค่า $R_{S,REF}$ จากสมการ
 4.5 และสามารถหา a , I_L , I_0 ที่อุณหภูมิเซลล์ใดๆ โดยใช้สมการ 4.6-4.8 ดังนั้นคุณสมบัติของค่า
 กระแสแรงดันและกำลังไฟจะสามารถหาได้จากสมการ 4.1, 4.2 ซึ่งค่าความต้านทาน shunt ถูก
 ตั้งค่าให้เท่ากับ INFINITY ถ้าค่าของ a_{REF} ที่หาจากสมการ 4.1 เป็นค่าติดลบหรือมากกว่าค่า
 MAXIMUM ที่ได้รับจากสมการ 4.5 แล้ว ทางเลือกที่จะใช้ค่า (ค่าซึ่งเพียงพอกับการคาดเดาคณ
 สมบัติเซลล์ที่สังเกต) หรือเพื่อค้นหาโมเดล ได้ถูกแสดงดังนี้มีความเป็นไปได้บางอย่างหนึ่งที่จะเปลี่ยน
 ค่าเฉลี่ยของ N_s ในสมการ 4.11 และให้มันปรากฏอยู่ในพารามิเตอร์ของโมเดลตัวอื่นๆ ดังนั้น
 สภาวะอื่นๆก็มีความจำเป็นเช่นกันค่าของอุณหภูมิของประสิทธิภาพ ณ จุด MAXIMUM POWER
 ของ module เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีความสำคัญประมาณคุณสมบัติลักษณะของระบบซึ่งประ
 สิทธิภาพ ณ จุด MAXIMUM POWER ของ module เป็นดังต่อไปนี้

$$\eta_{mp} = I_{mp} V_{mp} / A_c G_T \quad \text{---สมการ(4.12)}$$

ค่าของอุณหภูมิของประสิทธิภาพนี้อยู่ในค่าเทอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ณ จุด
 EFFICIENCY MAXIMUM POWER โดย μ_{PMP}

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu_{PMP} (T_C - T_{ref}) \quad \text{---สมการ(4.13)}$$

ค่าของ μ_{PMP} ถูกระบุจากการแก้ปัญหาโมเดลเซลล์ของประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดที่เกิน
 ช่วงอุณหภูมิรูป 4.9 จะแสดงผลของการคำนวณสำหรับ module ที่ใช้เป็นตัวอย่าง สัมประสิทธิ์ที่จุด
 MAXIMUM POWER จะเห็นเป็น FUNCTION เส้นตรงของอุณหภูมิและมันยังอิสระจากปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงใดๆแต่ยังดีที่ไม่จำเป็นต้องคำนวณอีกครั้งว่ารูป4.9ที่ได้เพื่อประมาณค่า μ_{PMF} สำหรับสมการ 4.12

$$\mu_{P,mp} = d\eta_{mp}/dT = (I_{mp}dV_{mp}/dT + V_{mp}dI_{mp}/dT)/A_C G_T \quad \text{---สมการ(4.14)}$$

สำหรับmoduleจำนวนมากๆ μ_{ISC} มีค่าเล็กมากซึ่งผลของมันนี้ส่งผลกระทบโดยตรงกับค่า dV_{mp}/dT ซึ่งประมาณค่าคร่าวๆได้เท่ากับ 0 และค่า dV_{mp}/dT ประมาณค่าอย่างคร่าวๆได้เท่ากับ dV_{oc}/dT ซึ่งการประมาณค่านี้ ล้มประสิทธิของอุณหภูมิที่จุด MAXIMUM POWER ที่ที่ประสิทธิภาพ MAXIMUM POWER ได้ประมาณดังนี้

$$\mu_{P,mp} = I_{mp}/A_C G_T (dV_{oc}/dT) = \eta_{mp,ref} \mu_{Voc}/V_{mp} \quad \text{--- สมการ(4.15)}$$

4.2.1อุณหภูมิ ARRAY ของmodule

การหาค่าของรูปแบบของโมเดลถูกใช้ในการคาดคะเนอุณหภูมิของARRAY จากปริมาณแสงอุณหภูมิโดยรอบและความเร็วลม

$$T_c = T_a + \theta_g (1 + \theta_{Ta} T_a) (1 - \theta_{vm} V_m) G \quad \text{---สมการ(4.16)}$$

สมการ 4.16 ซึ่ง T_c เป็นอุณหภูมิ ARRAY และ T_a เป็นอุณหภูมิโดยรอบ V_m เป็น ความเร็วลม G เป็นปริมาณแสง $\theta_g = 0.0138$, $\theta_{Ta} = 0.031$ และ $\theta_{vw} = 0.042$ ซึ่งคงที่ ซึ่งหาได้จาก ข้อมูลจากการทดลอง

4.2.2การ Balance พลังงานของระบบ

โดยการออกแบบระบบนั้นอยู่บนรากฐานของความสมดุลระหว่างพลังงานที่ผลิตได้จากแสงแต่ละปีกับพลังงานที่ load ต้องการ ข้อมูลในกระบวนการ การหาขนาดของ Plant

- 1. พิจารณาจากข้อมูลของปริมาณแสงของ size พื้นที่นั้นและมุมเอียงของแผงเข้าด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณแสงที่ตกในแต่ละวันในทุกเดือนของปี
- 2. การพิจารณาความต้องการของ load demand load ที่ถูกระบุหรือชนิดของ load ที่เหมือนกันในระบบจะถูกใช้ในการพิจารณาความต้องการของ load ในแต่ละวัน

4.2.3การหาจำนวน Module ที่ต่อกันแบบอนุกรม

V_{DC} (แรงดันกระแสตรง) ที่ปรากฏใน Bus bar ของระบบที่ถูกระบุดังนั้นจำนวน module(N_s) ซึ่งถูกต่อกันแบบอนุกรมในสายจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ V แรงดันกระแสตรงที่ดำเนินการ เราสามารถเขียนได้ว่า

$$N_s = V_{DC}/V_m \quad \text{-----สมการ(4.17)}$$

ซึ่ง V_m เป็น voltage ที่ผลิตขึ้นมาของ module หนึ่ง module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 จำนวนของแผงที่จะถูกต่อกันแบบขนาน

โดยจำนวนนี้จะเกี่ยวข้องกับกระแสที่ต้องการของ load โดยกระแสของ load นี้สามารถคำนวณได้จาก

$$I_L(A) = E_L / (24V_{DC}) \quad \text{---สมการ(4.18)}$$

ซึ่ง $E_L (W_h/day)$ ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับ load

ตอนนี้เราสามารถหาค่ากระแส nominal (I_p) ซึ่งได้จากการผลิตของแผงที่ทำงาน ณ จุด maximum power และปริมาณแสงที่มาตรฐาน A.M 1.5 ปริมาณแสงที่ 1 kW/m^2 ความสมดุลของพลังงานของแต่ละวันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_L(W_h/day) = PSH * I_p * V_{DC} \quad \text{--- สมการ(4.19)}$$

ซึ่งเรานำปริมาณแสงที่หาได้แล้วบนแผงให้อยู่ในรูปของ peak solar hours ซึ่งเท่ากับจำนวนของชั่วโมงที่ปริมาณแสงมาตรฐาน (1 kW/m^2) ดังนั้นจึงชัดเจนว่าค่า PSH เป็นค่าที่เท่ากับปริมาณแสงในรูปของ $\text{kWh/m}^2 \text{ day}$ ใช้สมการที่ 4.18 และ 4.19

$$I_p = (24I_L)/PSH \quad \text{---สมการ(4.20)}$$

จากสมการที่ 4.20 สามารถแปลงง่าย ๆ คือ กระแสเฉลี่ยของ load คูณกับจำนวนชั่วโมงในหนึ่งวันต้องเท่ากับกระแส nominal (peak) ของแผง Photo voltaic คูณกับจำนวนชั่วโมงของ peak solar hours ดังนั้นจำนวน module ที่ต่อแบบขนานจะสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_p = (SF)I_p/I_m \quad \text{--- สมการ(4.21)}$$

ซึ่ง I_m เป็นค่ากระแส nominal ซึ่งผลิตได้จากโมดูลของ photovoltaic แต่ละตัวเมื่อแสงตกกระทบภายใต้สภาวะมาตรฐานและ SF เป็นค่า sizing factor ซึ่งค่าตัวนี้เป็นค่าขนาดของการ oversize ของปริมาณกระแสที่จะผลิตได้สำหรับ ARRAY ซึ่งค่า sizing factor ตัวนี้จะอยู่ในช่วง 1-1.6

4.2.5 การหาขนาดของ Battery ใน solar plant

FUNCTION ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบ PHOTOVOLTAIC จะจ่ายพลังงานเมื่อ LOAD ของระบบเกินกว่าพลังงานที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับการออกแบบแบตเตอรี่ของ PHOTOVOLTAIC นี้เพื่อให้เพียงพอ ต้องมี FACTOR ต่างๆ ในการพิจารณาหลายตัว ต้องพิจารณาถึงความต้องการของ CAPACITY และจำนวนของเซลล์ที่จะใช้ในแบตเตอรี่โดยจะมี FACTOR ต่างๆ ที่ใช้พิจารณาดังนี้

1. การพิจารณา BATTERY ลำรอง คือช่วงเวลาที่ LOAD ควรจะถูกจ่ายพลังงานโดยแบตเตอรี่ที่ติดตั้งโดยการออกแบบที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การพิจารณาลักษณะ LOAD โดยปริมาณกระแส ณ ช่วงเวลาใดช่วงเวลานั้นจะถูกจ่าย โดยแบตเตอรี่กระแส ณ จุด PEAK และ VOLTAGE OPERATION จะถูกวิเคราะห์โดย ลักษณะของ LOAD ของระบบการพิจารณาแบตเตอรี่ CAPACITY และ FUNCTIONAL-HOUR- RATE แบตเตอรี่ CAPACITY และอัตราการ DISCHARGE ของ FUNCTIONAL-HOUR จะถูกพิจารณาโดยลักษณะจำเพาะของ LOAD และจำนวนวันที่แบตเตอรี่สำรอง และลักษณะของแบตเตอรี่
3. การพิจารณาจำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แรงดันของระบบจะเป็นตัวจำกัดการ พิจารณาจำนวนของเซลล์ที่จะต่อแบบอนุกรม
4. การพิจารณาเซลล์ CAPACITY และขนาดของแบตเตอรี่ การพิจารณา CAPACITY ของ แบตเตอรี่ทั้งระบบและจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม จะถูกพิจารณาโดยการการ เลือกขั้นสุดท้ายนั้นจะมีการเลือก ลักษณะจำเพาะของเซลล์และขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้
5. BATTERY SIZING WORKSHEET WORKSHEET นี้จะเป็นตารางในการหาและ วิเคราะห์ขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้ในระบบ PHOTOVOLTAIC
6. ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่ การปฏิบัติงานของระบบ อายุการใช้งาน การดูแลรักษา และราคา จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้ชนิดของแบตเตอรี่ของระบบ PHOTOVOLTAIC

4.2.6 การพิจารณาแบตเตอรี่สำรอง

ระบบ PHOTOVOLTAIC อาจต้องการการ RESERVE ของแบตเตอรี่ไว้ เนื่องจากเพื่อรักษาเสถียรภาพของการให้ดำเนินงานของโรงจักรนั้นและเพื่อจัดหากระแสไฟฟ้าเมื่อเกิด เหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น เกิดสภาวะอากาศแปรปรวนหรือเกิดความผิดพลาดในระบบของโรงจักร นั้นเองทำให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้น จำนวนวันที่จะใช้ในการสำรองแบตเตอรี่จะถูก ระบุเพื่อความต้องการของการออกแบบระบบและอยู่ในรากฐานของการพิจารณาปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

- 1.1 SYSTEM AVAILABILITY โดย SYSTEM AVAILABILITY เป็นเปอร์เซ็นต์ ของเวลาที่ระบบ PHOTOVOLTAIC จะจ่ายให้เพียงพอกับระบบของ LOAD ที่ ต้องการ
- 1.2 ปริมาณแสง โดยค่าปริมาณแสงตัวนี้เป็นตัวแปรของวันแต่ละวันและของฤดู การที่มีผลกระทบต่อจำนวนวันที่ต้อง RESERVE ไว้ในแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3 ความต้องการของเสถียรภาพของระบบ ระบบแต่ละระบบมีความต้องการความเสถียรภาพต่างกัน ดังนั้นจึงจำนวนวันมากขึ้นในการ RESERVE ก็จะต้องเพิ่มเสถียรภาพของระบบมากขึ้น
- 1.4 การจัดหากำลังไฟสำรอง(BACK UP POWER) ถ้าระบบ PHOTOVOLTAIC ประกอบไปด้วยการจัดหาพลังงานสำรองไว้แล้วความถี่ที่ต้องการและช่วงเวลาในการดำเนินการของแหล่งกำลังสำรองนี้ต้องการในการถูกพิจารณา
- 1.5 ราคาของระบบ ราคาของระบบจะเกี่ยวข้องกับแผงและขนาดของแบตเตอรี่ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผงและขนาดแบตเตอรี่ซึ่งควรจะถูกลำดับราคาหาจากระบบราคา TRADE OFF

