

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาระบบการวัด คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์
THE DEVELOPMENT OF MEASURING SYSTEM FOR THE I-V CHARACTERISTIC
OF SOLAR CELLS



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62728**
วัน,เดือน,ปี... **21 ส.ค. 2549**

b. 111/8925
i.

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาาระบบการวัด คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์
The Development of Measuring System for the I-V Characteristic of Solar Cells



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาระบบการวัด คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ นาย จักรพันธ์ สักแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาวิธีการวัด คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

The Development of Measuring System for the I-V Characteristic of Solar Cells

นาย จักรพันธ์ ลักแสง เลขประจำตัว 46015212

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการวัด คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

นาย จักรพันธ์ สักแสง

ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมและระบบการวัดควบคุมเครื่องมือวัดผ่านระบบบัส IEEE-488 (GPIB) เพื่อใช้วัดคุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนยังสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น กระแสลัดวงจร (I_{sc}) , แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) , ฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF) , ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η) , ความต้านทานอนุกรม (R_s) , ความต้านทานขนาน (R_{sh}) , Ideality Factor (n) เป็นต้น ซึ่ง โปรแกรมดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้การวัดมีความถูกต้องแม่นยำและสามารถประมาณข้อมูลได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ Labview เวอร์ชัน 7.0 และเวอร์ชันที่สูงขึ้น ในการติดต่อและควบคุม ซอสมิเตอร์ Keithley 2400 และสร้างระบบการวัดโดยมีวงจรควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมให้มีอุณหภูมิที่คงที่ในขณะที่วัดเซลล์เพื่อความแม่นยำการวัดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่แสงตกกระทบเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Development of Measuring System for the I-V Characteristic of Solar Cells

Mr. Jakapan Saksang

Dr. Sutichai Chaisitsak (Advisor)

Academic Year 2004

Abstract

This project was conducted to control measurement system in GPIB interface for characteristics I-V of solar cell was used measurement and analysis to parameters of solar cell example Short circuit current(I_{sc}) , Open circuit(V_{oc}) , Fill Factor(FF) , Energy Conversion Efficiency(η) , Series resistance(R_s) , Shunt resistance(R_{sh}) , Ideality Factor(n) that software to develop the mean for accuracy and could speedy in approximation data. Created by using labview software version 7.0 in contact and control with the keithley 2400 series sourcemeters. And measuring system to make by temperature control circuit in order to constant temperature and accurate in thin film solar cell. While to collide with cell that light.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยมาจากความกรุณาของ อาจารย์ ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในความเอื้อเฟื้อสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการทั้งหมด และโดยคำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนแนวคิดที่ทำให้เกิดไอเดียในการทำโครงการของข้าพเจ้า ซึ่งคำแนะนำของอาจารย์นำมาซึ่งความสำเร็จในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ยืมใช้เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 การดำเนินงาน	2
บทที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์และเซลล์แสงอาทิตย์	3
2.1 ประวัติความเป็นมา	3
2.2 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี	3
2.2.1 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก	6
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์	6
2.4 ทฤษฎีแถบพลังงาน	7
2.5 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.5.1 เซลล์แบบรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction solar cells)	10
2.6 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	11
2.6.1 กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current)	11
2.6.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open Circuit Voltage)	12
2.6.3.ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)	13
2.6.4 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency)	13
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์	14
2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	16
บทที่ 3 IEEE-488 (GPIB) และโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	19
3.1 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	19
3.2 การสร้างเครื่องวัดเซลล์แสงอาทิตย์	35
3.2.1 วงจรควบคุมอุณหภูมิและวงจรแหล่งจ่าย	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1	ภาคแหล่งจ่ายไฟ	35
3.2.2	วงจรควบคุมอุณหภูมิ	36
3.2.4	การออกแบบหัววัด	37
3.2.3	การนำวงจรควบคุมอุณหภูมิไปใช้งาน	37
3.3	ระบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การวัดค่าต่าง	39
3.3.1	GPIB BUS (IEEE-488)	39
3.3.2	รายละเอียดเกี่ยวกับ GPIB	42
3.3.3	บัสข้อมูล (Data Bus) จำนวน 8 สาย	42
3.3.4	สายสัญญาณควบคุม (Controller) จำนวน 5 สาย	42
3.4	ความหมายของสัญญาณต่างภายใน GPIB	43
3.4.1	กลุ่มสัญญาณข้อมูล	43
3.4.2	กลุ่มสัญญาณควบคุมการเชื่อมต่อ (Interfacing)	43
3.4.3	กลุ่มสัญญาณการรับส่งข้อมูล	43
3.4.4	การเปรียบเทียบ NI-488 กับ NI-488.2	43
บทที่ 4	การวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	44
4.1	หลักการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	44
4.1.1	หลักการวัดค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	44
4.1.2	Performing Linear Staircase Sweep	45
4.2	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	45
4.2.1	การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของผลของความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์	47
4.3	วิธีการการทดลอง	53
4.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	53
4.3.2	ขั้นตอนการทดลองการวัดแบบ Performing Linear Staircase Sweep	54
4.4	การทดลองระบบการวัด	55
4.4.1	การทดลองระบบการวัดแบบ 2 Wire	56
4.4.2	การทดลองวัดความเร็วแบบ 4 wire	59
4.5	สรุปผลการทดลอง	63
บทที่ 5	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	64
5.1	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

65

ภาคผนวก

กิติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้น โลก	4
รูปที่ 2.2 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง	4
รูปที่ 2.3 การแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะที่คำนวณจากอากาศต่างๆ	5
รูปที่ 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ (ก) ตัวนำ , (ข) ฉนวนและ (ค) สารกึ่งตัวนำ	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โฮ โม (Homo junction) และแผนภาพแถบพลังงาน	10
รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทโรแบบชนิดเอ็นบนพี	10
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป	11
รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	13
รูปที่ 2.10 ลักษณะวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	14
รูปที่ 2.11 อิทธิพลของความต้านทานขนานที่มีต่อสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	15
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของความต้านทานอนุกรมที่มีต่อสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	15
รูปที่ 3.1 เมื่อเปิดใช้งานครั้งแรก	20
รูปที่ 3.2 Front Panel และ Block diagram	20
รูปที่ 3.3 Icon และส่วนประกอบต่างของ Labview	21
รูปที่ 3.4 Flow Chat ของ Program	22
รูปที่ 3.5 Block Diagram และ Front panel ของ Program	23
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program	32
รูปที่ 3.7 กราฟที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	33
รูปที่ 3.8 ค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	33
รูปที่ 3.9 ค่า Log I-V ที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	34
รูปที่ 3.10 ค่าการ Save file ที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์	34
รูปที่ 3.11 วงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้งาน (ก) วงจรภาคจ่ายไฟ (ข) แหล่งจ่ายให้อุปกรณ์ทำความเย็น (ค) แหล่งจ่ายให้วงจรควบคุมอุณหภูมิ	35
รูปที่ 3.12 วงจรควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล	36
รูปที่ 3.13 การออกแบบขั้ววัดเซลล์แสงอาทิตย์	37
รูปที่ 3.14 การต่อใช้งานกับตัวทำความเย็น	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 เครื่องวัด I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์	38
รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อของระบบการวัดทั้งหมด	39
รูปที่ 3.17 ลักษณะของการ์ด GPIB	40
รูปที่ 3.18 ลักษณะสายสัญญาณที่ใช้ในระบบ GPIB	40
รูปที่ 3.19 สัญญาณที่ขาต่างๆของสายสัญญาณในระบบ GPIB	40
รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อแบบเรียงต่อกัน (Linear Configuration)	41
รูปที่ 3.21 การเชื่อมต่อแบบกระจาย (Star Configuration)	41
รูปที่ 4.1 วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้วัด	45
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	45
รูปที่ 4.4 ลักษณะวงจรมวลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	47
รูปที่ 4.5 กราฟ $\ln I-V$ และช่วงของพารามิเตอร์ที่สำคัญ	48
รูปที่ 4.6 รูปที่ 4.6 อิทธิพลที่มีผลต่อความต้านทานอนุกรมเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) อิทธิพลของ $I-V$ (ข) อิทธิพลของ $\ln I-V$	50
รูปที่ 4.7 อิทธิพลที่มีผลต่อความต้านทานขนานเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) อิทธิพลของ $I-V$ (ข) อิทธิพลของ $\ln I-V$	51
รูปที่ 4.8 อิทธิพลที่มีผลต่อ Saturation Current ของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) อิทธิพลของ $I-V$ (ข) อิทธิพลของ $\ln I-V$	52
รูปที่ 4.9 อิทธิพลที่มีผลต่อ Ideality Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) อิทธิพลของ $I-V$ (ข) อิทธิพลของ $\ln I-V$	53
รูปที่ 4.10 วิธีการต่อแบบต่างๆ (ก) 4 Wire และ (ข) 2 Wire	54
รูปที่ 4.11 เครื่อง Solar Simulator ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ตัวกำเนิดแสง (ข) ตัวควบคุม	54
รูปที่ 4.12 วิธีการเชื่อมต่อกับระบบต่างๆ	55
รูปที่ 4.13 การต่อแบบ 2 Wire และ 4 Wire	55
รูปที่ 4.14 การวัดแบบ 2 Wire และ 4 Wire	56
รูปที่ 4.15 ระบบการวัดแบบ 2 wire ที่ความเร็วระดับต่างๆ	58
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I-V$ ขณะมีแสงตกกระทบเซลล์	58
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I-V$ ขณะมีแสงตกกระทบเซลล์	59
รูปที่ 4.18 ผลการทดลองวัดความเร็ว (ก) วัดความเร็วที่ FAST (ข) วัดความเร็วที่ MED (ค) วัดความเร็วที่ NORMAL (ง) วัดความเร็วที่ HI ACCURACY	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I และ V ขณะที่มีแสงตกกระทบ	62
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ และ V ขณะที่มีแสงตกกระทบ	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิกอนซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 1954 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการใช้งานในยานอวกาศ ค.ศ.1958 และเมื่อเกิดเหตุการณ์วิกฤตน้ำมันในทศวรรษที่ 1970 ความต้องการเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละปีก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจน ค.ศ. 2003 ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกรวมกันได้ประมาณ 744 เมกะวัตต์(MW)เพิ่มขึ้นจากปี 2002 เป็น 32.4%และปริมาณต้นทุนผลิตก็ได้ลดลงเหลือประมาณ 3-4 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์แล้ว