4.2.7 การพิจารณาลักษณะ LOAD

การพิจารณาโดยทั่วไป LOAD ของระบบสามารถระบุได้ในรูปแบบของตารางและแบบกราฟฟิค โดยทั้ง 2 ฟอรั่มนี้จะเริ่มต้นด้วยตารางของ LOAD แต่ละอันและช่วงเวลาที่ใช้ของ LOAD แต่ละอัน โดยรูปแบบของตารางจะธรรมดาว่ามาก โดย LOAD ทั้งหมดจะถูกคาดการณ์ระหว่างช่วง 24 ชั่วโมงจะถูกระบุอยู่ในตารางและรวมกับระยะเวลาที่ถูกทำนายไว้ (DURATION) โดย LOAD PROFILE DIAGRAM นี้เป็นส่วนช่วยอย่างมากในการตัดสินใจว่าพื้นที่เหล่านั้น(ซึ่งบ่งบอกคุณสมบัติของแบตเตอรี่) โดยพื้นที่เหล่านั้นจะเป็นส่วนช่วยในการชี้ว่า LOAD เพียงพอกับความต้องการหรือไม่ ซึ่งการทำ LOAD PROFILE DIAGRAM ขึ้นไปดังต่อไปนี้ ให้เขียนตารางลักษณะจำเพาะของ LOAD แต่ละตัวทุกๆตัวซึ่งต้องประกอบไปด้วยเวลาในการเริ่มต้นและเวลาในการหยุด

1. ผลรวมของ LOAD ที่ร่วมกัน (COINCIDENT) สำหรับช่วงเวลาหนึ่งๆ
 2. ให้ POT ผลรวมของ LOAD ทั้งหมดตามเวลาในแต่ละวันโดยที่ CURVE ผลรวมจะเป็น LOAD PROFILE DIAGRAM
- ข้อมูล LOAD (LOAD DATA) โดยข้อมูลนี้ควรจะถูกรวบรวมใน LOAD แต่ละตัวดังต่อไปนี้

MOMENT CON CURRENT LOAD (ที่ใช้เวลาในการคงอยู่ 1 นาทีหรือน้อยกว่า) เป็น LOAD MOMENTARY ที่ถูก DESIGN ไว้และควรจะพิจารณากำหนดเป็นพิเศษ โดย AMPERE-HOUR ที่ต้องการของ LOAD ชนิดนี้จะน้อยมากแต่จะมีผลต่อ BATTERY TERMINAL VOLTAGE ควรจะพิจารณาเป็นพิเศษโดย MOMENTARY LOAD สามารถเกิดหลายๆครั้งใน 1 วันได้ระหว่างช่วงทำงานของมัน เช่น กระแสของการ START มอเตอร์หรือกระแส SURGE high inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RUNNING CURRENT เป็นกระแสที่ต้องการสำหรับ LOAD หลังจากกระแสเริ่มต้น สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการพลังงานกำลังงานที่คงที่ซึ่งถ้ากระแสที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นถ้า VOLTAGE ของแบตเตอรี่ตกลงในกรณีนี้กระแส RUNNING สามารถคำนวณได้ใกล้เคียงกับกระแสที่ต้องการ ประมาณ 90% ของ LOAD SYSTEM VOLTAGE

หมายเหตุ1 สำหรับ PROGRAM ในการออกแบบ PROGRAM นี้เนื่องจากเป็น PROGRAM ในการออกแบบ PHOTO VOLTAIC PLANT ดังนั้น กระแส MOMENTARY CURRENT และ RUNNING CURRENT ยังอยู่ภายใน LOAD ที่ต้องการ ในรูปของ WATT ที่ต้องการ แต่ค่ากระแสเหล่านี้ถ้าเป็นลง PHOTO VOLTAIC PLANT ขนาดเล็กๆ (1 กิโลวัตต์-5 กิโลวัตต์) ควรจะพิจารณาค่ากระแสเหล่านี้ด้วยแต่สำหรับโรงจักร ใหญ่ๆค่าเหล่านี้ได้รวมอยู่ในวัดที่อยู่แล้ว

หมายเหตุ2 สำหรับ LOAD ที่คงที่มันต้องการพิจารณาทั้ง MOMENTARY และ RUNNING CURRENT เพื่อใช้ในการประกอบของ LOAD ตัวอย่างเช่น ระหว่างช่วงเวลา การทำงาน (DUTY CYCLE) ถ้ามอเตอร์ START ระหว่างช่วงเวลาในการทำงานนั้น ต้องการพิจารณาทั้งกระแส MOMENTARY และกระแส RUNNING แต่ถ้าช่วงเวลาในการทำงานของ LOAD นั้นเริ่มต้นระหว่างช่วงการเริ่มต้นของการทำงานจะไม่จำเป็นต้อง พิจารณากระแส MOMENTARY ที่ตอนเริ่มต้นของวันของแบตเตอรี่ที่ RESERVE ไว้

4.2.8 LOAD DURATION

LOAD DURATION เป็นเวลา(อยู่ในรูปของชั่วโมง)ซึ่งใช้ในการประกอบการทำงาน ของ LOAD แต่ละตัวสำหรับระบบ PHOTOVOLTAIC มันธรรมดามากถ้า LOAD DURATION จะ อยู่ในรูปของ ช่วงเวลาในการทำงานของแต่ละวัน(DAILY CYCLE)ซึ่งจะซ้ำกันตลอดวันของ แบตเตอรี่ที่ RESERVE ไว้ ถ้าช่วงเวลาเริ่มต้นของ LOAD เราสามารถทราบแค่ ช่วงเวลาในการหยุด ของ LOAD นั้นไม่ถูกระบุไว้ให้แน่นอนมันสามารถกล่าวได้ว่า LOAD จะยังคงต่อเนื่องแม้ส่วนที่ เหลือของวันของแบตเตอรี่ที่ถูก RESERVE ไว้ต่อมา LOAD COINCIDENT โดยกระแส LOAD แต่ละ ตัว(MOMENTARY หรือ RUNNING)ควรจะจัดลำดับและดูว่า LOAD แต่ละตัวนั้นในตารางเกิด ขึ้นพร้อมกันหรือไม่ ซึ่งข้อมูลนี้จะใช้ในการเลือกแบตเตอรี่และในการตรวจสอบ DISCHARGE RATE

แรงดันของ LOAD สูงสุดและต่ำสุด โดยแรงดันสูงสุดและต่ำสุดนี้ของ LOAD แต่ละตัวจะ ถูกพิจารณาในตาราง แรงดันตกคร่อม ในสายเคเบิลและใน DIODE แต่ละตัวระหว่างแบตเตอรี่ และ LOAD จะไม่ถูกใช้ในการพิจารณาจะถูกปรับให้อยู่ในค่าของแรงดันสูงสุดของ LOAD เพราะว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสและผลของแรงดันตกค่อมนี้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ BATTERY TERMINAL VOLTAGE อย่างไรก็ดีตาม VOLTAGE ตกค่อมนี้จะถูกพิจารณาสำหรับอุปกรณ์ LOADแต่ละตัวในกรณีที่เ็นระบบ PHOTOVOLTAIC เล็กๆ

4.2.9การวิเคราะห์ข้อมูล

AMPERE HOUR เราสามารถหาความต้องการของLOAD แต่ละวันโดยคำนวณจากผลคูณของกระแสของLOADแต่ละตัวกับช่วงเวลาการทำงานของมันในแต่ละวันและผลรวมทั้งหมดนี้ถ้าเป็น LOAD แบบ MOMENTARY ให้คำนวณโดยผลคูณของช่วงเวลาการทำงานคูณกับกระแส MOMENTARY ถ้ากรณีที่ช่วงเวลาในการทำงานของ MOMENTARY LOAD ไม่สามารถรู้ได้ให้สมมุติว่าเวลาที่ใช้เป็น 1 นาทีในการคำนวณ CURRENT

CURRENT กระแส MOMENTARY และ RUNNINGสูงสุดจะถูกพิจารณาโดยใช้การคำนวณจากกระแสสูงสุดของแบตเตอรี่ในการ DISCHARGE โดยระบบของ LOAD สามารถดำเนินการได้โดยการประกอบเข้าด้วยกันหลายๆส่วน โดยกระแสสูงสุด(MOMENTARY หรือ RUNNING)เป็นผลรวมที่ใหญ่ที่สุดของ LOAD แต่ละตัวถ้าค่ากระแสของแบตเตอรี่ในการ DISCHARGE สูงสุดมากกว่า 20h DISCHARGE RATE(C/20)ต้องใช้วิธีของ IEEE STANDARD 485-1983 ในการพิจารณานาของแบตเตอรี่

4.2.10BATTERY CAPACITYและ FUNCTIONAL- HOUR RATE

การพิจารณา FUNCTIONAL- HOUR RATE ความต้องการของ BATTERY CAPACITY สำหรับ PHOTOVOLTAIC สามารถพิจารณาได้จาก จำนวนวันของแบตเตอรี่ที่ถูก RESERVE ไว้และจากลักษณะของ LOAD แต่ละ LOAD, ลักษณะของแบตเตอรี่และการติดตั้ง โดยอัตรา FUNCTIONAL- HOUR สำหรับอุปกรณ์ต่างๆจะถูกพิจารณาจากค่า CAPACITYและการคำนวณ LOAD

UNADJUSTED CAPACITYอยู่ในรูปของ AMPERE – HOUR ซึ่งคำนวณจากผลคูณของวันที่ถูก RESERVE ไว้ในแบตเตอรี่กับค่าLOAD ในแต่ละวันเฉลี่ยอยู่ในรูปของ AMPERE – HOUR แต่ละวันซึ่งค่า CAPACITY ตัวนี้จะถูกปรับใน CAPACITY ADJUSTMENT สำหรับคุณสมบัติลักษณะของแบตเตอรี่และสภาวะการดำเนินการ

DISCHARGE ADJUSTMENT CAPACITYควรจะถูกปรับให้ใช้งานได้อย่างเพียงพอสำหรับวงจรชีวิตของแบตเตอรี่(CYCLE LIFE)โดยผู้ผลิตแบตเตอรี่ในอัตราต่างๆที่ผลิตสำหรับแบตเตอรี่ LEAD-ACIDค่า MAXIMUM DEPTH OF DISCHARGE (MDOD) MAXIMUM DAILY DEPTH OF DISCHARGE (MDDOD)และEND OF LIFE(EOL)CAPACITY และ CAPACITY ของแบตเตอรี่ควรจะถูกปรับให้เป็นคัง FACTOR ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1. CAPACITY ที่ถูกปรับสำหรับ MDOD จะถูกคำนวณจาก UNADJUSTED CAPACITY หารกับ MDOD
- 2. CAPACITY ที่ถูกปรับสำหรับ MDDOD จะถูกคำนวณจากค่า MAXIMUM DAILY AMPERE-HOUR หารกับ MDDOD
- 3. CAPACITY ที่ถูกปรับสำหรับวงจรชีวิตอายุการใช้งานจะถูกคำนวณจาก UNADJUSTED CAPACITY หารด้วย END OF LIFE CAPACITYและคำนวณให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของ RATED CAPACITY โดยปกติแล้วประมาณ 80% โดยค่าที่ใหญ่ที่สุดของ CAPACITY ทั้ง 3 ตัวนี้จะถูกกำหนดเป็นค่า DEPTH OF DISCHARGE และ END OF LIFE ADJUSTMENT TEMPERATURE ADJUSTMENT ค่า CAPACITY ที่ถูกจัดหาสำหรับแบตเตอรี่จะถูกผลกระทบจากอุณหภูมิในการดำเนินการโดยอัตรามาตรฐานของ CAPACITY ของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 25 °C(77°F)ค่า CAPACITY จะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิมากกว่า 25องศาและจะลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาโดยค่า CAPACITY ตัวนี้จะไม่ถูกปรับสำหรับการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงแต่จะถูกปรับสำหรับการดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยผู้ผลิตของแบตเตอรี่จะต้องระบุค่า TEMPERATURECORRECTION FACTORโดยADJUSTED CAPACITYที่ถูกคำนวณไว้แล้วควร จะปรับให้เข้ากับ FACTOR ซึ่งมีผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมินี้ด้วย

Electrolyte Temperature			Electrolyte Temperature		
Cell Size		Correction Factor	Cell Size		Correction Factor
(°F)	(°C)		(°F)	(°C)	
25	-3.9	1.52	80	26.7	.98
30	-1.1	1.43	85	29.4	.96
35	1.7	1.35	90	32.2	.94
40	4.4	1.30	95	35.0	.93
45	7.2	1.25	100	37.8	.91
50	10.0	1.19	105	40.6	.89
55	12.8	1.15	110	43.3	.88
60	15.6	1.11	115	46.1	.87
65	18.3	1.08	120	48.9	.86
70	21.1	1.04	125	51.7	.85
77	25.0	1.00			

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Correction factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN MARGIN ADJUSTMENT โดยการ DESIGN ทั่วไปควรจะปรับค่า CAPACITY ให้สูงกว่าปกติ(ค่าที่ได้จากการคำนวณ)เพื่อไว้สำหรับสถานะที่ไม่แน่นอน หรือสถานะที่น้อยกว่าจุดเหมาะสมหรือการเติบโตของ LOAD ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า DESIGN MARGIN นี้จะบวกไปประมาณ 10-25% สำหรับ CAPACITY

FUNCTIONAL-HOUR RATE เพื่อให้ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมอัตรา

DISCHARGE และ AMPERE – HOUR CAPACITY ควรจะถูกพิจารณาด้วยกันใน LOAD ที่ต่อเนื่อง แบตเตอรี่ควรจะถูกลำดับให้ CAPACITY เหมาะสมในการดำเนินการ อัตรา DISCHARGE ที่คงที่ตลอดจำนวนวันของแบตเตอรี่ที่ถูก RESERVE อย่างไรก็ดีตามสำหรับ LOAD ที่ไม่คงที่อัตรา DISCHARGE จะแปรเปลี่ยนไปซึ่งจะประกอบไปด้วยอัตรา DISCHARGE ที่สูงเป็นช่วงเวลาตลอดจำนวนวันที่ถูก RESERVE ไว้ โดยการใช้อัตราเฉลี่ยในการหาขนาดของแบตเตอรี่ อาจจะเพียงพอสำหรับการจัดหากระแสสูงๆภายใต้อัตรา VOLTAGE ต่างๆในแบตเตอรี่ DISCHARGE โดยอัตรา FUNCTIONAL HOUR ประมาณค่าสำหรับอัตรา DISCHARGE อันเดียว ซึ่งค่าตัวนี้ต้องเท่ากับอัตราของการ DISCHARGE หลายๆอัตราสำหรับ DUTY CYCLE เฉพาะ โดยอัตรา FUNCTIONAL HOUR ควรจะมากกว่าค่าช่วงเวลาของแบตเตอรี่ที่ RESERVE ไว้ โดยอัตรา FUNCTIONAL HOUR สามารถคำนวณได้จาก

1. การเปรียบเทียบผลรวมของกระแส RUNNING ที่ใช้ร่วมกันกับกระแสสูงสุดของกระแส RUNNING ที่ไม่ถูกใช้ร่วมกันและเลือกค่าที่ใหญ่กว่า
2. ค่า ADJUSTED CAPACITY หาค่ากับค่า MAXIMUM RUNNING CURRENT ที่ถูกเลือกไว้ตัวอย่างเช่น
ตัวอย่างที่ 1 ค่า CAPACITY ADJUSTED BATTERY CAPACITY ของระบบ 5 วันของแบตเตอรี่ RESERVE = 150 Ah กับค่ากระแส MAXIMUM ที่ 25 AMPERE อัตรา FUNCTIONAL – HOUR RATE จะเท่ากับ 150 หารกับ 25 หรือ 6 ชั่วโมง ซึ่ง 6 ชั่วโมงนี้ไม่เพียงพอสำหรับค่าอัตรา FUNCTIONAL – HOUR
ตัวอย่างที่ 2 ADJUSTED BATTERY CAPACITY ของระบบ 5 วัน BATTERY RESERVE เท่ากับ 150 Ah ประกอบไปด้วยกระแสที่ต่อเนื่อง 1 AMPERE ค่าอัตรา FUNCTIONAL HOUR เท่ากับ 150 หาร 1 หรือเท่ากับ 150 ชั่วโมงซึ่งเกินค่าของแบตเตอรี่ที่ RESERVE ไว้ (5 x 24 ชั่วโมง เท่ากับ 120 ชั่วโมง)

4.2.11 การหาจำนวนแบตเตอรี่ที่จะต่ออนุกรมกัน

ตามปกติแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วยจำนวนเซลล์หลายๆเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันโดยค่าแรงดันสูงสุดของระบบจะถูกหาจากจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORMAL SYSTEM VOLTAGE สำหรับ LEAD ACID CELL จะส่งจ่ายกำลังประมาณ 2 โวลต์ ดังนั้นการหาจำนวนของเซลล์อาจจะคำนวณง่ายๆได้จาก NORMAL SYSTEM VOLTAGE หารด้วย 2 ตัวอย่างเช่น ในระบบ 12 โวลต์ ต้องใช้เซลล์ถึง 6 ตัวต่ออนุกรมกัน สำหรับระบบ 24 โวลต์ต้องใช้เซลล์ถึง 12 ตัว ต่ออนุกรมกันและอื่นๆแต่มั่นใจว่าจะเป็นไปได้ว่าถ้าข้อจำกัดของ VOLTAGE ที่สามารถผ่านของอุปกรณ์ต่างๆจะเป็นข้อจำกัดในการคิดหาค่า NORMAL SYSTEM VOLTAGE

VOLTAGE WINDOW โดยอุปกรณ์ในระบบต่างๆตามปกติจะใช้งานได้ในแรงดันที่ถูกจำกัดไว้สำหรับอุปกรณ์นั้นๆโดยอุปกรณ์นั้นๆจะดำเนินการที่ RATED CAPACITY และ ประสิทธิภาพ ถ้าอุปกรณ์ได้รับ VOLTAGE ที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่จำกัดของอุปกรณ์นั้นๆจะทำให้เกิดการเสียหายหรือการดำเนินการที่ผิดปกติด้วย ดังนั้นค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่ถูกจำกัดไว้สำหรับระบบจะถูกเรียกว่า VOLTAGE WINDOW ซึ่งขนาดของ WINDOW นี้จะมีผลโดยตรงกับจำนวนและ CAPACITY ของแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกไว้ถ้า WINDOW นี้แคบค่าของ CAPACITY นี้ก็จะกว้างขึ้นถ้าค่า WINDOW นี้กว้างค่าของ CAPACITY ก็จะเล็กลงจากตารางค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของแบตเตอรี่ในหัวข้อของ แรงดัน LOAD ค่าต่ำสุดของ MAXIMUM VOLTAGE และค่าสูงสุดของ MINIMUM VOLTAGE โดยค่า VOLTAGE WINDOW นี้จะถูกปรับให้ใช้สำหรับอุปกรณ์ LOAD ทุกตัวในระบบเพื่อดำเนินการได้อย่างสมบูรณ์ถ้าใช้ CHARGE CONTROLLER ค่า SET POINT ควรจะอยู่ภายใน VOLTAGE WINDOW นี้

SERIES จำนวนเซลล์ที่จะต่ออนุกรม อยู่ในรูปของ FUNCTION VOLTAGE WINDOW ของ LOAD และข้อแนะนำการ CHARGE ของผู้ผลิตสำหรับแบตเตอรี่ที่เลือกนั้นโดยจำนวนที่เหมาะสมของเซลล์ถูกหาจาก ผลของการคำนวณข้างทั้ง 2 กรณี

จำนวนเซลล์ที่มากที่สุดที่รับได้ ส่วนที่สำคัญที่สุดในการคำนวณหาจำนวนสูงสุดของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบอนุกรม ต้องให้แน่ใจว่าจำนวนนั้นเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการ VOLTAGE RECHARGE โดยการคำนวณหาค่ามากที่สุดของจำนวนเซลล์ที่อนุญาตของระบบมาจาก

$$V_{MAX}/\text{cell recharge voltage} = \text{Maximum number of cells(round off)} \text{ ---สมการ(4.22)}$$

ตัวอย่าง เช่น แบตเตอรี่ขนาด 2.4 V/เซลล์เป็นค่าที่แนะนำสำหรับการ RECHARGE ค่าแรงดันสูงสุดที่ระบบอนุญาตยินยอมคือ 58 V_{DC} ดังนั้น 58 V หาร 2.4 V ต่อเซลล์เท่ากับ 24.16 หรือเท่ากับ 24 เซลล์

MINIMUM SYSTEM VOLTAGE VERSUS END OF DISCHARGE VOLTAGE เพื่อให้แน่ใจว่าข้อแนะนำของผู้ผลิตแบตเตอรี่ที่แนะนำค่า END OF DISCHARGE(DOD)VOLTAGE ไม่เกินค่าที่กำหนด จำนวน VOLTAGE ต่อ cell ซึ่งเป็นแรงดันของระบบที่ต่ำสุดที่ยังสามารถไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISCHARGE โดยการคำนวณแรงดันเซลล์ EOD นี้ ไม่ควรต่ำกว่าค่าของผู้ผลิตที่จำกัดไว้ที่ FUNCTION HOUR LOAD ซึ่งคำนวณหาได้จากสูตร

$$V_{\min} / \text{Number of cells in 4.22} = \text{Calculated EOD cell voltage} \text{ ---สมการ(4.23)}$$

ตัวอย่างเช่น สมมติว่าระบบให้ VOLTAGE ค่าสูงสุดได้ที่ 42 V_{DC} ฉะนั้น 42 Vหารด้วย24เซลล์ จะเท่ากับ 1.75 Vต่อ cellถ้าการคำนวณแรงดันเซลล์ EOD นี้ไม่เพียงพอ(ต่ำกว่าค่า EODของผู้ผลิตที่กำหนดที่ FUNCTION RATE HOUR)การปรับที่เหมาะสมทำได้โดยการปรับแรงดันของระบบต่ำสุดใหม่หรือการลดจำนวนแบตเตอรี่แต่ใช้แบตเตอรี่ที่มี CAPACITY มากขึ้น

หมายเหตุ ถ้าผลของการคำนวณในค่าแรงดัน EODนั้นมากกว่าค่าที่ผู้ผลิตเซลล์แนะนำมา ซึ่งเมื่อตอน DISCHARGE ค่าแรงดัน EOD ที่คำนวณได้จะให้ CAPACITY ที่น้อยกว่าถ้ามันถูก DISCHARGE โดยแรงดันเซลล์ EOD ของผู้ผลิตที่แนะนำมา

การพิจารณาMULTI CELL UNIT ถ้าชนิดของเซลล์ที่ถูกเลือกนั้นเหมาะสมสำหรับ UNIT หลายๆ UNITมันก็ต้องการใช้จำนวนเซลล์ที่แตกต่างกันกว่าการคำนวณก่อน ๆ สำหรับการเปลี่ยนจากแรงดันของระบบสูงสุดไปเป็นจำนวน UNIT ของจำนวนmulti-cell units ทำได้โดย สูตร

$$\text{Total number of Multi-cell Units} = V_{\max} / \text{maximum multi-cell recharge voltage}$$

เลขที่เหลือของผลจะถูกปัดลงซึ่งเมื่อคำนวณเสร็จแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกลับไปดูค่า VOLTAGE WINDOWที่คำนวณไว้ว่าเพียงพอกับความต้องการของระบบหรือไม่

OPTIMIZATION การคำนวณที่ผ่านมาจะเป็นการคำนวณจำนวนของเซลล์ที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ต่ออนุกรมซึ่งจำนวนนี้จะทำให้ระบบสามารถปฏิบัติงานได้อย่างสมบูรณ์เราสามารถเป็นไปได้ที่จะลดจำนวนเซลล์ที่จะต่อแบบอนุกรมนี้แต่ยังสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมแต่อย่างไรก็ตามการหาค่า OPTIMIZATION นี้ควรจะมีการเพื่อไว้สำหรับปัญหาซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ภายใต้สถานะที่ไม่เหมาะสม

4.2.12การพิจารณา BATTERY SIZE

การหาขนาดของแบตเตอรี่สามารถพิจารณาได้จากการใช้ผลของ BATTERY CAPACITY และผลของจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมโดยการเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของ LOAD นั้น

การเลือกขนาดของเซลล์ โดยการเลือกขนาดของเซลล์นั้นใช้ข้อมูลของผู้ผลิตที่ให้มาโดยการเลือกเซลล์นั้นควรจะทำให้ความต้องการ CAPACITY เมื่อ DISCHARGE ที่อัตรา FUNCTIONALแล้วHOUR ค่าแรงดันแล้วค่าแรงดัน EOD ยังมากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดัน EODที่คำนวณไว้ซึ่งค่า CAPACITY ที่ต้องการอาจไม่เหมือนกับ CAPACITYที่ผู้ผลิตผลิตขายอยู่ ดังนั้นจึงควรเลือกค่า CAPACITYที่ใหญ่ขึ้น(ที่ขนาดของผู้ผลิตที่มีอยู่) เพื่อให้เหมาะกับcellที่ผู้ผลิตมีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนของ parallel strings โดยปกติแล้วการที่ค่า string ที่มีการต่ออนุกรมของ cell แต่ละ string เดียวจะดีกว่าการที่มีการต่ออนุกรมหลายๆ string แต่ถ้าวัดค่าของ capacity ของ ระบบ ไม่เพียงพอสำหรับการจัดหาเพื่อเพียงพอกับความต้องการดังนั้นจึงควรเพิ่มจำนวน string เป็น 2 หรือมากกว่านั้น ซึ่งการเพิ่มจำนวน string จึงเป็นการเพิ่มค่า capacity และจำนวนของแบตเตอรี่เพราะหนึ่ง string จะเท่ากับ แบตเตอรี่หลายตัวมาต่ออนุกรมกัน ถ้าเพิ่มหลายๆ string เท่ากับการเพิ่มแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันหลายๆสายแต่การต่ออนุกรมกันนั้นควรจะพิจารณาจากค่าของผู้ผลิตที่แนะนำมาด้วยว่าไม่เกินจำนวนการขนานที่ผู้ผลิตระบุไว้ โดยจำนวน string ที่จะต่อแบบขนานนั้นคำนวณได้จากค่า capacity ของระบบหารด้วย ค่า capacity ของ cell แต่ละ cell ที่ถูกเลือกไว้โดยเศษจะถูกปัดขึ้น