ส่วนในประเทศไทยในด้านของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนให้มากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และการแปรรูปจากมูลฝอย ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์(Solar Cell) ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทันทีที่มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันที และไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (Renewable Energy)ที่เป็นที่ยอมรับกันว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำลายสภาพแวดล้อมเพียงแต่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ตรงกลางแสงอาทิตย์ก็สามารถใช้ได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวและไม่เคยปรากฏว่ามีการคัดค้านการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้แสงอาทิตย์เท่านั้น จึงเป็นการประหยัดน้ำมันซึ่งเป็นพลังงานที่มนุษย์ได้มาฟรีและไม่สิ้นสุด อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี ดังนั้นต้นทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในนโยบายผลิตพลังงานทดแทนของประเทศไทยและเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนอื่นๆ ที่มีการค้นคว้าในประเทศไทย เช่น พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ ปรากฏเป็นที่ชัดเจนว่า เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น มีการใช้ในหมู่บ้านที่ห่างไกลที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าส่งไปถึง ใช้ในระบบสื่อสารถ่ายทอดสัญญาณโทรศัพท์หรือใช้ในการทหาร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าปัจจุบันราคาของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงจากอดีตแต่ก็ยังคงสูงมากทั้งนี้เนื่องจากปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ทำจากซิลิคอนประเภท Single และ Polycrystalline เกือบ 90% และเนื่องจากซิลิคอนเป็นวัสดุหลักที่นำมาใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงทำให้ปริมาณราคาของซิลิคอนค่อนข้างสูง ทำให้ราคาต้นทุนของแผ่นซิลิคอนสูง

สาเหตุที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำแผ่นซิลิคอนมีราคาสูงนั้นก็เนื่องมาจากซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Absorption coefficient) ที่ไม่สูงดังนั้นในการดูดกลืนแสงให้ได้ทั้งหมดจะต้องใช้ซิลิคอนที่มีความหนาอย่างมากอย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จึงได้มีการศึกษาวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง เช่น a-si, cdTe และ Cu(InGa)se_2 :7 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Absorption coefficient)สูงๆ จึงทำให้ฟิล์มบางนั้นมีความหนาเพียงแค่ 1-10 μm เท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังสามารถปลูกผลึกบนแก้ว ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต่ำกว่าชนิดบิลล์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อพัฒนาระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยอัตโนมัติ
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชั้นบัฟเฟอร์ CdS ตลอดจนสร้างหัววัดและเครื่องควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสเพื่อความแม่นยำในการวัดเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 การดำเนินงาน

ในการดำเนินงานเริ่มจากการพัฒนาโปรแกรมระบบการวัดประสิทธิภาพผ่านระบบบัส IEEE-488(GPIB) เพื่อใช้วัดคุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดจนนำค่าที่วัดได้มาคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยใช้หลักการวัดแบบ Linear Staircase Sweep กล่าวคือ การอ่านและรับส่งข้อมูลเพียงครั้งเดียวซึ่งจะทำให้มีความรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ตลอดจนยังสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อความแม่นยำในการวัดเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์จากกราฟคุณสมบัติ I-V ที่วัดได้

บทที่ 2

พลังงานแสงอาทิตย์และเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 ประวัติความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยคุณสมบัติที่เรียกว่า “ ผลของโฟโวลตาอิก” (Photovoltaic Effect) ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยนาย Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดมีแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแสงตกกระทบ และในปี ค.ศ. 1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสารซีลีเนียม (Selenium)

เมื่อปี ค.ศ. 1941 เริ่มที่จะมีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown Junction เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนส่วนพัฒนางานของเซลล์แสงอาทิตย์ จนกระทั่งในปี ค.ศ.1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell Telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-เอ็น ของผลึกซิลิกอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ โดยในครั้งแรกนี้ได้มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

ตั้งแต่ ค.ศ. 1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์และการลดค่าต้นทุนในการสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน จึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวางจนกระทั่งในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานได้สูงราว 20% ดวงอาทิตย์เป็นก๊าซที่ร้อน

2.2 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

จัดและกำลังเผาไหม้ โดยปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ฟิวชัน ดังนั้นจึงมีรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกมาตามกฎการแผ่รังสี พลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์กับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้เราเรียกว่า Solar constant หรือการแผ่รังสีของอากาศนอโลกที่นิยมเรียกกันแบบ Air mass zero (AM 0) ซึ่งการแผ่รังสีแบบ AM 0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ 135 mW/m^2 สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น O_2 , O_3 และ ไอน้ำ CO_2 เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลงและองค์การนาซ่า(NASA)แห่งสหรัฐอเมริกา เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกและกำหนดกันว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ Air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mass 1 (AM1) คือค่าของแสงอาทิตย์ตั้งฉากกับผิวโลกระดับน้ำทะเล ค่าของพลังงานค่านี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆอาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

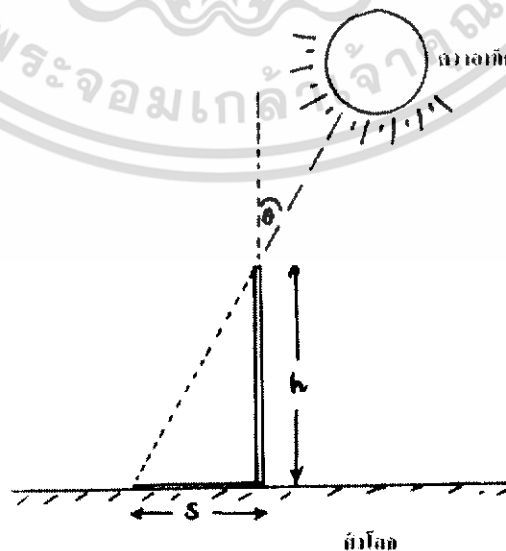
$$\text{Air mass} = \frac{1}{\cos \theta} = \sec \theta \quad (2.1)$$

มุม θ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ ทำกับทิศตั้งฉากกับ โลกเป็นมุม 60°

ตัวอย่างการหาลักษณะการแผ่รังสีทำได้ง่ายๆ โดยการพิจารณาเงาของวัตถุที่มีความสูง h วางอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับผิวโลก ดังแสดงรูปที่ 2.2 ถ้าหากความยาวของเงาที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.1 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก



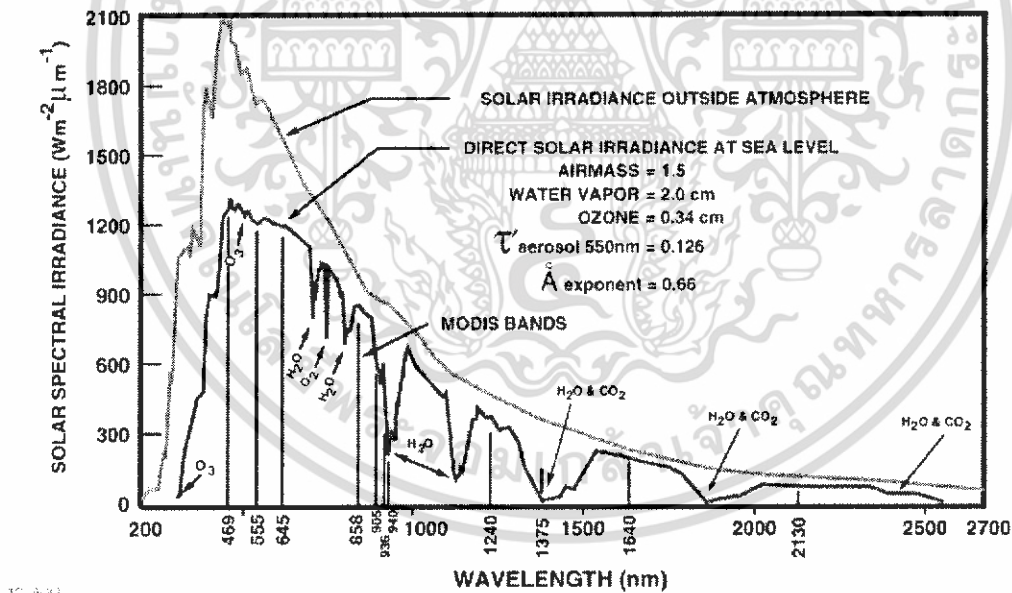
รูปที่ 2.2 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 ถ้าพิจารณา S ดังนั้นค่าของ Air mass หาได้โดย

$$\text{Air mass} = \sqrt{1 + \left(\frac{S}{h}\right)^2} \quad (2.2)$$

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มาถึงยังผิวโลกก็ยิ่งจะมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่ง คือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 โดยแสงอาทิตย์ทำมุม 41.8 องศาทำมุมกับแกนตั้งฉากกับผิวโลก ซึ่งค่าพลังงานรวมทั้งหมดมีค่า 100 mW/cm^2 ในห้องปฏิบัติการหรือในโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มักจะใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์หรือที่เรียกกันว่า Solar simulator ซึ่งเครื่องจำลองแสงอาทิตย์จะจำลองแสงของ AM1.5 โดยใช้แสงจากหลอดไฟผ่านฟิวเตอร์หลายๆชั้น กราฟแสดงความหนาแน่นของพลังงาน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวคลื่นค่าต่างๆในแสงอาทิตย์แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะ ที่ค่ามวลอากาศต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสงหรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวโลกจะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

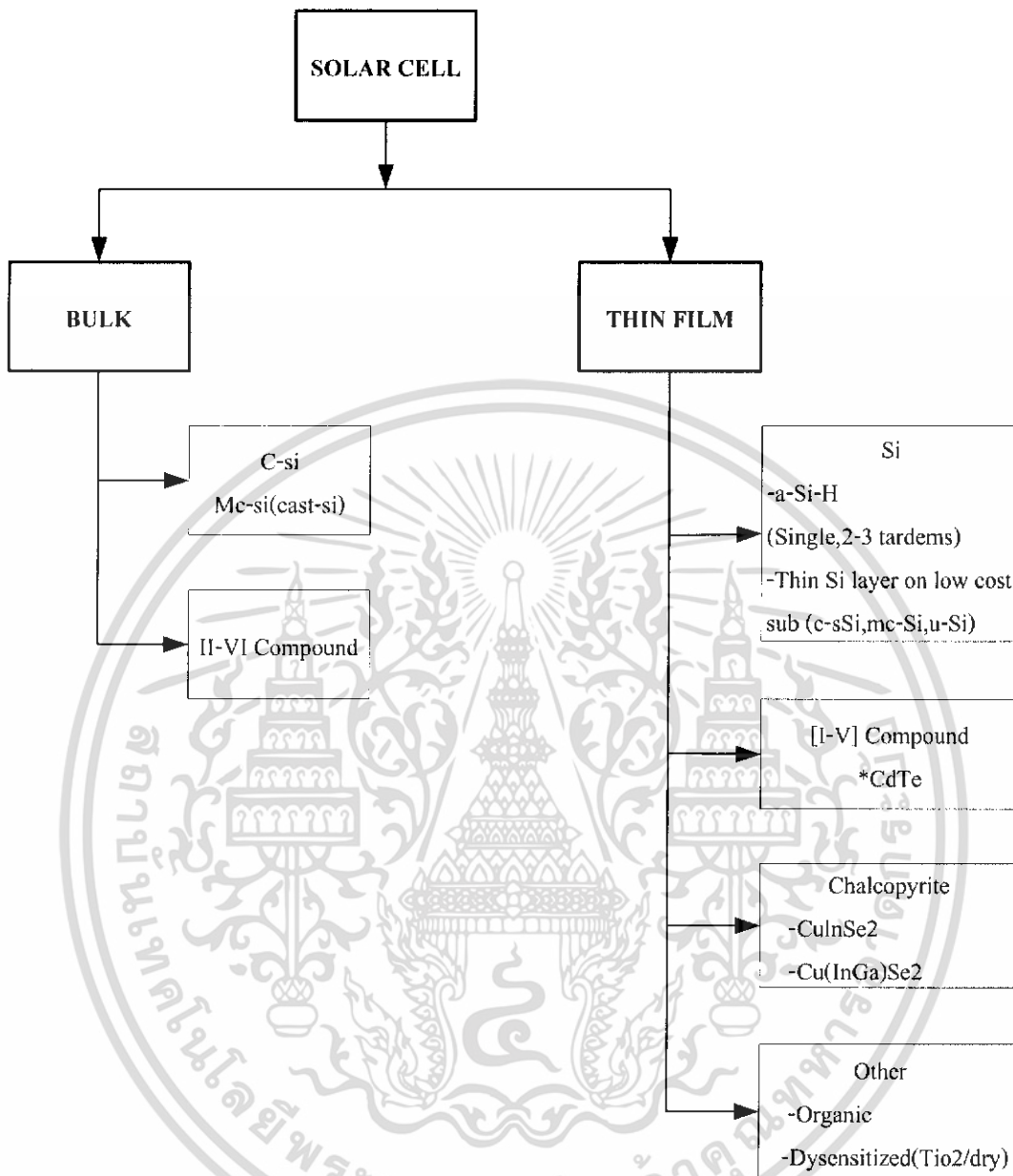
1. Direct sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์โดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย หรือ Indirect or Diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลกประมาณกันว่า แม้แต่วันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งวันที่เมฆหมอกปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้ก็จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงแบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อนและการแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้วลักษณะการแผ่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายนี้มีค่าเพิ่มยิ่งขึ้นด้วย