Final Number of Cell (จำนวนแบตเตอรี่ทั้งหมดที่จะใช้ครั้งสุดท้าย) จำนวน cell ที่จะใช้ทั้งหมดสามารถคำนวณจากผลคูณของ แบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมคูณกับจำนวน parallel string

Final Battery Capacity (ค่า capacity ของระบบทั้งหมด) โดยค่า capacity ของระบบทั้งหมดสามารถคำนวณได้จาก ค่า capacity ที่ถูกเลือกไว้ในแต่ละตัวคูณกับจำนวน parallel string

Check / Consideration ในการออกแบบระบบ photovoltaic นั้นมีปัจจัยต่างๆที่ควรใช้ในการพิจารณาซึ่งจะมีผลกระทบกับลักษณะคุณสมบัติของ แบตเตอรี่มีดังต่อไปนี้

Overcharging อัตราการ charge ที่สูงเกินไปที่ end of charge , แรงดัน end of charge ที่สูงเกินไป

หรือการที่ไม่มีการจำกัดแรงดัน cut off สูงสุดนั้นที่ end of charge จะเป็นให้เกิด overcharging ซึ่งกระแส end of charge นั้นที่ให้ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ซึ่งผลของการ overcharging จะทำให้เกิดสภาวะที่อันตราย(สำหรับแบตเตอรี่บางชนิด)ทำให้เกิดความร้อนเกินค่าที่กำหนดไว้และจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง

Undercharging คือการที่มีเวลาไม่เพียงพอสำหรับอัตราการ charge หรือแรงดันในการ charge ต่ำเกินไปจะมีผลให้เกิด undercharging ในแบตเตอรี่ซึ่งจะมีผลทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายไฟได้

High-Discharge Rate สำหรับ load แบบ momentary นั้นถ้ามันเกิดขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเวลาของตอนที่ไม่มีแสง หรือช่วงเวลารับสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่ถูกสำรองไว้จะเป็นเหตุให้แรงดันของแบตเตอรี่นั้นต่ำกว่าค่าต่ำสุดของแรงดันระบบ ถ้า momentary load มีค่ามากกว่าค่าของ load เฉลี่ยมากนั้นแนะนำให้ใช้ค่า capacity ของแบตเตอรี่ตามข้อกำหนดของ IEEE Std 485-1983 (ในการพิจารณาจำนวนวันที่ใช้ในการสำรองสำหรับ load profile diagram นั้น) หรือสำหรับกรณีที่เกิดที่ load ของ load ที่จะเกิดได้เพื่อใช้ในการตัดสินใจของผู้ออกแบบ photovoltaic system โดยตามมาตรฐานนั้น ถ้า momentary load น้อยกว่า 20h discharge rate (C/20) ดังนั้นแล้วอัตรา discharge จะไม่เป็นเหตุให้แรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่าค่าของแรงดันต่ำสุดของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการค้าได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Freezing of the Electrolyte โดยการ freezing electrolyte ของแบตเตอรี่นั้นจะเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายและควรจะต้องป้องกันการ freezing นี้ ในพื้นฐานของการออกแบบค่าต่ำสุดของค่า state of charge จุด freezing นั้นของ electrolyte (ควรอ้างอิงจากผู้ผลิต) ควรจะต่ำกว่าเมื่อคำนวณงานที่อุณหภูมิค่าต่ำสุดถ้าไม่พิจารณา thermal insulation ของแบตเตอรี่ หรือการเพิ่มขึ้นของ capacity แบตเตอรี่และแรงดันระบบที่ต่ำที่สุด

Self-Discharge ในแบตเตอรี่ทุกตัวจะได้รับผลจากการสูญเสียค่า capacity ภายในที่รู้จักกันในชื่อของ self-discharge โดยปริมาณของ self-discharge นี้ (Ah ต่อ เดือน) จะอยู่ใน function ของอุณหภูมิ ค่าเนินงานของแบตเตอรี่, ชนิด, อายุ self-discharge สำหรับแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกภายใต้สภาวะการดำเนินงานของมันควรจะถูกลำดับ capacity ที่สูญเสียไปเพื่อเพิ่มให้เหมาะกับ load ที่ต้องการ

หมายเหตุค่า self-discharge ควรจะพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการดำเนินการออกแบบในระบบที่มีการสำรองแบตเตอรี่ไว้หลายๆหรือระบบที่มีอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่สูงๆ

4.2.13 วิธีการคำนวณ

1. NOMINAL SYSTEM VOLTAGE _____ V
2. DAYS OF BATTERY RESERVE _____ DAYS
3. VOLTAGE WINDOW V_{MAX} _____ V V_{MIN} _____ V
4. TOTAL DAILY LOAD (จากกราฟ load) _____ Ah
5. MAXIMUM CURRENT DRAW FROM BATTERY _____ A
6. LOWEST VALUE OF V_{MAX} (จากกราฟ load) _____ V
7. GREATEST VALUE OF V_{MIN} (จากกราฟ load) _____ V

BATTERY CAPACITY

- 8A. UNADJUSTED BATTERY CAPACITY (LINE 2 X LINE 4): _____ AH
- 8B. MAXIMUM ALLOWABLE DEPTH OF DISCHARGE (MDOD): _____ %
- 8C. CAPACITY ADJUSTED FOR MDOD (LINE 8A + LINE 8B) _____ AH
- 8D. MAXIMUM DAILY DEPTH OF DISCHARGE (MDDOD): _____ %
- 8E. CAPACITY ADJUSTED FOR MDDOD (LINE 4 + LINE 8D) _____ AH
- 8F. PERCENT OF CAPACITY AT END OF LIFE: _____ %
- 8G. CAPACITY ADJUSTED FOR END OF LIFE (LINE 8A + LINE 8F) _____ AH
- 8H. CAPACITY ADJUSTED FOR DEPTH OF DISCHARGE (GREATEST OF LINE 8C, LINE 8E, OR LINE 8G): _____ AH

- 8L. MINIMUM OPERATING TEMPERATURE: _____ °C OR °F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8J. ASSOCIATED TEMPERATURE CORRECTION FACTOR: _____
- 8K. CAPACITY ADJUSTED FOR TEMPERATURE: _____ AH
- 8L. DESIGN MARGIN FACTOR (>1): _____
- 8M. CAPACITY ADJUSTED FOR DESIGN MARGIN(LINE 8K X LINE 8L)
_____ AH
9. FUNCTIONAL-HOUR RATE (LINE 8M + LINE 5): _____ H
10. VOLTAGE-WINDOW ADJUSTMENT
- 10A. CONTROLLER LOW-VOLTAGE LOAD, DISCONNECT SETPOINT: _____ V
- 10B. ADJUSTED VMIN (GREATER OF LINE 7 OR LINE 10A): _____ V
- 10C. CONTROLLER FULL-CHARGE VOLTAGE SETPOINT; _____ V
- 10D. ADJUSTED VMAX (LESSER OF LINE 6 OR LINE 10C) _____ V
- NUMBER OF SERIES-CONNECTED CELLS
- 11A. RECOMMENDED FULL-CHARGE VOLTAGE FOR SELECTED CELL:
(LIMITED BY LINE 10D) _____ V
- 11B. MAXIMUM NUMBER OF CELLS IN SERIES , ROUND DOWN
(LINE 10D+LINE 11A): _____
- 11C. RECOMMENDED EOD VOLTAGE FOR SELECTED CELL: _____ V
- 11D. CALCULATE EOD VOLTAGE FOR CELL(LINE 9B/LINE 10B): _____ V
- CELL SELECTION AND FINAL CAPACITY DETERMINATION
- 12A. SMALLEST PRATICAL CELL CAPACITY AVAILABLE OF
SELECTED TYPE GREATER THANOR EQUAL TO LINE 8M,OR,
LARGEST PRACTICAL CELL LESS THAN LINE 8M, WHEN
DISCHARGE TO VOLTAGE LINE 11D , AT FUNCTIONAL-HOUR
RATE , LINE 9: _____ AH
- 12B. NUMBER OF PARALLEL STRINGS,ROUND UP (LINE 8M
+LINE 12A) _____
- 12C. FINAL BATTERY CAPACITY (LINE 12A X LINE 11B): _____ AH

4.2.14 SIMULATION MODEL

จากการคำนวณที่ผ่านมาเมื่อหาค่า $G(\beta)$ ได้แล้วนำค่า $G(\beta)$ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งกับค่าอื่นไปคำนวณหาค่า power output ของ solar cell แต่ละ module ได้แล้ว ก็จะสามารถหาพลังงานทั้งหมดได้จาก

$$E_{G(t)} = N_{PV} * E_{PV(t)} \quad \text{---สมการ(4.24)}$$

โดย $E_{G(t)}$ พลังงานที่โรงจักรผลิตได้ ณ เวลา t

$E_{PV(t)}$ พลังงานที่ output ของ module ที่แต่ละ module ผลิตได้ ณ เวลา t

N_{PV} จำนวนแผง PV ทั้งหมดที่ติดตั้ง

สำหรับภายในแบตเตอรี่ ค่าพลังงานที่ charge เก็บไว้ในแบตเตอรี่ ณ เวลา T หาได้จาก

$$E_{B(t)} = E_{B(t-1)} + (E_{G(t)} - E_{L(t)} / \eta_{inv}) \eta_{batt,in} \quad \text{--- สมการ(4.25)}$$

โดยค่า η_{inv} = ประสิทธิภาพของ inverter

$\eta_{batt,in}$ = ประสิทธิภาพ round trip ของแบตเตอรี่

$E_{B(t)}$ = พลังงานที่เก็บในแบตเตอรี่ ณ ชั่วโมง t

$E_{B(t-1)}$ = พลังงานที่เก็บในแบตเตอรี่ ณ ชั่วโมง $t-1$

$E_{L(t)}$ = load demand ณ ชั่วโมง t

และเมื่อ load demand มากกว่าค่าของพลังงานที่ผลิตได้ แบตเตอรี่จะถูก discharge ซึ่งจะได้

ว่า

$$E_{B(t)} = E_{B(t-1)} - (E_{L(t)} / \eta_{inv} - E_{G(t)}) \quad \text{---สมการ(4.26)}$$

หมายเหตุ เนื่องจากคุณสมบัติแบตเตอรี่นั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่สามารถคาดเดาได้อย่างละเอียด สำหรับการควบคุมไม่ของช่วงเวลาในการ charge/discharge ในระบบ photovoltaic system ดังนั้นมันจึงยากที่จะแบ่ง ประสิทธิภาพในการ charge กับ discharge โดยผู้ผลิตต้องระบุค่าประสิทธิภาพ round trip และ maximum depth of discharge ยิ่งกว่านั้นแบตเตอรี่ capacity ที่อยู่ใน term ของปริมาณของพลังงานที่สามารถดึงจากแบตเตอรี่มาใช้ได้ ไม่ได้อยู่ในรูปของพลังงานที่เก็บได้ในแบตเตอรี่ ได้จริง ดังนั้นประสิทธิภาพในการ charge ของแบตเตอรี่จึงถูกตั้งค่าให้เท่ากับประสิทธิภาพ round trip และประสิทธิภาพในการ discharge ถูกตั้งค่าให้เป็น 1

ดังนั้นพลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ ณ เวลา t ใดๆจะต้อง

$$E_{Bmin} < E_{B(t)} < E_{Bmax}$$

นั่นหมายถึงว่าแบตเตอรี่ไม่ควร Over discharge หรือ Overcharge เกินค่าที่กำหนด ณ เวลาใดๆซึ่งจะป้องกันแบตเตอรี่ให้เสียหายได้

แต่เมื่อพลังงานที่PVที่ผลิตขึ้นและพลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ยังไม่เพียงพอกับload demand สำหรับ tใดๆ ซึ่งการไม่เพียงพอนี้ถูกเรียกว่า Loss of Power Supplyสำหรับtใดๆซึ่งหาจาก

$$LSP_{(t)} = E_{L(t)} - (E_{G(t)} + E_{B(t-1)} - E_{Bmin}) * \eta_{inv} \quad \text{---สมการ(4.28)}$$

สำหรับความน่าจะเป็นของ Loss of Power Supply ณ เวลา n เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าของ LSHทั้งหมดในช่วงเวลานั้นกับผลรวมของ load demandซึ่งหาได้จาก

$$LPSP = (\sum LPS_{n \text{ เวลา } 1 \text{ ถึง } t}) / (\sum E_{L(t) \text{ n เวลา } 1 \text{ ถึง } t}) \quad \text{---สมการ(4.29)}$$