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดบัลค์ (bulk) และชนิดฟิล์มบาง (thin-film) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์ส่วนมากทำซิลิคอน (Si) เนื่องจากซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ที่ไม่สูงมากนักดังนั้นในการดูดกลืนแสงให้ได้ทั้งหมดจะต้องใช้ซิลิคอนที่มีความหนามาก ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูงๆ จึงทำให้ฟิล์มบางนั้นมีความหนาที่ไม่มาก ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังสามารถปลูกผลึกบนแก้ว ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต่ำกว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์



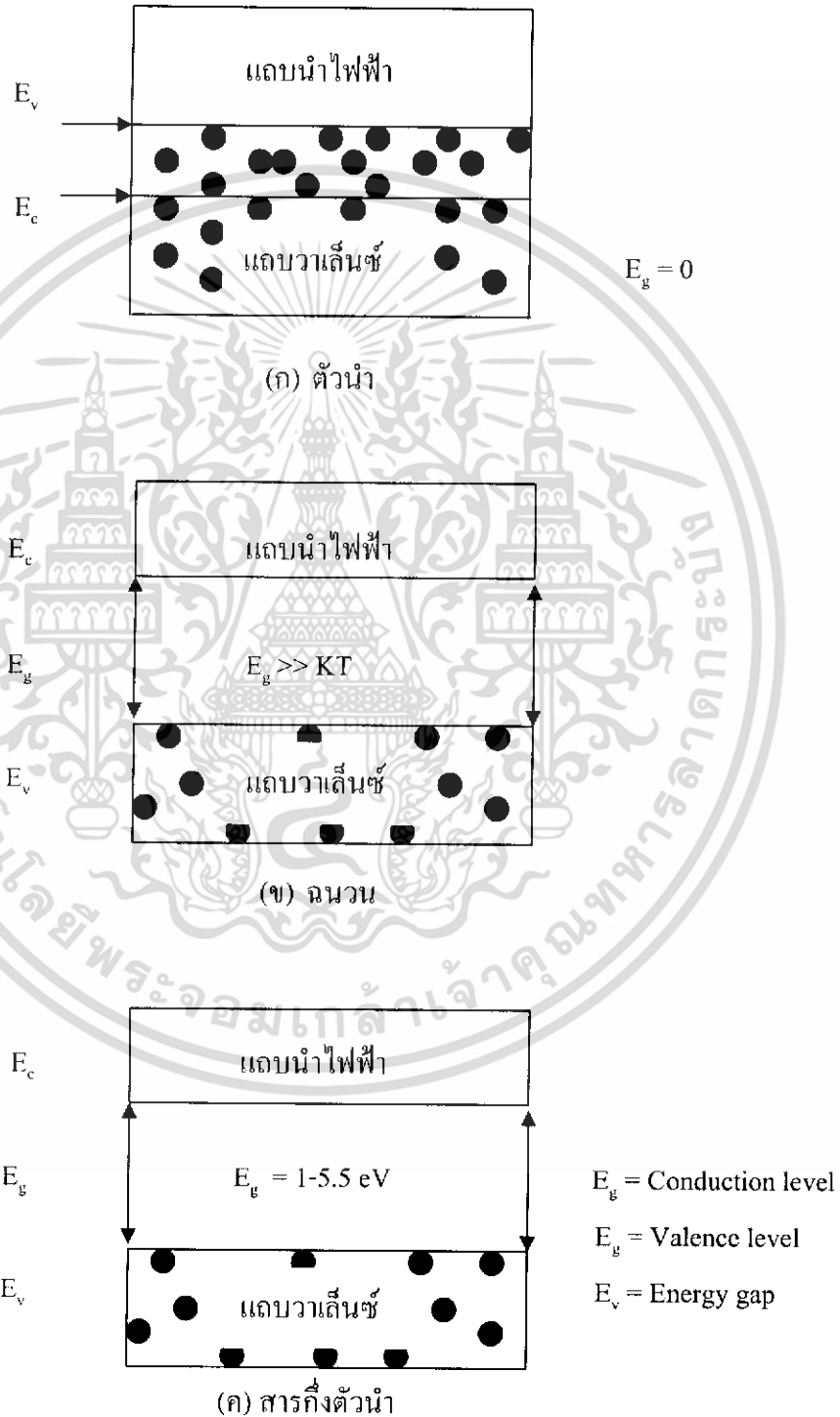
รูปที่ 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 ทฤษฎีแถบพลังงาน

ทฤษฎีแถบพลังงานได้ถูกนำมาเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ทฤษฎีแถบพลังงานได้แบ่งแถบพลังงานออกเป็น 2 แถบคือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบความนำ (Conduction band) ในแถบวาเลนซ์จะมีระดับพลังงานต่างๆ อยู่มากมาย แต่ละระดับจะมีอิเล็กตรอนประจำอยู่โดยไม่มีพลังงานว่างอยู่เลยจึงไม่เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนขึ้น ส่วนในแถบความนำจะมีระดับพลังงานที่ว่างอยู่มากมายอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำจึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า ช่องว่างพลังงาน(Energy gap) อิเล็กตรอนที่ข้ามจากแถบวาเลนซ์มายังแถบความนำจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ อิเล็กตรอนส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดสภาพความนำขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ (ก) ตัวนำ , (ข) ฉนวนและ (ค) สารกึ่งตัวนำ

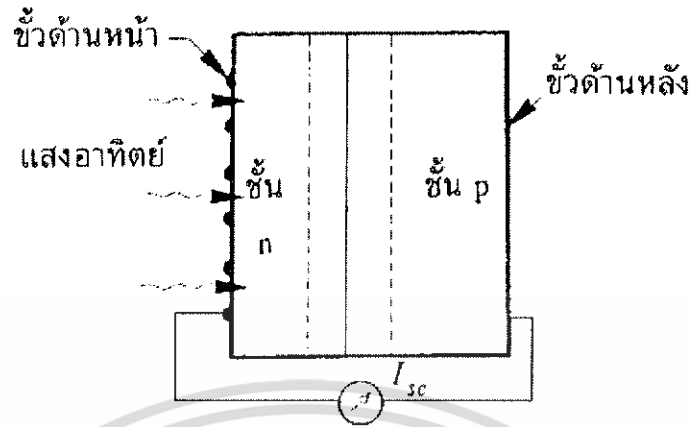
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของตัวนำ, สารกึ่งตัวนำและฉนวน ในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ในแถบความนำของตัวนำมีทั้งระดับพลังงานที่ว่างและระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนประจำอยู่อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ไปสู่พลังงานที่ว่างได้ง่าย เนื่องจากขนาดช่องว่างพลังงานของวัสดุตัวนำจะมีค่าน้อยมากหรือโลหะบางชนิดอาจไม่มีช่องว่างพลังงานเลย เมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกเพียงเล็กน้อยตัวนำจึงมีความนำสูง ส่วนฉนวนในแถบความนำจะมีแต่เพียงระดับพลังงานที่ว่างเท่านั้นทั้งยังมีช่องว่างพลังงานที่กว้างมาก อิเล็กตรอนที่จะทำให้เกิดสภาพความนำขึ้นจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะข้ามแถบวาเลนซ์มายังแถบความนำได้ ด้วยเหตุนี้ฉนวนจึงมีสภาพความนำที่ต่ำมาก สำหรับสารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างพลังงานไม่กว้างมากนักซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจึงสามารถเกิดสภาพความนำขึ้นได้ถ้าได้รับพลังงานจากภายนอกอย่างเช่น พลังงานความร้อนหรือพลังงานแสงที่มีค่าสูงกว่าช่องว่างพลังงานมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานนี้ได้

2.5 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่ได้รับแสง เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมานี้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้านี้สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีหรือผ่านอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อน (Inverter) การใช้งานถ้าต้องการให้ได้กระแสไฟฟ้ามากๆ ทำได้โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่อขนานกัน ถ้าต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงๆทำได้โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่ออนุกรมกัน

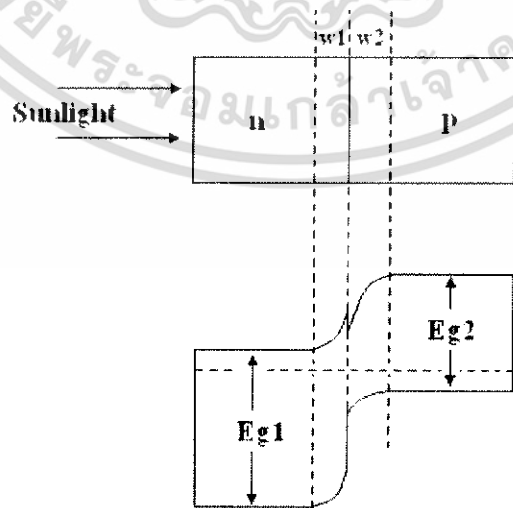
ขณะที่แสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าชนิดประจุลบและประจุบวกขึ้นซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อ p -n จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบและแยกโฮลไหลไปที่ขั้วบวก ด้วยเหตุนี้ทำให้ศักดาไฟฟ้าขึ้นที่ทั้งสอง และเมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (เช่นหลอดแสงสว่าง มอเตอร์กระแสตรง ฯลฯ) ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโฮโม (Homo junction) และแผนภาพแถบพลังงาน

2.5.1 เซลล์แบบรอยต่อเฮเทโร (heterojunction solar cells)

รอยต่อที่เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาต่อกันเรียกว่า รอยต่อเฮเทโร (heterojunction solar cell) และถ้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนั้นมีพาหะชนิดเดียวกัน เช่น รอยต่อ n-n และ p-p เรียกว่า รอยต่อชนิดไอโซรอยต่อเฮเทโร แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทโรแบบชนิดเอ็นบนพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