บทที่ 5

การใช้โปรแกรม

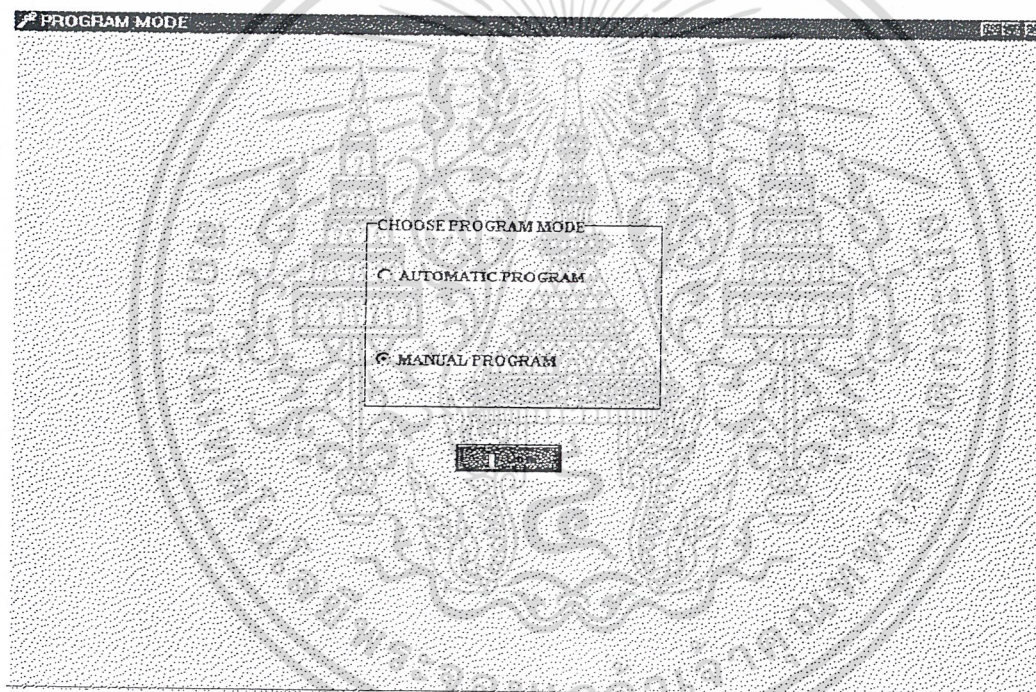
5.1 ขั้นตอนวิธีการใช้โปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมออกแบบไว้สำหรับ 2 ลักษณะการทำงาน คือ

1.Mode Automatic

2.Mode Manual

ดังนั้นเริ่มต้นผู้ใช้ต้องเลือก Mode ของการทำงานของโปรแกรมก่อน ในหน้าจอแรก



รูปที่ 5.1 แสดงหน้าจอแรกของโปรแกรม

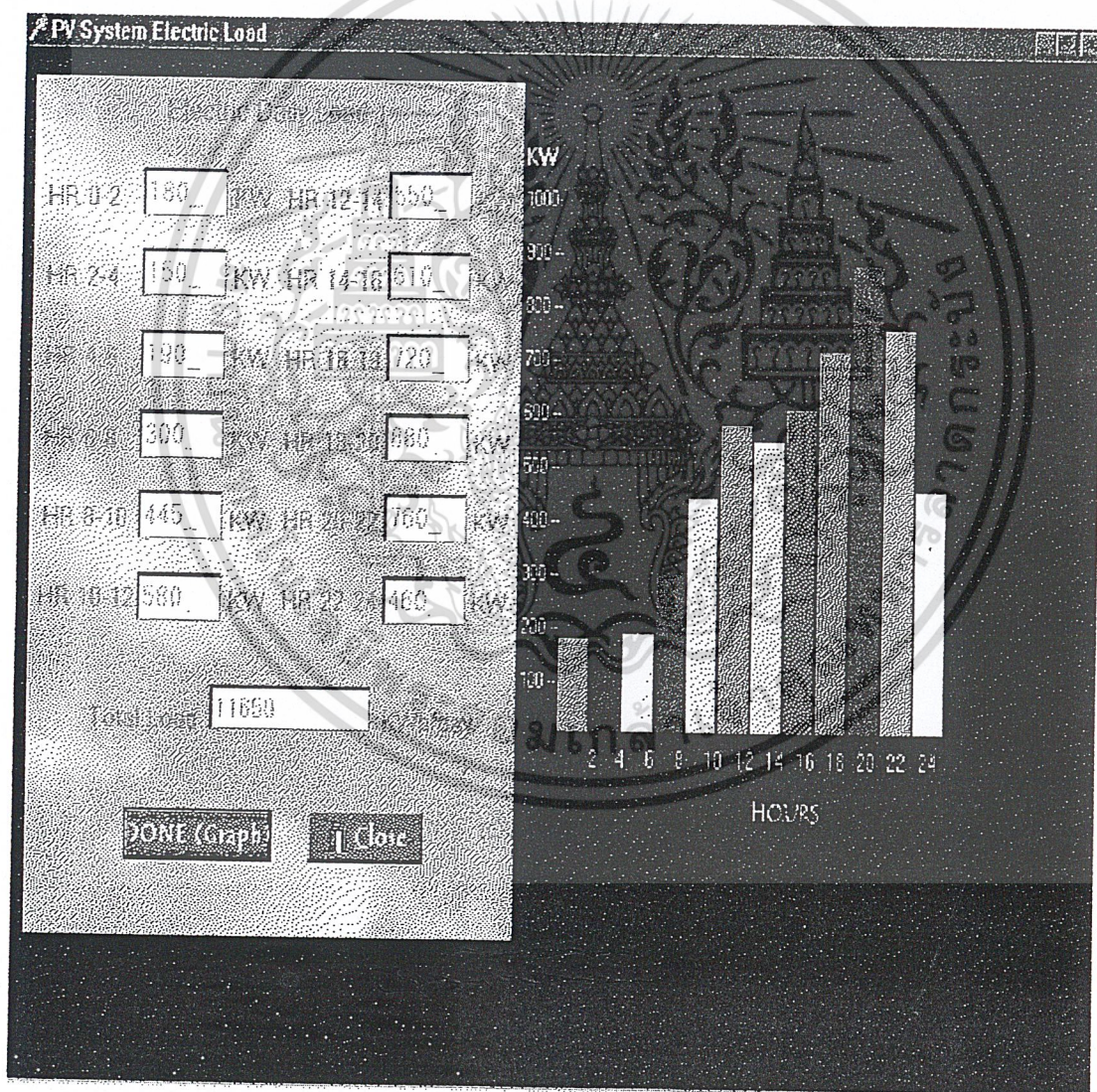
เมื่อทำการเลือก Mode แล้วจะเข้าสู่หน้าจอ Main Menu ของ Mode นั้นๆ ซึ่งต่างกันตรงที่ Mode Auto มีปุ่มให้ click เพื่อกรอกข้อมูลได้เพียง 2 ปุ่ม และปุ่มสำหรับการคำนวณ 1 ปุ่ม ส่วน Mode Manual มีปุ่มให้ click เพื่อกรอกข้อมูลทั้งหมด 6 ปุ่ม และปุ่มสำหรับการคำนวณ 1 ปุ่ม

สำหรับการใช้โปรแกรมทั้ง 2 Mode นั้น ถ้าหากยังกรอกข้อมูลไม่ครบจะไม่สามารถ click ปุ่ม Calculate เพื่อทำการคำนวณระบบได้ ซึ่งจะทราบได้โดยการเตือนของโปรแกรม

5.2 รายละเอียดการใช้ของหน้าจอต่าง ๆ

5.2.1 หน้าจอ PV load

การกรอก load ผู้ใช้จะต้องกรอกข้อมูล load ที่ต้องการใช้ในแต่ละช่วงเวลา โดยสำหรับโปรแกรมนี้ ผู้ใช้ออกแบบให้สามารถกรอก load ได้ทุก ๆ 2 ชม. และอยู่ในช่วง 0-1000 kw ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษา Solar Plant โดยส่วนใหญ่จะมีการออกแบบใน range ช่วงนี้ทั้งสิ้น หลังจากนั้นก็ click ปุ่ม Done เพื่อดูกราฟของ load

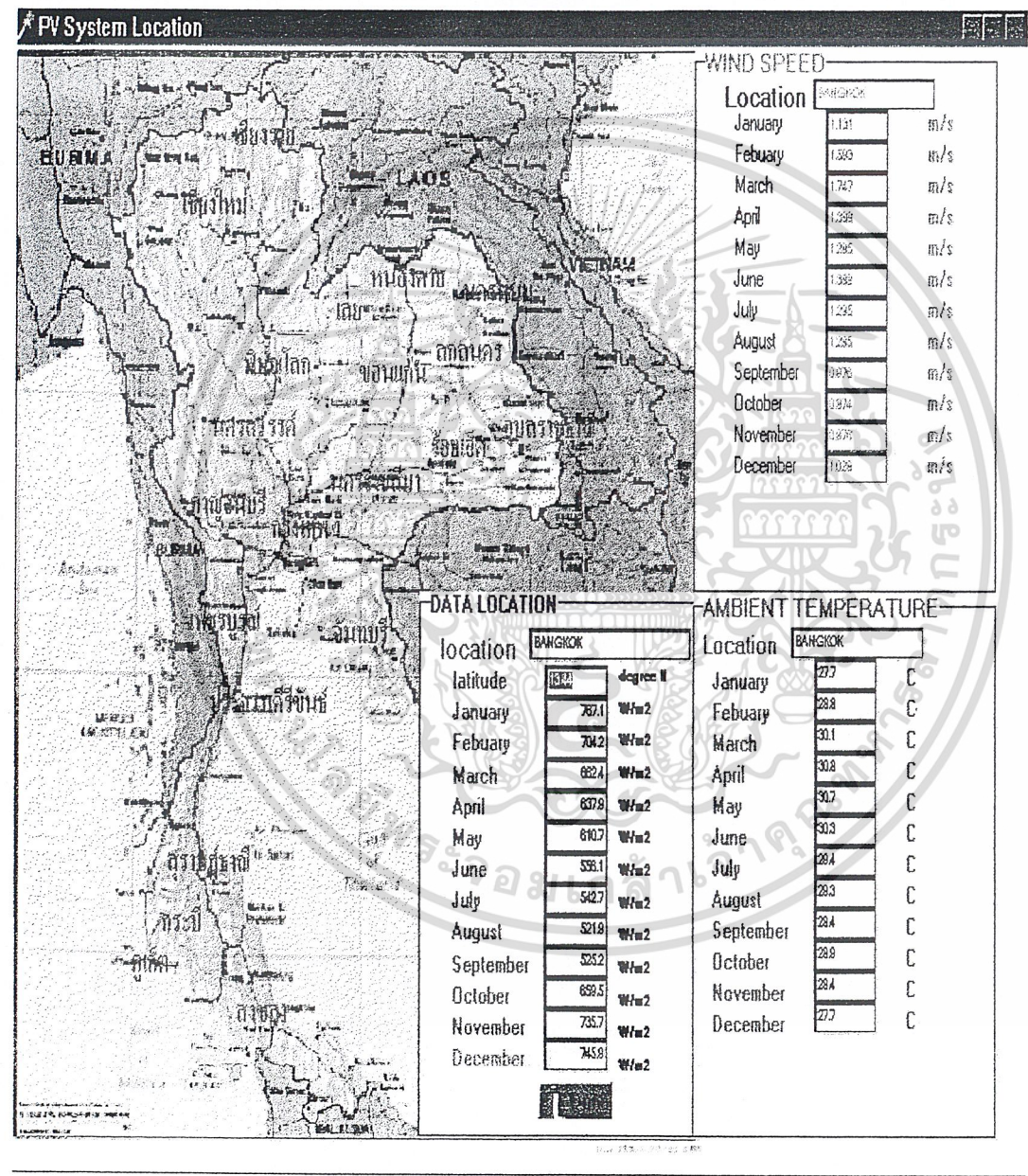


รูปที่ 5.2 แสดงหน้าจอ PV load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.location

เลือกจังหวัด โดยการ double click ที่ชื่อจังหวัดแล้วจะปรากฏข้อมูลปริมาณแสง
เฉลี่ย ความเร็วลมเฉลี่ย อุณหภูมิเฉลี่ย ในแต่ละเดือนของจังหวัดนั้น ๆ เมื่อเลือกเสร็จแล้วให้ทำ
การ click ปุ่ม Done