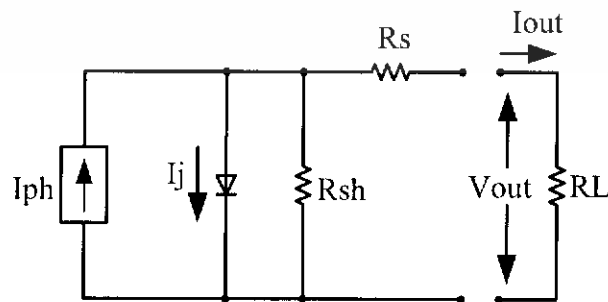
แสงซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า energy gap 1 (E_{g1}) แต่สูงกว่า energy gap 2 (E_{g2}) จะผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกกลายเป็นหน้าต่างและถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำตัวที่สอง พายุที่เกิดขึ้นในบริเวณของการพ่องภายในระยะไม่เกินความยาวของการแพร่ของรอยต่อจะถูกกักเก็บและรวบรวมไว้ เช่นเดียวกับเซลล์แบบรอยต่อโฮโม แสงที่มีพลังงานสูงกว่า E_{g1} จะถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำตัวแรก พายุที่เกิดขึ้นในช่วงไม่เกินความยาวของการแพร่จากรอยต่อหรือในบริเวณของการพ่องก็จะถูกรวบรวมไว้เช่นกัน เซลล์แบบรอยต่อเฮเทโรโรได้เปรียบเหนือกว่าแบบรอยต่อโฮโม ดังนี้

1. จำนวนเซลล์แบบรอยต่อเฮเทโรโรมีมากกว่าแบบรอยต่อแบบโฮโมในแง่ของการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำได้หลายตัว
2. จุดเด่นของโครงสร้างเซลล์แบบรอยต่อเฮเทโรโร คือ แสงสามารถผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบกว้าง (โดยไม่ถูกดูดกลืน) และไปถูกดูดกลืนที่ฐานซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบแคบ ส่วนนี้จะช่วยเพิ่มการตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับความยาวคลื่นต่ำ (พลังงานสูง) ซึ่งจะสามารถลอดผ่านหน้าต่างเข้าไปและถูกดูดกลืนใกล้รอยต่อได้มากที่สุด (E_{g} ต้องสูงพอด้วย) โดยปกติในเซลล์แบบรอยต่อแบบโฮโม โฟตอนพลังงานสูงมักจะถูกดูดกลืนบริเวณผิวหน้าซึ่งมักเกิดการรวมตัว (Recombination) ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพลดลง
3. มีความต้านทานอนุกรมต่ำกว่า ถ้าหากสารกึ่งตัวนำตัวแรกนี้ได้รับการโต้ปามากๆ โดยที่ไม่กระทบสมบัติในการให้แสงผ่านตัวมัน
4. ทนทานต่อรังสีได้ ถ้าหากใช้สารกึ่งตัวนำตัวแรกมีขนาดค่อนข้างหนารวมทั้งมีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง

2.6 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.1 กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจร เราเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current : I_{sc})



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามีด I และแรงดันไฟฟ้า V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพมีดจะมีรูปเหมือนกับสมการของกระแสไฟฟ้าของไดโอด คือ

$$I_j = I_0(e^{nkT/qV} - 1) \quad (2.3)$$

โดยที่ I_j คือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อ p-n ขณะไม่มีแสง

I_0 คือกระแสไฟฟ้าอิมิตัว และ n (Ideality factor) เป็นค่าที่แสดงให้รู้ว่ารอยต่อมีความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด ในทางอุดมคติจะถือว่า $n=1$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลออกสู่วงจรภายนอกจะเท่ากับผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้ามีด I และ กระแสไฟฟ้าโฟโต I_{ph} ดังนี้

$$I_{out} = I - I_{ph} \quad (2.4)$$

โดยที่ I_{ph} = กระแสไฟฟ้าโฟโต

I_{out} = กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกสู่วงจรภายนอก

I = กระแสไฟฟ้ามีด

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

$$I_{out} = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right) - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \right) \quad (2.5)$$

2.6.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open Circuit Voltage)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรมืด (open circuit) แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (open circuit voltage : V_{oc}) ค่า V_{oc} คำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยแทน $I_{out} = 0$ ดังนั้นจึงได้ว่า

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ I_{sc} = กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

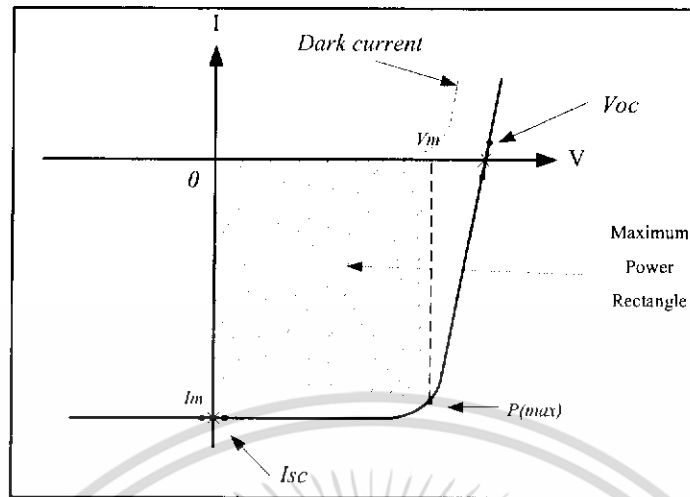
I_{max} = กระแสไฟฟ้าสูงสุด

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด

V_{max} = แรงดันไฟฟ้าสูงสุด

P_{max} = กำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.9 แสดงลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้าคือกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังสูงสุด P_{max} (maximum power) ที่เราได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟลักษณะสมบัตินี้แสดงด้วยเส้นไขว้ปลา

2.6.3. ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)

ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor) เขียนย่อว่า FF คืออัตราส่วนของ พื้นที่ของ $V_{max} \times I_{max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} \times I_{sc}$ และสามารถเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.7)$$

ถ้าความต้านทานอนุกรม R_s ในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ฟิลล์แฟกเตอร์ FF มีค่ามากขึ้น

2.6.4 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency)

คืออัตราส่วนของกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อาจเรียกสั้นๆว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สัญลักษณ์ว่า η เขียนเป็นสูตรได้ว่า

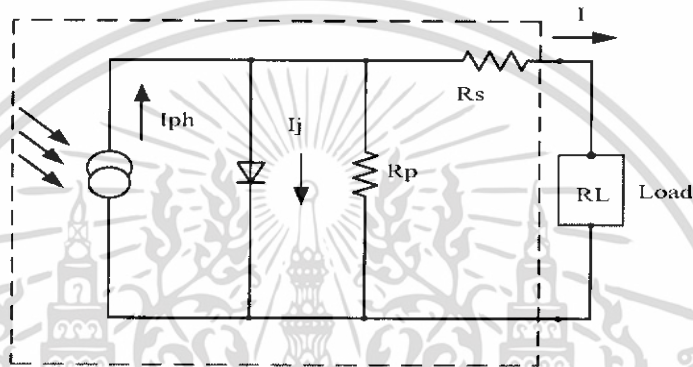
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}} \times \text{Area}} \times 100\% = \frac{V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \times \text{FF}}{P_{\text{in}} \times \text{Area}} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ

P_{in} คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ

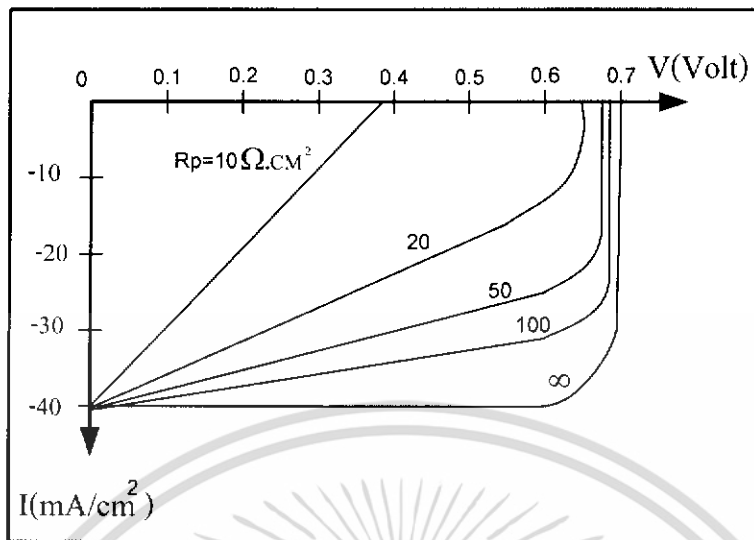
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์



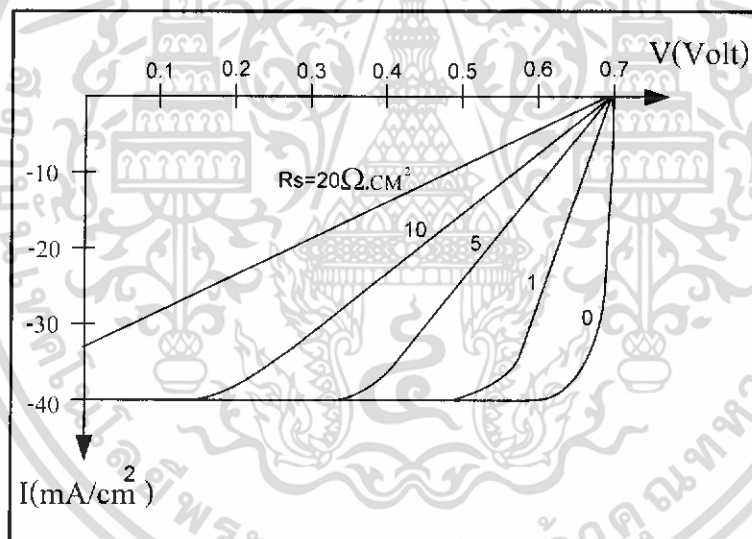
รูปที่ 2.10 ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งานดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ากระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (Current Source) I_{ph} ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในทางอุดมคติ I_j และค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance) R_s เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพีและเอ็น ค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ไต่ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมดเขียนตัวย่อได้เป็น R_s , ค่าความต้านทานขนาน (Parallel resistance หรือ Shunt resistance) R_p เป็นค่าความต้านทานสมมูลที่ขนานกับรอยต่อในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ ในทางอุดมคติค่าของ R_p จะมีค่าเป็นอนันต์ และในเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของความต้านทานขบวนการที่มีต่อสมบัติโหนดฟูกของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของความต้านทานอนุกรมที่มีต่อสมบัติโหนดฟูกของเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ดีโดยทั่วไปแล้วจะพบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานค่าความต้านทานขบวนการ R_p จะมีค่าสูงพอที่จะไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง , การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ขณะที่ค่า R_p สูงขึ้น พลังงานสูงสุดซึ่งเซลล์จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์ค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่ไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง , การสร้างจึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s ซึ่งถ้าคิดที่ $R_s = 0$ และ ได้กระแส ออกมาดังนี้

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) - I_p \quad (2.9)$$

ซึ่งถ้า $R_s > 0$ และ $R_p < \infty$ แล้วแรงดัน V_0 ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตกคร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ IR_s ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆจะมีค่าดังนี้

$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)} = V_0 - IR_s$$

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (2.10)$$

2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงๆนั้น เซลล์แสงอาทิตย์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแสของกระแส I ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในสมการที่ (2.11) จะพบว่ากระแส I นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสซึ่งมาจากแสง I_{ph} และกระแส I_0 ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{ph} กระแส I_{ph} ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$I_{ph} = qgA(L_c + W + L_n) \quad (2.11)$$

โดยที่ g คือ อัตราเกิดกระแสเนื่องมาจากแสง (Generation)

L_c, L_n คือ ระยะการแพร่ (Diffusion length)

W คือ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

เนื่องจาก I_p แปรผันตาม g และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ g และ L จากสมการ

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะ(Diffusion coefficient) สำหรับที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้นจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะน้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ τ (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณาซึ่งก็พบว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้นจะมีผลต่ออายุของพาหะน้อยมากเช่นกัน

องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ I_p ก็คือค่าอัตราการผลิตของกระแส g โดยพบว่าค่า g จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทั้งนี้ก็เนื่องจากช่องว่างพลังงานของสารจะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลอันนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในช่วง 20 – 70 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า g น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_p จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_j เมื่อพิจารณาค่าของ I_j ในสมการที่(2.3) ซึ่ง I_j มีค่าดังนี้

$$I_j = I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.13)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_j มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนี้

$$I_0 = Aqn_i^2 \left(\frac{D_c}{N_A L_c} + \frac{D_h}{N_D L_h} \right) \quad (2.14)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_0 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่างสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = KT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2.15)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างเอกโพเนนเชียลเป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_j จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่ได้จากสมการเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ (2.6) ซึ่งได้แสดงไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง 62728 อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (2.16)$$

จากสมการนี้ค่า $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจาก $\frac{kT}{q}$ มีค่าต่ำมาก ดังนั้น ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} , และ P_0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

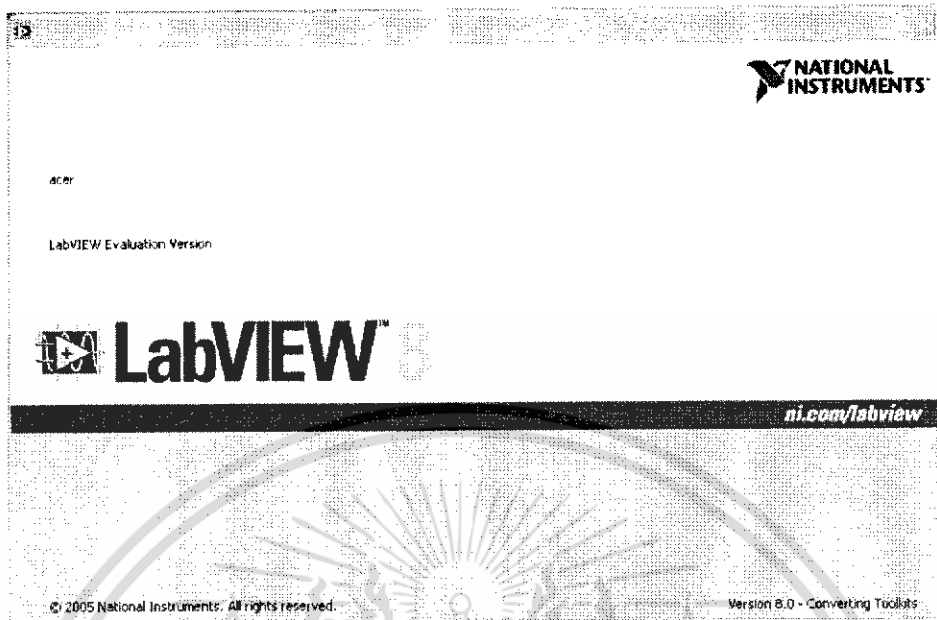
การสร้างโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพและเครื่องวัดของเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

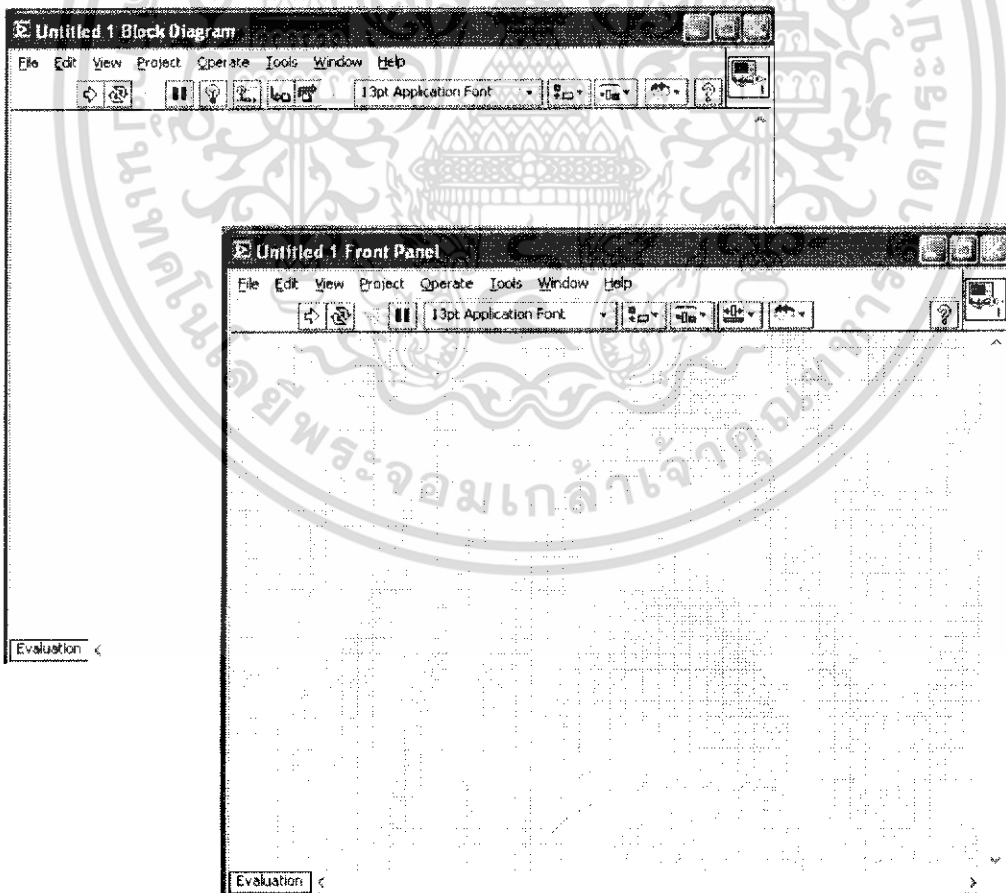
จากการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และการวัดสภาพด้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่าถ้าทำการวัดทีละค่าเพื่อเก็บข้อมูลและนำมาคำนวณนั้น จะใช้เวลาพอสมควร จึงได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และวัดสภาพด้านทานอนุกรมและขนาน โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคือ โปรแกรม Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

โปรแกรม Labview เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้อยู่ในรูปแบบของรูปภาพ ตัวโปรแกรมจะใช้ระบบคำสั่งพีชคณิตและรูปภาพแทนฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ซึ่งไม่เหมือนกับโปรแกรมที่ใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ในการเขียน ซึ่งรูปภาพและคำสั่งที่นำมาใช้จะเป็นรูปแบบที่คุ้นเคยในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม และตัวโปรแกรมยังสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลายมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น GPIB , VXI , RS-232 , RS-485 , Internet เป็นต้น และสามารถเก็บค่าและคำนวณได้อย่างหลากหลาย ซึ่งตัวโปรแกรมมีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. Front Panel เพื่อให้ผู้ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและเป็นส่วนที่ใช้สั่งให้โปรแกรมที่เราเขียนทำงาน
2. Block Diagram เป็นเสมือนส่วนควบคุมการทำงานของ โปรแกรม ซึ่งเป็นส่วนที่เราเขียนขึ้นมา
3. Icon และ Connector เป็นองค์ประกอบที่เรานำมาเขียนโปรแกรมให้ทำงานตามที่เราต้องการ