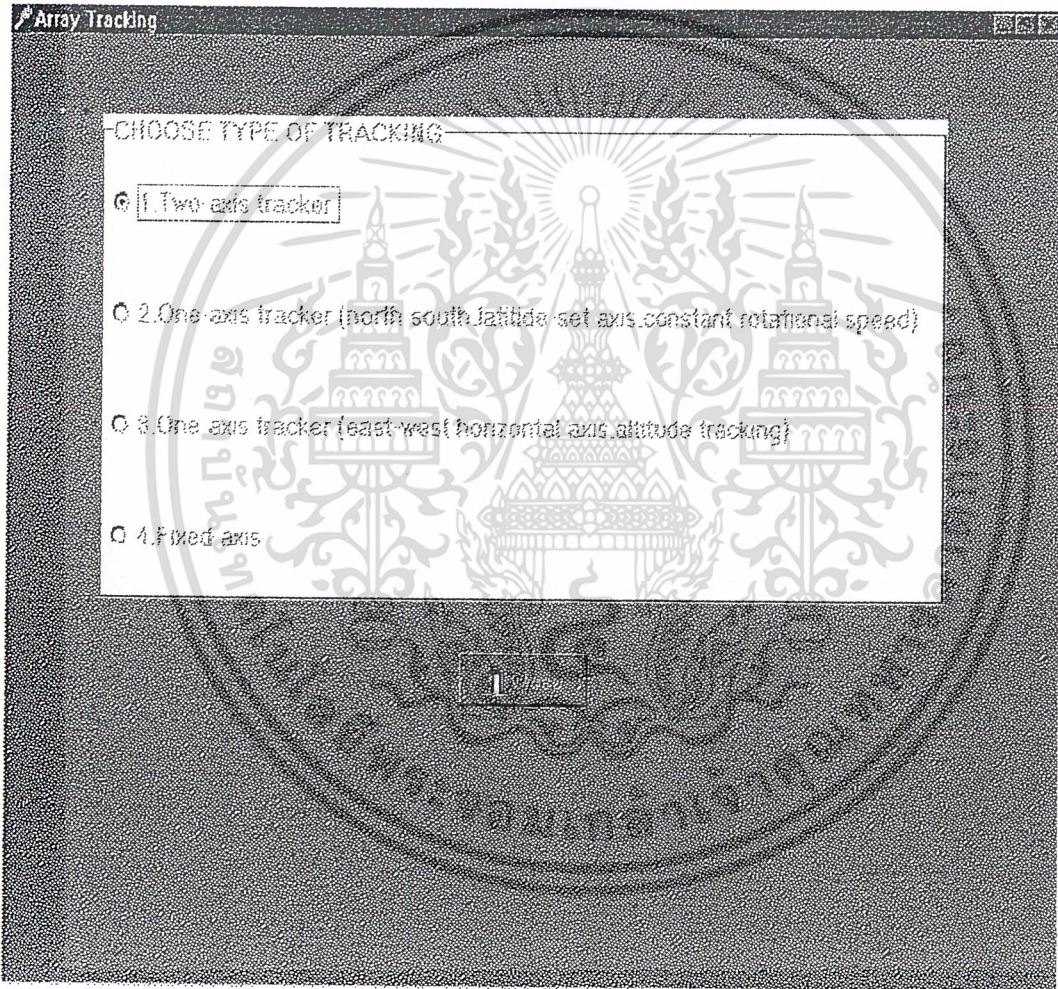


รูปที่ 5.3 แสดงหน้าจอ location

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.Tracking

ผู้ใช้งานทำการเลือกชนิดของการ Tracking ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีผลต่อ ปริมาณแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์ในช่วงเวลาต่าง ๆ มากน้อยต่างกันตามชนิดของการ Tracking เมื่อเลือกเสร็จแล้ว click ปุ่ม Close เพื่อทำการปิดหน้าจอ



รูปที่ 5.4 แสดงหน้าจอ Tracking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4.PV Array

สำหรับ Mode Manual ผู้ใช้ทำการเลือกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการ โดยหน้าจอจะแสดงข้อมูลของแผงเซลล์จากฐานข้อมูล(Database) ซึ่งผู้ใช้สามารถ click หรือเลื่อนได้ ค่าที่ปรากฏทางด้านขวาคือค่าที่ผู้ใช้เลือกดูในขณะนั้น หากตกลงเลือกแผงเซลล์รุ่นนั้น สามารถทำได้โดยการ click ปุ่ม “Done” และหน้าจอจะถูกปิดทันที

PV System Array Configuration

Panel Type	PDC	VDC	Pmax	Vmax
ASE-300-DG47	18.4	20	18.8	17
ASE-300-DG50	6.2	66	5.6	50.5
ASE-60-AL	9.2	28	2.9	17
Astro Power AD-1106	7.5	20.7	6.6	16.7
Astro Power AP-1206	7.7	21	7.1	16.5
Astro Power AP-5106	9.8	20.7	9.3	16.7
Astro Power AP-6116	4.7	20.8	4	16.3
Astro Power AP-6226	6.05	15.6	5	16
Astro Power AP-3226	6.9	20.1	6.5	16.4
Astro Power APX-46	2.3	21.3	2.8	17.3
Astro Power APX-7106	4.8	21	4.4	17
Astro Power APX-80	6.4	21.3	6.2	17.3
Astro Power PV-120	7.7	21	7.1	16.5
BP Solar BP-1216SR	1.15	19	1.02	15.2

Panel Data

Panel Type: Astro Power AP-5106

Isc: 3.8

Vdc: 20.7

ImaxP: 3.3

Vmp: 16.7

Uisc: 0.0626

Uvoc: 0.075

BANG: 1.12

NS: 36

TCOCT: 45

AREA: 0.513

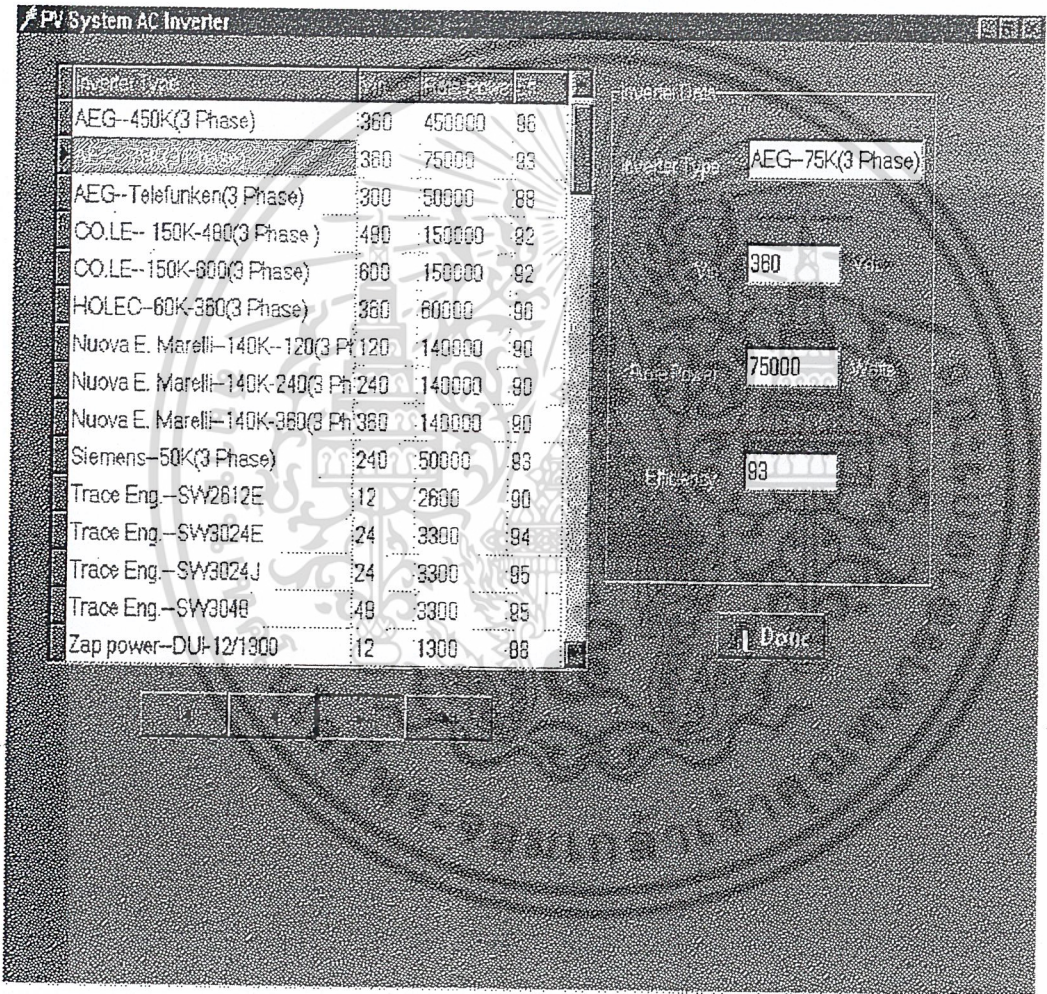
Buttons: Cancel, Done

รูปที่ 5.5 แสดงหน้าจอ PV Array

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6. Inverter

สำหรับ Mode Manual ผู้ใช้ทำการเลือกอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการใช้ โดยหน้าจอจะแสดงข้อมูลของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ จากฐานข้อมูล การใช้โปรแกรมและการเลือกทำได้ในลักษณะเดียวกันกับหน้าจอ PV Array



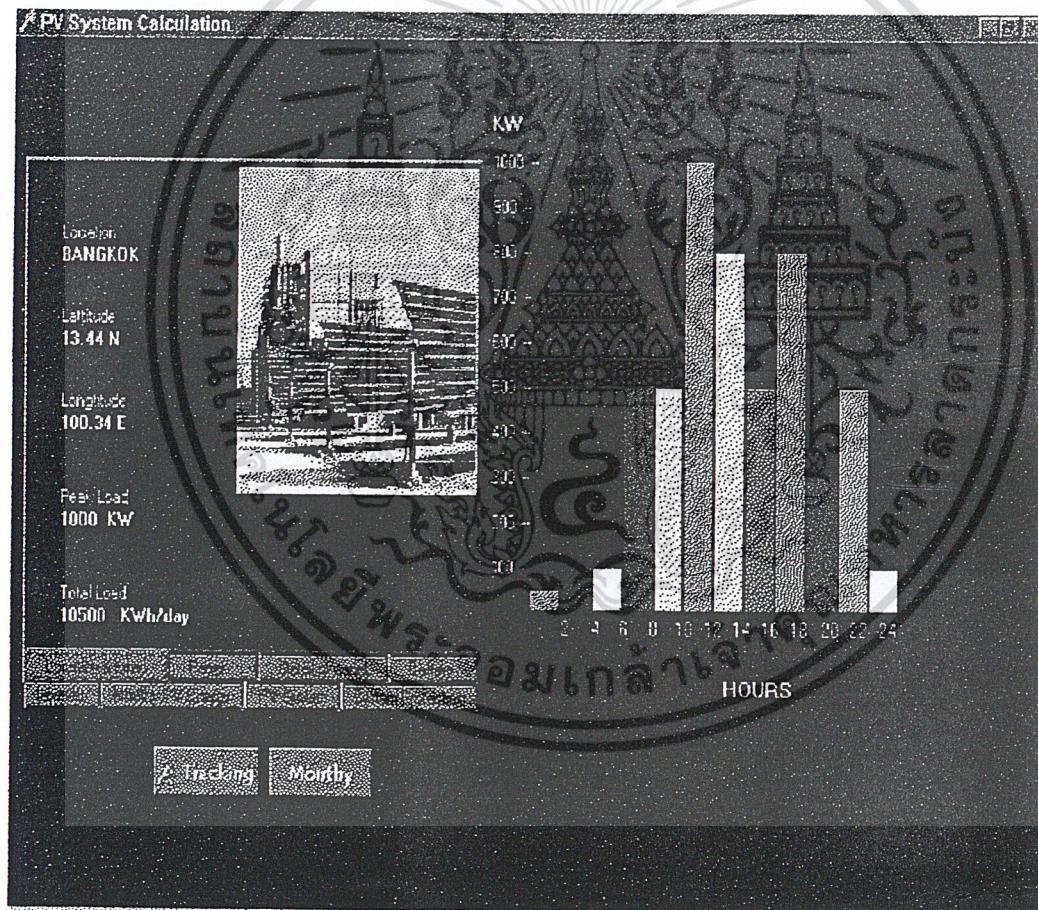
รูปที่ 5.7 แสดงหน้าจอ Inverter

สำหรับ Mode Automatic

ปุ่ม Tracking, PV Array, Battery, Inverter นั้น ใน Mode นี้โปรแกรมจะทำหน้าที่ในการเลือกชนิดของการ Tracking, PV Array, Battery, Inverter ให้เอง โดยมีเงื่อนไขต่างๆ ในการพิจารณาเพื่อให้ระบบสามารถผลิตพลังงานเพื่อจ่าย load ได้เพียงพอ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับพลังงานค่านั้นๆ

5.2.7. Calculate

ทั้ง Mode Auto และ Manual โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลต่าง ๆ ของระบบ PV System โดยสามารถเลือกดูได้ โดย click ที่ Tabsheet ต่างๆ ได้แก่



รูปที่ 5.8 แสดงหน้าจอ Calculate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.8 จะมี Tab sheet ซึ่งแต่ละ Tab sheet คือ

Location&Load แสดงที่ตั้งและ load ที่เราทำการเลือกไว้

Panel

Battery

Inverter

แสดงรุ่นของอุปกรณ์ที่ใช้และค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ จำนวนที่ใช้ทั้งหมด การต่อขนาน อินเวอร์ และ จำนวน Unit ทั้งหมด

PV Energy แสดงค่าพลังงานที่แผงเซลล์ทั้งหมดผลิตได้โดยเฉลี่ยในแต่ละวันสำหรับเดือนต่างๆ