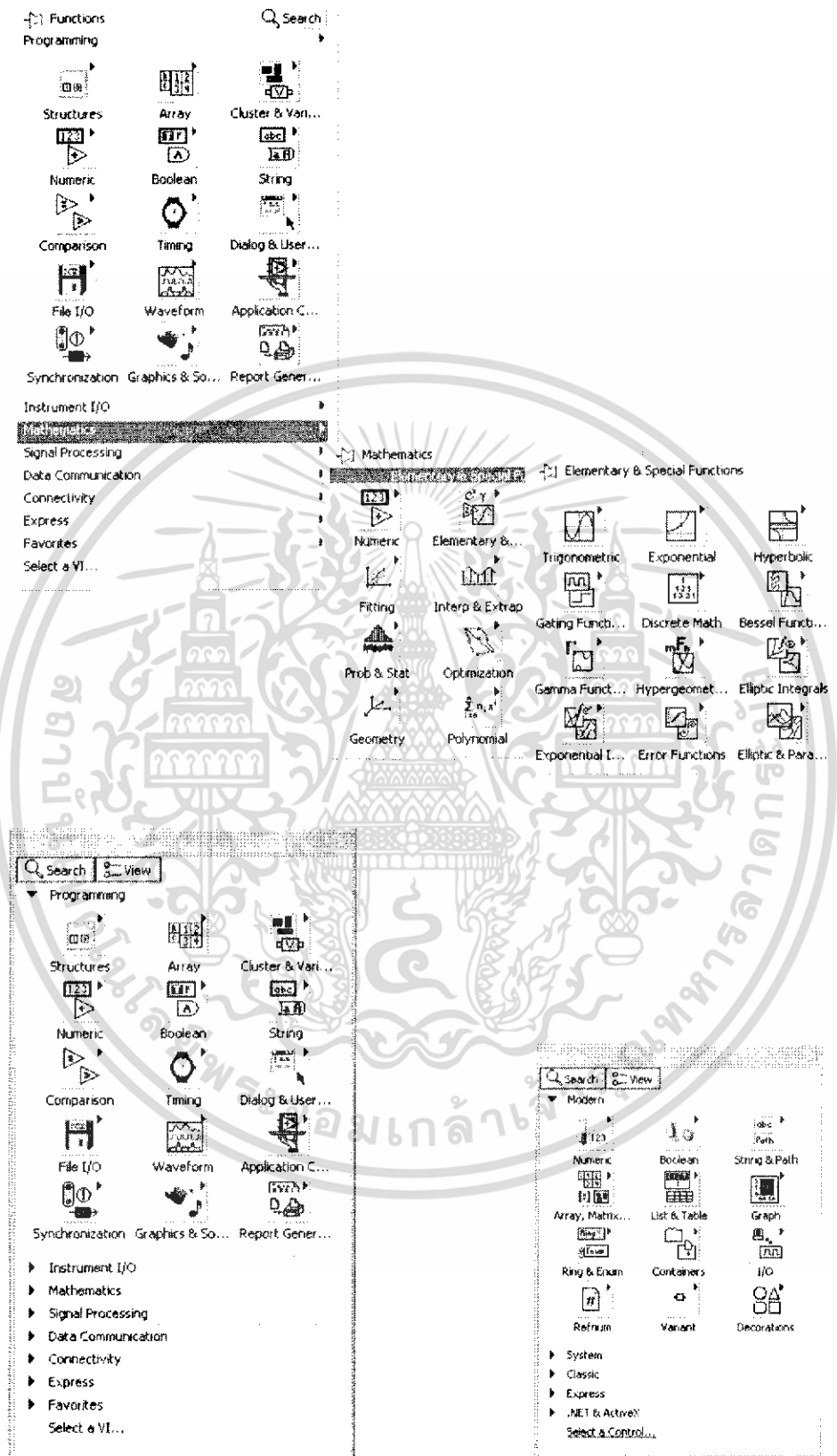


รูปที่ 3.1 เมื่อเปิดใช้งานครั้งแรก



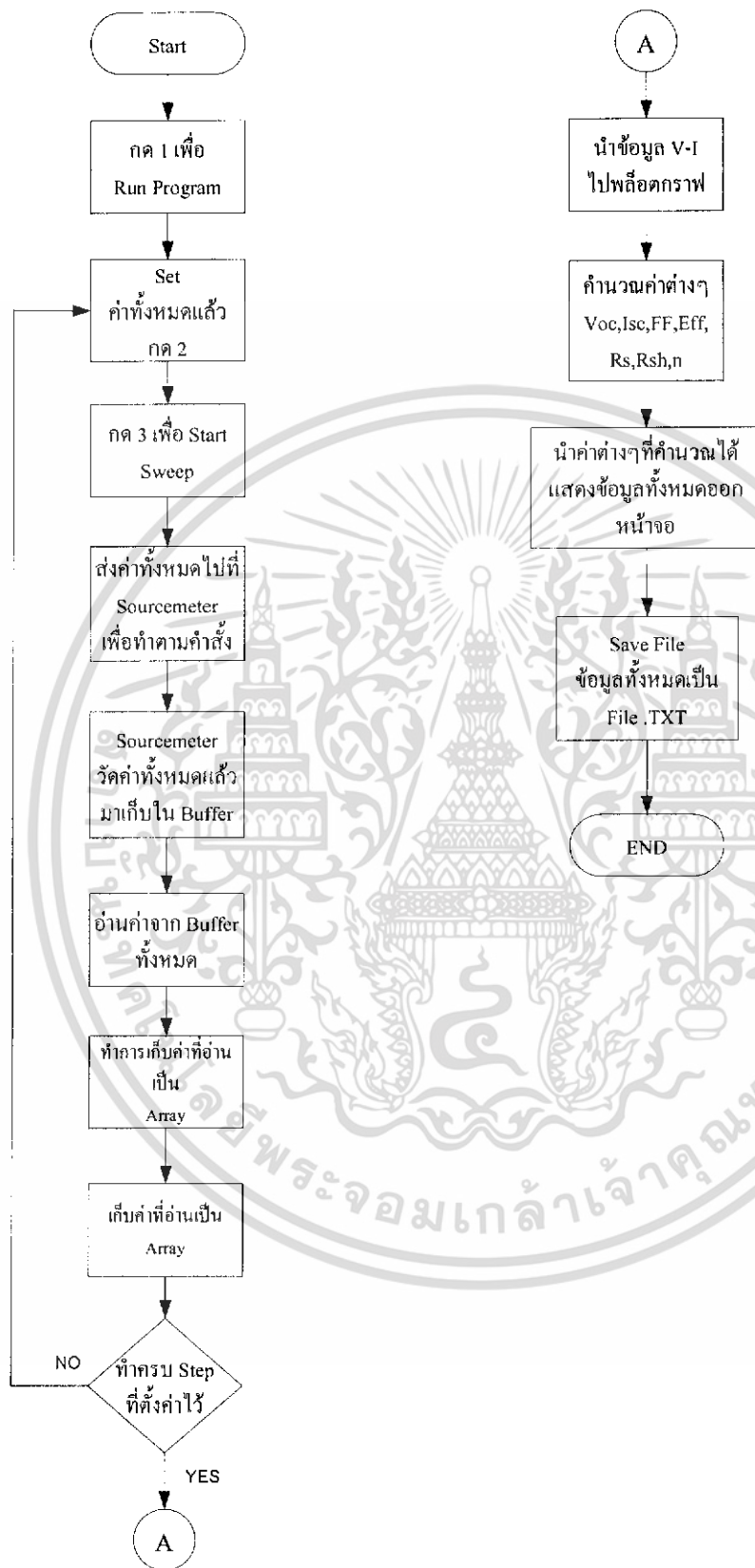
รูปที่ 3.2 Front Panel และ Block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Icon และส่วนประกอบต่างของ Labview

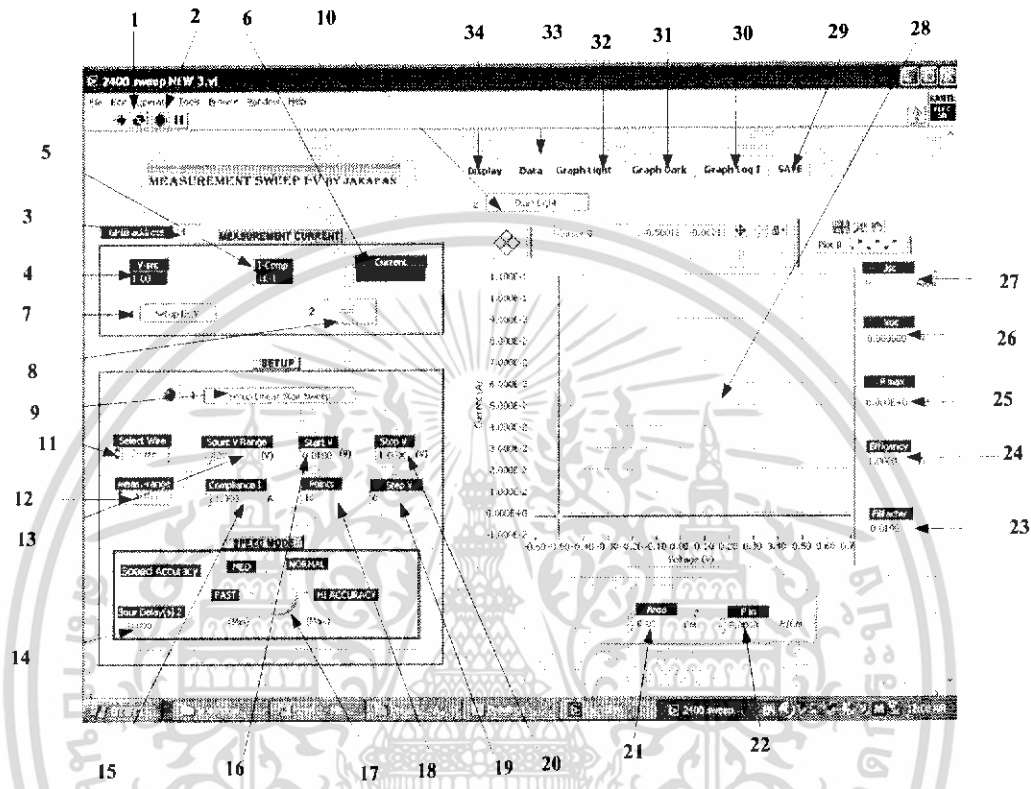
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Flow Chat ของ Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดง Program วัดประสิทธิภาพโดยได้ทำการวัดค่าของ Solar Cell จริงซึ่งแสดงได้ดัง รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Block Diagram และ Front panel ของ Program

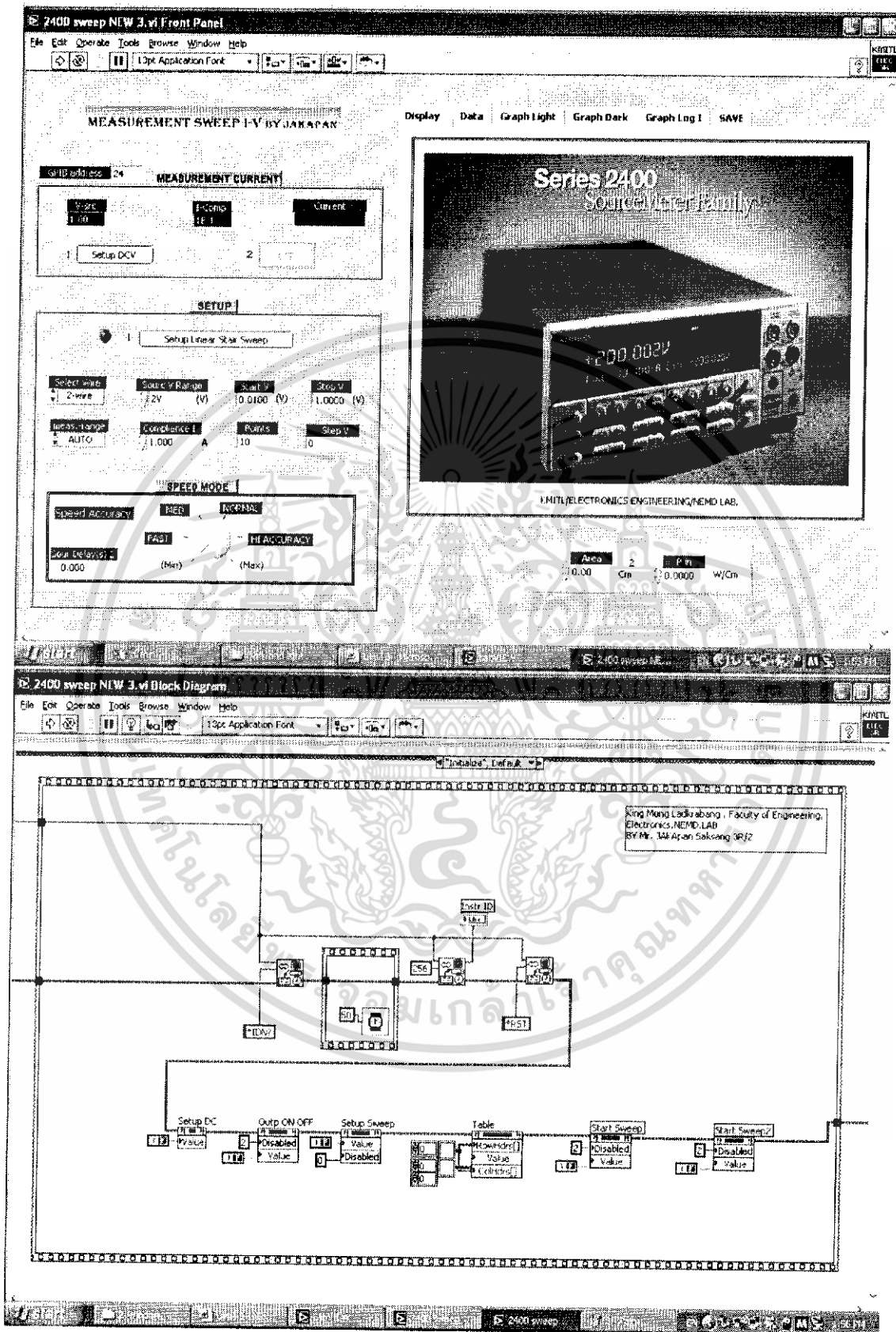
จากรูปที่ 3.10 สามารถอธิบาย (ตามหมายเลข)

- (1) Click Run Continuous ที่ Toolbar เพื่อให้โปรแกรมทำงานวนซ้ำ
- (2) Click Stop ที่ Toolbar เพื่อหยุดการทำงาน
- (3) ระบุหมายเลขเครื่องที่จะติดต่อด้วย
- (4) กำหนดแหล่งจ่ายแรงดัน
- (5) กำหนดแหล่งจ่ายกระแส
- (6) แสดงผลกระแสที่วัดได้
- (7) Setup ค่าแรงดัน DC ที่กำหนดไว้
- (8) สั่ง ON เพื่อทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า
- (9) Setup ค่าต่างๆเพื่อทำการ Run แบบ Sweep

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

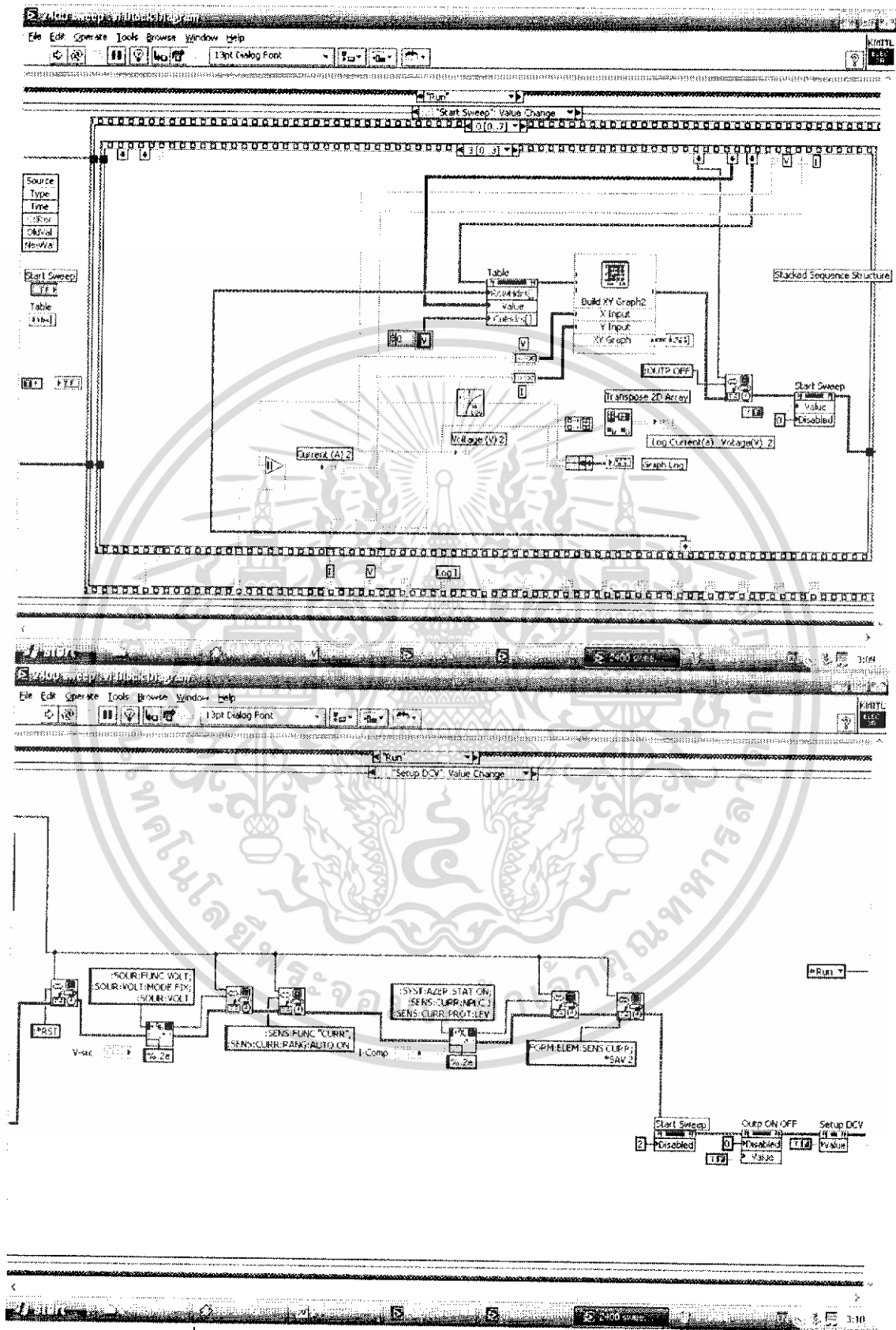
- (10) เริ่มทำการวัดหลังจากเสร็จค่าเสร็จแล้ว
- (11) กำหนดระบบการวัดว่าจะเป็นแบบ 2 wire หรือ 4 wire
- (12) เลือกย่านวัดของกระแสแบบ Sweep ในที่นี้จะ Set เป็น Auto ไว้
- (13) เลือกย่านวัดของแรงดัน
- (14) ปรับ Delay เมื่อต้องการเพิ่มระยะเวลาในการวัดให้นานกว่า Speed
- (15) กำหนดค่ากระแสในการวัดแบบ Sweep
- (16) กำหนดค่าแรงดันเริ่มต้นที่จะทำการวัดค่า
- (17) เลือก Mode Speed เพื่อต้องการวัดที่ความเร็วต่างๆ
- (18) กำหนดความละเอียดของจุดที่ทำการพล็อตกราฟ
- (19) แสดงค่าของ Step ในการวัด
- (20) กำหนดค่าแรงดันสุดท้ายในการวัดค่า
- (21) ค่าพื้นที่ของแสงที่ตกกระทบบ
- (22) กำลังงานของแสงที่ตกกระทบบ
- (23) แสดงค่า Fill factor
- (24) แสดงค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
- (25) แสดงค่ากำลังงานสูงสุด
- (26) แสดงค่าแรงดันเปิดวงจร
- (27) แสดงค่ากระแสลัดวงจรต่อพื้นที่
- (28) กราฟแสดงผลที่วัดได้
- (29) เลือก Save file แบบ Notepad
- (30) แสดงกราฟ Log I - V
- (31) แสดงกราฟในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบ
- (32) แสดงกราฟในขณะที่มีแสงตกกระทบบ
- (33) แสดงข้อมูลการวัดทั้งขณะมีแสงและไม่มีแสงตกกระทบบ
- (34) รูปเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



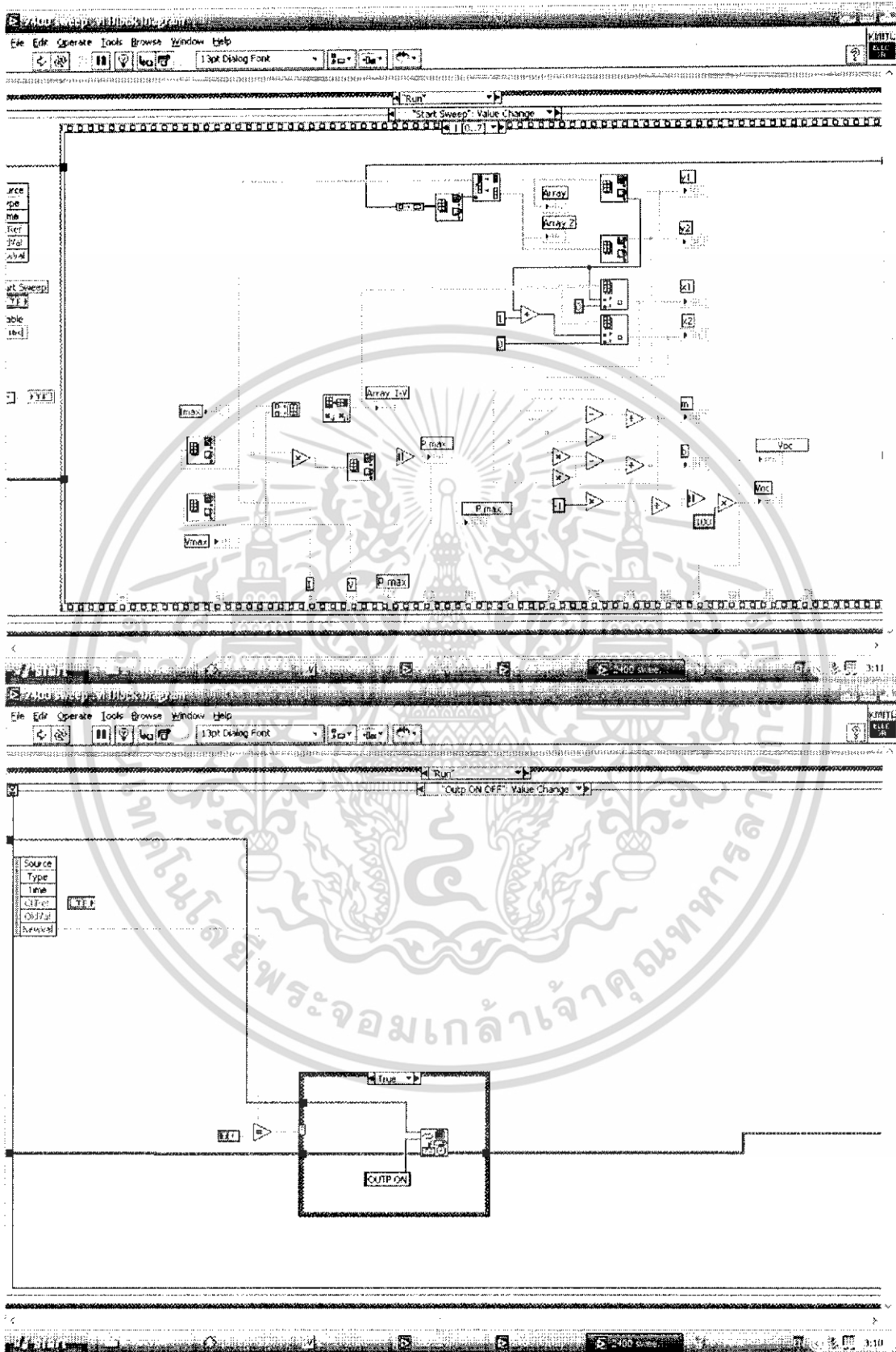
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