PVSystem แสดงค่าต่างๆ ของระบบโดยรวม

System Protection แสดงวิธีการป้องกันของระบบ

สำหรับปุ่ม Monthly จะมีในกรณีที่เลือก location เป็นจังหวัดกรุงเทพเท่านั้น ซึ่งเป็นปุ่มสำหรับเข้าไปดูผลต่างๆ คือ

Bangkok Calculation

	LFV(W)	Load(W)	Exchange	Discharge	Battery	SOC	LFS
1	0	50000	0	543	95627952	0.999	0
2	0	50000	0	543	95627403	0.999	0
3	0	100000	0	1087	95626322	0.999	0
4	0	100000	0	1087	95625235	0.999	0
5	0	100000	0	1087	95624148	0.999	0
6	0	100000	0	1087	95623061	0.999	0
7	0	500000	0	5435	95617626	0.999	0
8	437629	500000	27174	0	95644800	1	0
9	161385	500000	0	0	95644800	1	0
10	5472058	500000	0	0	95644800	1	0
11	3341324	1000000	0	0	95644800	1	0
12	3537195	1000000	0	0	95644800	1	0
13	3479585	800000	0	0	95644800	1	0
14	5841556	800000	0	0	95644800	1	0
15	4424374	500000	0	0	95644800	1	0
16	6555908	500000	0	0	95644800	1	0
17	691308	800000	0	0	95644800	1	0
18	322611	800000	0	0	95644800	1	0
19	103696	300000	0	0	95644800	1	0
20	0	300000	0	3261	95641539	0.999	0
21	0	500000	0	5435	95636104	0.999	0
22	0	500000	0	5435	95630669	0.999	0
23	0	100000	0	1087	95629582	0.999	0
24	0	100000	0	1087	95628495	0.999	0

Month 1 Day 11 LPSP 0

<-- Month Month --> <-- Day Day --> Result

รูปที่ 5.9 แสดงหน้าจอหลังจาก click ปุ่ม Daily Calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงค่าต่าง ๆ ดังนี้

EPV พลังงานที่แผงเซลล์ทั้งหมดผลิตได้

Eload load ที่ต้องการในแต่ละชั่วโมง

Echarge พลังงานที่ charge เข้าไปสู่ Battery ในแต่ละชั่วโมง

Edischarge พลังงานที่ discharge ออกจาก battery ในแต่ละชั่วโมง

Ebatt พลังงานของ battery ที่มีอยู่ในแต่ละชั่วโมง

SOC state of charge ของ battery คือ battery มีพลังงานเท่าใดเมื่อเทียบกับ full charge

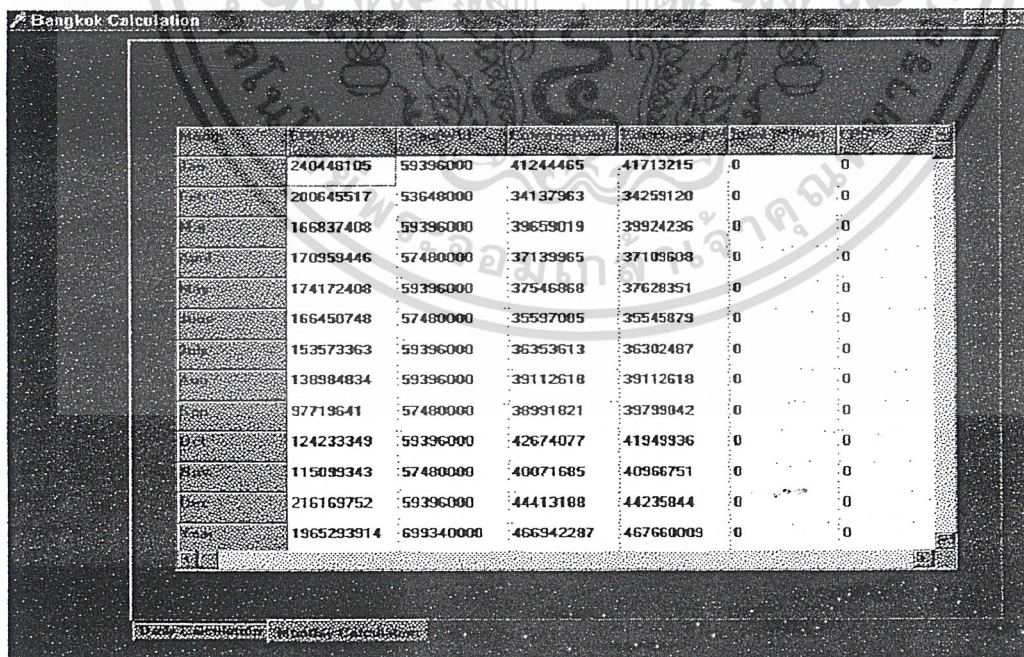
LPS Loss of Power Supply คือค่าที่แสดงพลังงานที่ระบบไม่สามารถจ่ายให้กับ load ได้ในแต่ละช่วงเวลา ถ้าเป็น 0 ก็คือระบบสามารถจ่าย load ได้เพียงพอ

ซึ่งตารางนี้สามารถเลือกดูได้ทุกวันตลอดทั้งปี เนื่องจากการคำนวณต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกของปี จนถึงสิ้นปี(วันที่ 1-365)

การใช้

เลือกวัน เดือน ที่ต้องการดูผล เมื่อเลือกได้แล้วทำการ click ปุ่ม “Result” โปรแกรมจะแสดงผลของวันนั้น ซึ่งเป็นผลที่ต่อเนื่องมาจากวันที่ 1 เป็นต้นมา

นอกจากนี้ใน Tabsheet ถัดไป จะแสดงค่าผลรวมของปริมาณต่าง ๆ ข้างต้นในแต่ละเดือน สามารถดูได้โดยการ click ที่ Tabsheet “Monthly”



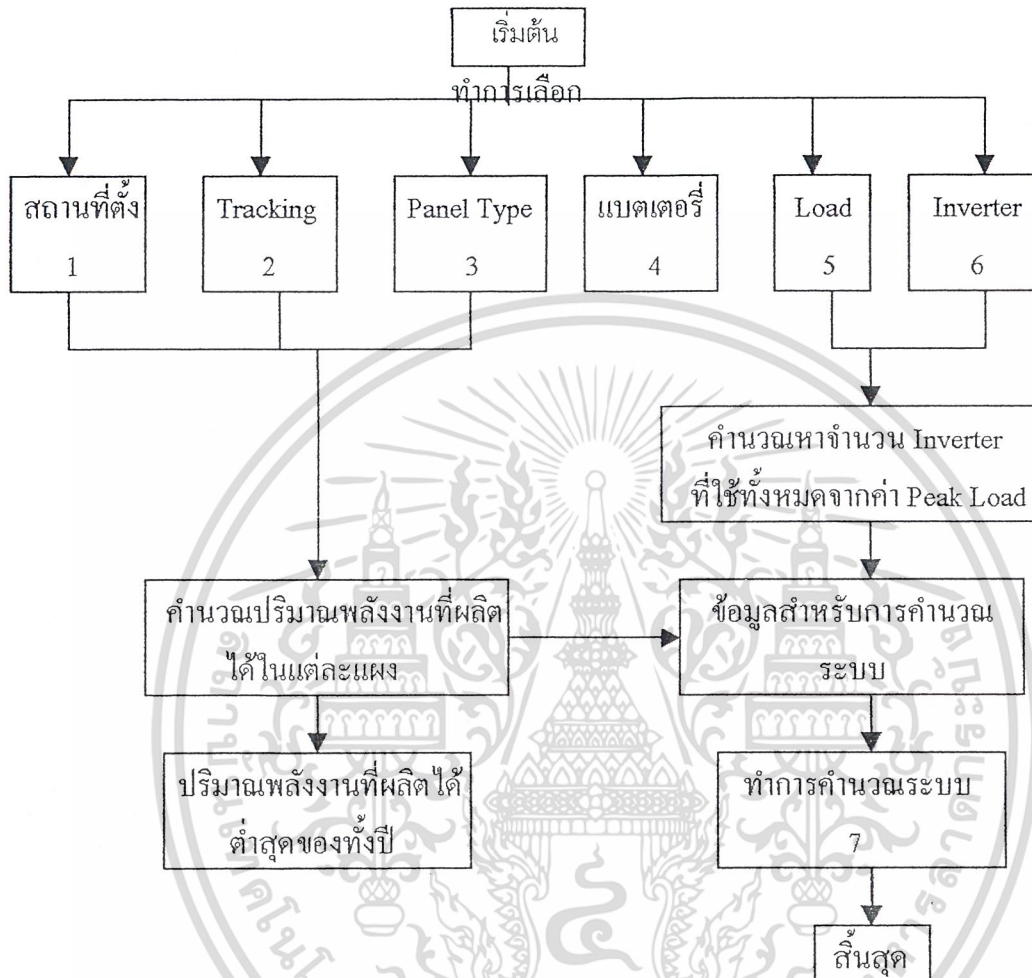
วันที่	EPV	Eload	Echarge	Edischarge	Ebatt	SOC	LPS
1	240445105	59396000	41244455	41713215	0	0	0
2	200645517	53648000	34137963	34259120	0	0	0
3	166837408	59396000	39659019	39924236	0	0	0
4	170959446	57480000	37139965	37109608	0	0	0
5	174172408	59396000	37546868	37628351	0	0	0
6	166450748	57480000	35597005	35545879	0	0	0
7	153573363	59396000	36353613	36302487	0	0	0
8	138984834	59396000	39112618	39112618	0	0	0
9	97719641	57480000	38991821	39799042	0	0	0
10	124233349	59396000	42674077	41949936	0	0	0
11	115099343	57480000	40071685	40966751	0	0	0
12	216169752	59396000	44413188	44235844	0	0	0
13	1965293914	699340000	466942287	467660009	0	0	0

รูปที่ 5.10 แสดงหน้าจอ Monthly Calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แสดง Flow chart การทำงานของโปรแกรม

Flow chart แสดงการทำงานของโปรแกรมแบบ Manual



หมายเหตุ

1 คือ สถานที่ตั้ง Solar Plant และลักษณะพื้นที่ทำการติดตั้งแผงเซลล์ ปริมาณแสง ความเร็วลม Peak sun hour ในแต่ละเดือนของจังหวัดนั้น

2 คือ ลักษณะการ Tracking ของแผงเซลล์

3 คือ รุ่นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทราบข้อมูลต่าง ๆ คือ Voc, Isc, Imp, Vmp, UIISC, UVOC, bandgap, number of series cell in 1 module, area

4 คือ รุ่นแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ ซึ่งต้องทราบค่าข้อมูลต่าง ๆ คือ แรงดัน ความจุ(Ah) Maximum depth of discharge ประสิทธิภาพ

5 คือ พลังงานที่โหลดต้องการในแต่ละช่วงเวลา

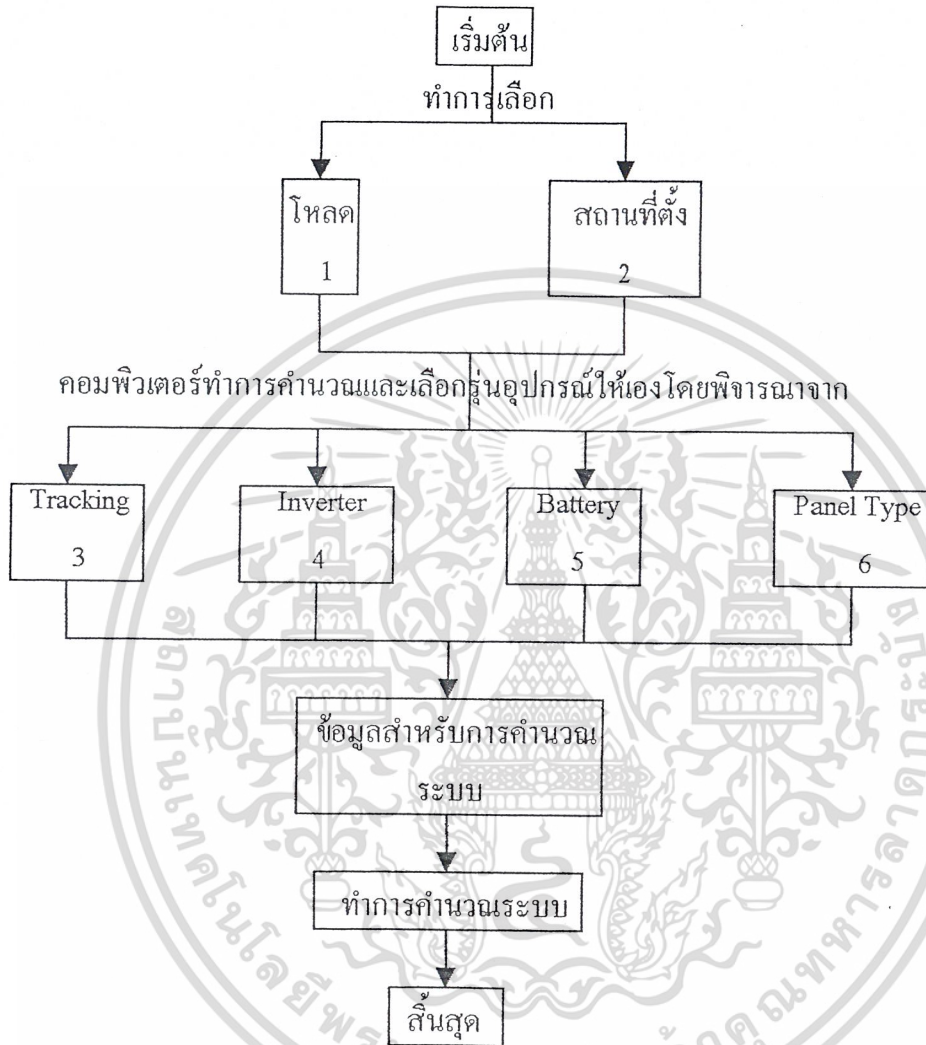
6 คือ รุ่นของ Inverter เพื่อทราบข้อมูลต่าง ๆ คือ power, eff, Vdc in, Vdc out

7 คือ คำนวณหาค่าจำนวนแผงและแบตเตอรี่ และลักษณะการต่ออนุกรมหรือขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flow chart แสดงการทำงานของโปรแกรมแบบ Auto



หมายเหตุ

- 1 คือ พลังงานที่โหลดต้องการในแต่ละช่วงเวลา
- 2 คือ สถานที่ตั้ง Solar Plant และลักษณะพื้นที่ทำการติดตั้งแผงเซลล์ ปริมาณแสง ความเร็วลม Peak sun hour ในแต่ละเดือนของจังหวัดนั้น
- 3 เลือก Tracking ที่ให้ค่าปริมาณแสงมากที่สุด
- 4 เลือก Inverter ประสิทธิภาพสูงที่สุด และมีขนาดใกล้เคียงกับ Load มากที่สุด
- 5 เลือก Battery ประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ทำให้ขนาดรวมใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด
- 6 เลือกรุ่นที่เหมาะสม เลือกลักษณะการต่อเพื่อให้สามารถผลิตพลังงานเพื่อรองรับ Load ได้อย่าง

เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้โปรแกรมกับโรงจักรไฟฟ้าจริง

โรงจักรที่นำมาเปรียบเทียบคือสถานีไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในหมู่บ้านชนบทที่ห่างไกล ตั้งอยู่ที่บ้านวังหมี่ หมู่ 1 ตำบลวังหมี่ อำเภอปรางค์ชัย จังหวัดนครราชสีมา ติดตั้งขนาด 20 กิโลวัตต์

	สถานีไฟฟ้าบ้านวังหมี่ นครราชสีมา**	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Manual	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Auto
สถานที่	นครราชสีมา	นครราชสีมา	นครราชสีมา
* Peak load	9.5 KW	10 KW	10 KW
Total load	50.5 KWh/day	50 KWh/day	50 KWh/day
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด	NT 136 60W	Kycera KC 60 60W	Siemens SM110 110W
*กำลังผลิตรวมสูงสุด จากแผงเซลล์ จำนวนแผงที่ใช้ Tracking	30.3 KW * 512 แผง Fixed Axis	32KW * 550 แผง Fixed Axis	23KW * 216 แผง Two Axis
Inverter ขนาด จำนวน	- 20 KW 1 ตัว	Zap power 20 KW 1 ตัว	Zap power 3 KW 4 ตัว

จาก ข้อมูลเห็นได้ว่า พลังงานที่ผลิตจากแผงเซลล์แบบ Auto ออกแบบให้ใกล้เคียงกับโหลดมากที่สุด โดยที่ยังสามารถรองรับ โหลดสูงสุด 10 KW ได้เพียงพอ

** ข้อมูลจากรายงาน โครงการไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางเปรียบเทียบผลการออกแบบเมื่อมีความแตกต่างระหว่างสถานที่ ที่ติดตั้งโรงจักร

ในที่นี้จะแสดงผลความแตกต่างของการออกแบบโรงจักรเพื่อรองรับโหลดขนาดเดียวกัน แต่สถานที่ติดตั้งต่างกัน ได้แก่ จังหวัด นครราชสีมา กระบี่ เชียงราย นครสวรรค์ ซึ่ง อยู่ในแต่ละภาคของประเทศดังนี้

	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Manual	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Manual	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Auto	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Auto
สถานที่	นครราชสีมา	กระบี่	นครราชสีมา	กระบี่
* Peak load	10 KW	10 KW	10 KW	10 KW
Total load	50 KWh/day	50 KWh/day	50 KWh/day	50 KWh/day
แผงเซลล์แสง อาทิตย์ ขนาด	Kyocera KC 60 60W	Kyoera KC 60 60W	Siemens SM110 110W	Solarex MSX64 64W
*กำลังผลิตรวม สูงสุดจากแผง เซลล์ จำนวนแผงที่ใช้ Tracking	32KW * 550 แผง Fixed Axis	39KW * 660 แผง Fixed Axis	23KW * 216 แผง Two Axis	27KW * 432 แผง Two Axis
Inverter ขนาด จำนวน	Zap power 20 KW 1 ตัว	Zap power 20 KW 1 ตัว	Zap power 3 KW 4 ตัว	Zap power 3 KW 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Manual	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Manual	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Auto	ออกแบบโดย โปรแกรมแบบ Auto
สถานที่	เชียงราย	นครสวรรค์	เชียงราย	นครสวรรค์
* Peak load	10 KW	10 KW	10 KW	10 KW
Total load	50 KWh/day	50 KWh/day	50 KWh/day	50 KWh/day
แผงเซลล์แสง อาทิตย์ ขนาด	Kyocera KC 60 60W	Kyocera KC 60 60W	Kyocera 120W	Siemens 110W
*กำลังผลิตรวม สูงสุดจากแผง เซลล์ จำนวนแผงที่ใช้ Tracking	36KW * 605 แผง Fixed Axis	32KW * 550 แผง Fixed Axis	25W * 216 แผง Two Axis	23KW * 216 แผง Two Axis
Inverter ขนาด จำนวน	Zap power 20 KW 1 ตัว	Zap power 20 KW 1 ตัว	Zap power 3 KW 4 ตัว	Zap power 3 KW 4 ตัว

จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสถานที่ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ขนาดของโรงจักรเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก ปริมาณแสง สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ อุณหภูมิ ล้วนมีส่วนสำคัญในการกำหนดขนาดของโรงจักรทั้งสิ้น ดังนั้นหากจะทำการสร้างโรงจักรจริงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลของแต่ละสถานที่อย่างละเอียด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจเลือกสถานที่ในการสร้างโรงจักรเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนมากที่สุดด้วย

บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์

โครงการนี้เป็นโปรแกรมในการsimulateสำหรับphotovoltaic power plant โดยอาศัยข้อมูล ปริมาณแสง อุณหภูมิและความเร็วลม ของจังหวัดต่างในประเทศไทย ณ ช่วงเวลาต่างๆ ในหนึ่งปี โดยผู้ใช้สามารถเลือกจังหวัดต่างๆ(ในประเทศไทย)ที่จะสร้าง plant และสามารถกรอก load demand ที่ผู้ใช้ต้องการในหนึ่งวัน โดยใช้เลือก Array ,Battery ,inverter (จากของยี่ห้อต่างๆที่มีขายอยู่) ขนาดต่างๆเพื่อให้เหมาะกับ load demand ที่ผู้ใช้ต้องการ แล้วนำมาคำนวณจำนวนของ Array ,battery ,inverter ทั้งหมดที่จะใช้ใน plant นั้น โดยอาศัยการคำนวณปริมาณแสงที่ตก ณ มุมเอียงของอุปกรณ์ TRACKING ที่เลือกไว้เพื่อมาหาค่าสิ่งที่แต่ละ Array ผลิตได้ ดังนั้นจะได้กำลังที่ Array ทั้งหมดผลิตได้ จากนั้นจึงหาจำนวนแบตเตอรี่และ inverter เมื่อหาค่าจำนวนอุปกรณ์ต่างได้ก็จะนำมา simulate ว่าคุณค่าต่างๆเช่น พลังงานที่ผลิตจาก PV Array, พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่, พลังงานที่ discharge ของจากแบตเตอรี่ ณ เดือนต่างๆหรือตลอดทั้งปี จะเพียงพอกับ load demand ที่ผู้ใช้ต้องการหรือไม่ โดยแสดงให้อยู่ในค่าของ Loss of Power Supply (พลังงานที่ PV ทั้งหมดผลิตได้ และพลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ ไม่เพียงพอกับ load demand)

แต่ในโปรแกรมนี้อาจใช้ในการคำนวณเพื่อหาจำนวน และค่าเพียงพอกับความต้องการหรือไม่เท่านั้น จะไม่รวมการคิดราคาหรือทางด้านเศรษฐศาสตร์ใดๆ โดยหลังการออกแบบจะยึดหลักเพื่อให้ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยตัวมากที่สุด โดยยังเพียงพอกับ load demand และเนื่องจากค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณต้องใช้ตามคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่เลือกเพราะอุปกรณ์ต่างๆมีหลายยี่ห้อмаก ดังนั้นผู้เขียนโปรแกรมจึงไม่สามารถหาค่าคุณสมบัติต่างได้หมด ดังนั้นการออกแบบจึงยึดค่าที่เป็นมาตรฐานในการคำนวณ(โดยเฉพาะแบตเตอรี่)

โดยโปรแกรมส่วนใหญ่คำนวณตามหลัก IEEE ดังนั้นเมื่อคำนวณแล้วผู้ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะกับการใช้งานของผู้ใช้ได้

เอกสารอ้างอิง

1. คร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, “เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์, 2530
2. “บ้านพลังงานแสงอาทิตย์”, เอกสารแนะนำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
3. รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โคประเสริฐพงศ์, รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์สงฆนาร
“โครงการวิจัยเรื่องการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ทำจากซิลิกอน แบบโพลีคริสตัลไลน์ ”
4. เอกสารตีพิมพ์ของบริษัท บีพี ไทยโซลาร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
5. Bogdan S. Borowy and Ziyad M. Salameh , “Methodology for Optimally Sizing the
Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System” , IEEE
Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, NO. 2, June 1996
6. Frence Loius and Tony Gan Ang Palz, “Photovoltaic Engineering Hand Book” ,Asian
Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1990
7. John A. Duffie William A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, Solar
Engineering of Thermal Processes Book, Second Edition
8. IEEE Recommended Practrice for sizing Lead-Acid Batteries for Photovoltaic System ,
Approved May 31, 1990
9. S. Eckroad and B. Radimer, “Review of Engineering Design Considerations for Battery
Energy Management Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6,
NO. 2, June 1991
10. Simon Roberts, “Solar Electricity Practical Guide to Design and Installing Small
Photovoltaic System Book”
11. Thomas Markvart, “Solar Electricity”, pp 22 – 43
12. Wolfgang Palz(Butterwarths Unesco), “Solar Electricity ,An Economic Approch to solar
Energy”, pp 179 – 189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของท่านต่างๆดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์สุธี บรรจงจิตร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำความรู้ทางวิชาการต่างๆ จนนำมา
ได้ซึ่งโครงงานทางวิชาการนี้

2. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอาจารย์ที่ปรึกษาและรุ่นพี่ที่คอยให้คำปรึกษาคำแนะนำ
และหาข้อมูลคอยให้กำลังใจและดูแลโครงงานของกลุ่มเป็นอย่างดี

3. อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอาจารย์และรุ่นพี่ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำ

4. คุณพินิจ ศิริพฤกษ์พงศ์

การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ผู้ให้คำแนะนำและให้ความรู้เกี่ยวกับโรงจักรไฟฟ้า

5. คุณวัชรระ กิตตินำชัย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ที่คอยช่วยค้นหาข้อมูลต่างๆ ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโรงจักรไฟฟ้า

6. คุณณัฐพล พากเพียร (โย)

เพื่อนรุ่นเดียวกันที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้คอมพิวเตอร์และห้องพักตลอดมา จน
กระทั่งโครงงานสำเร็จลงด้วยดี

7. เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้ยืม password ในการหาข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต

8. เพื่อนๆ คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกคนที่ให้กำลังใจในการเขียนโปรแกรมตลอดมา

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ที่อยู่ สมาชิกในกลุ่ม Photovoltaic Plant Design

ภาค Power รุ่น34



นายจักรพันธ์ พงศ์มานะชัย (โจ้)
897/4 ถ.ประจักษ์ ต. ในเมือง อ.เมือง
จ.หนองคาย 43000
โทรศัพท์ 042-460606
เพจเจอร์ 142-4979861



น.ส.ศิริพร ปรีชาตินนท์ (ต๊าก)
2508/871 อาคาร 4 แฟลตดินแดง
ถ.ดินแดง เขตดินแดง กทม. 10400
โทรศัพท์ 2476454
เพจเจอร์ 142-4049943



นายสมภพ ศรีตรัย (เม้ง)
62 หมู่ 1 ต. หนองรี อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000
โทรศัพท์ 038-799220
เพจเจอร์ 152-260202



นายสรณ์ย์ ชีรวชิรกุล (รันชัย)
6/119 หมู่บ้าน Royal Palm Villa
บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
โทรศัพท์ 7589548-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้