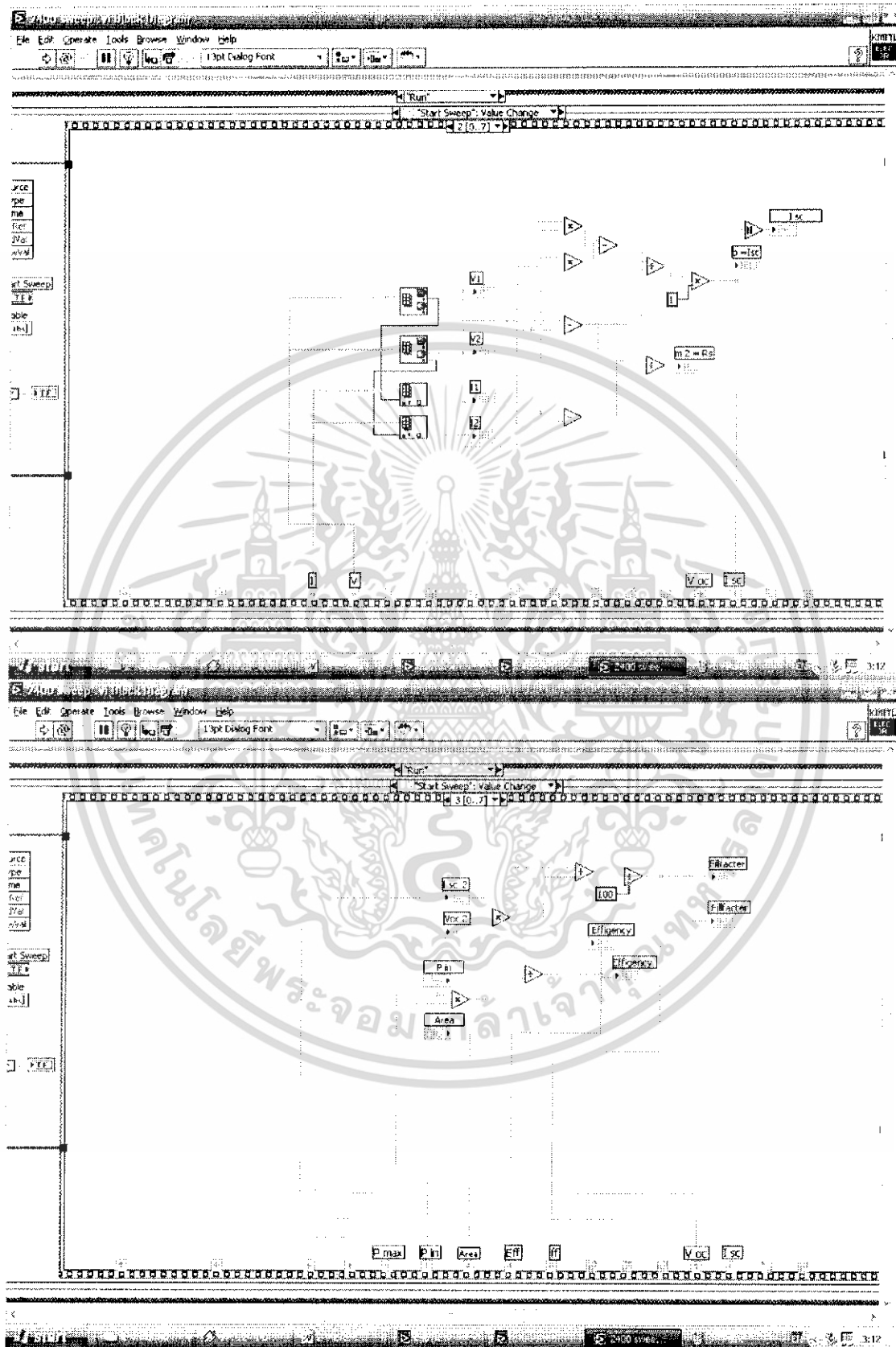
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



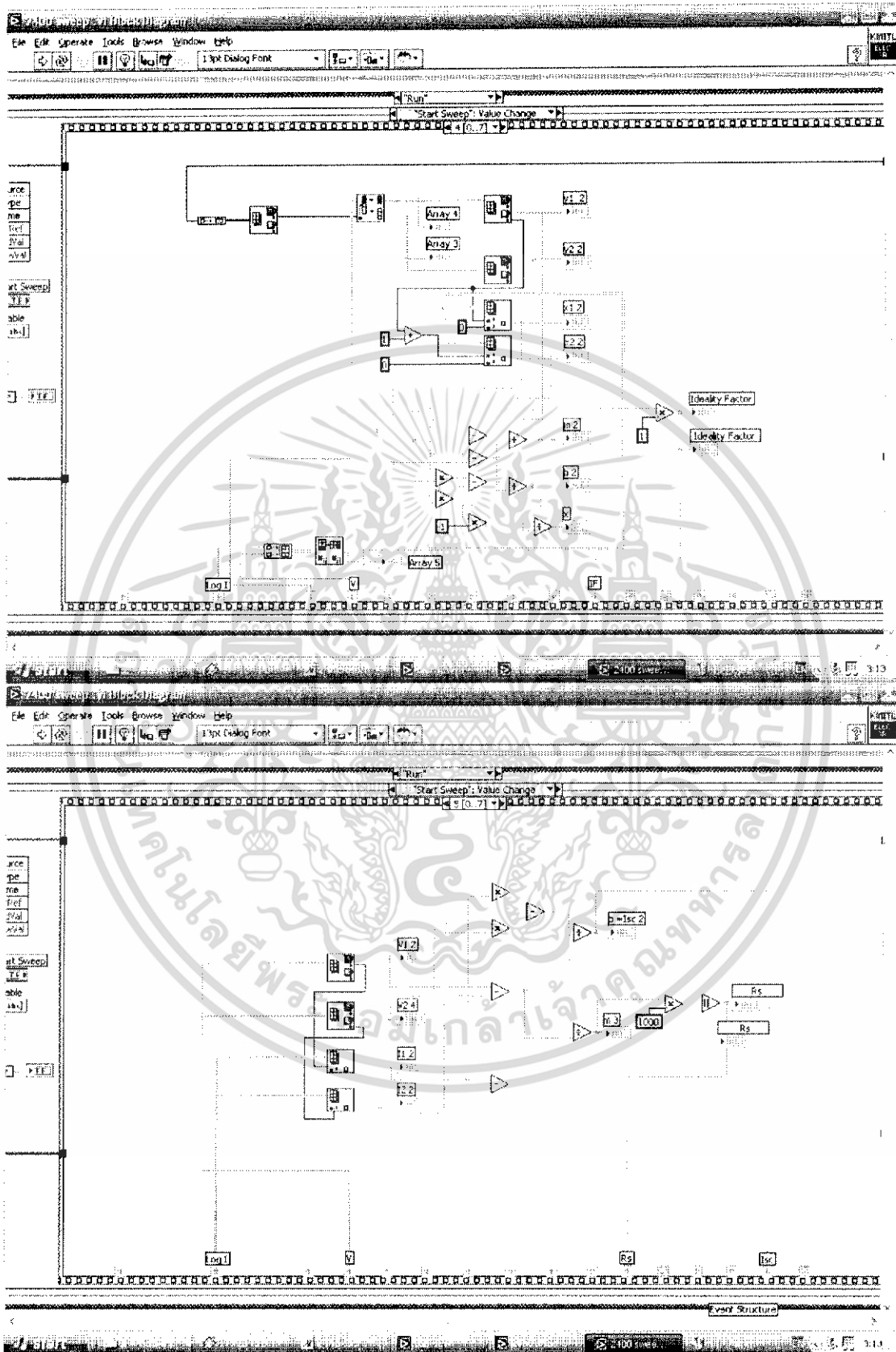
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



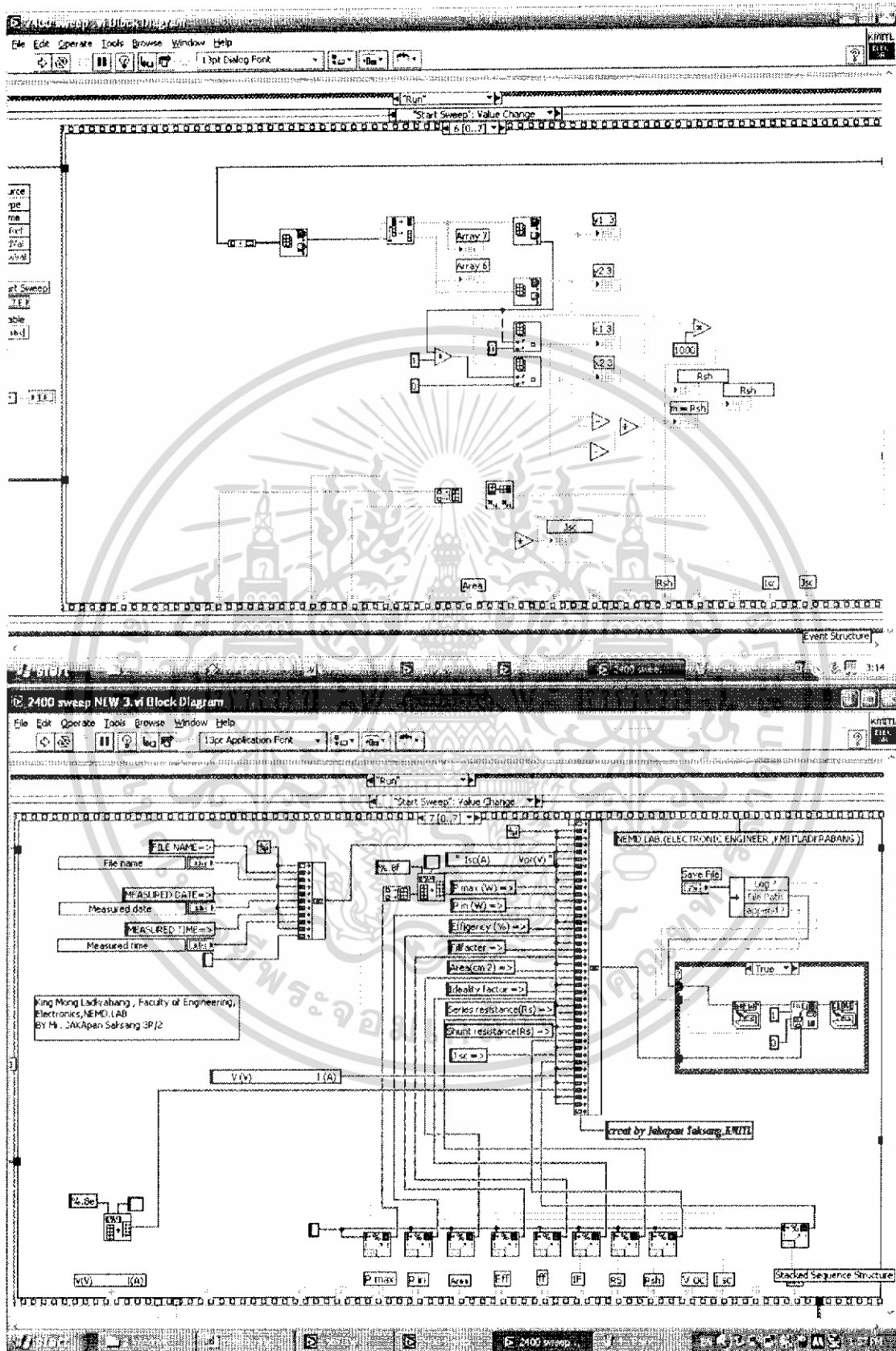
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



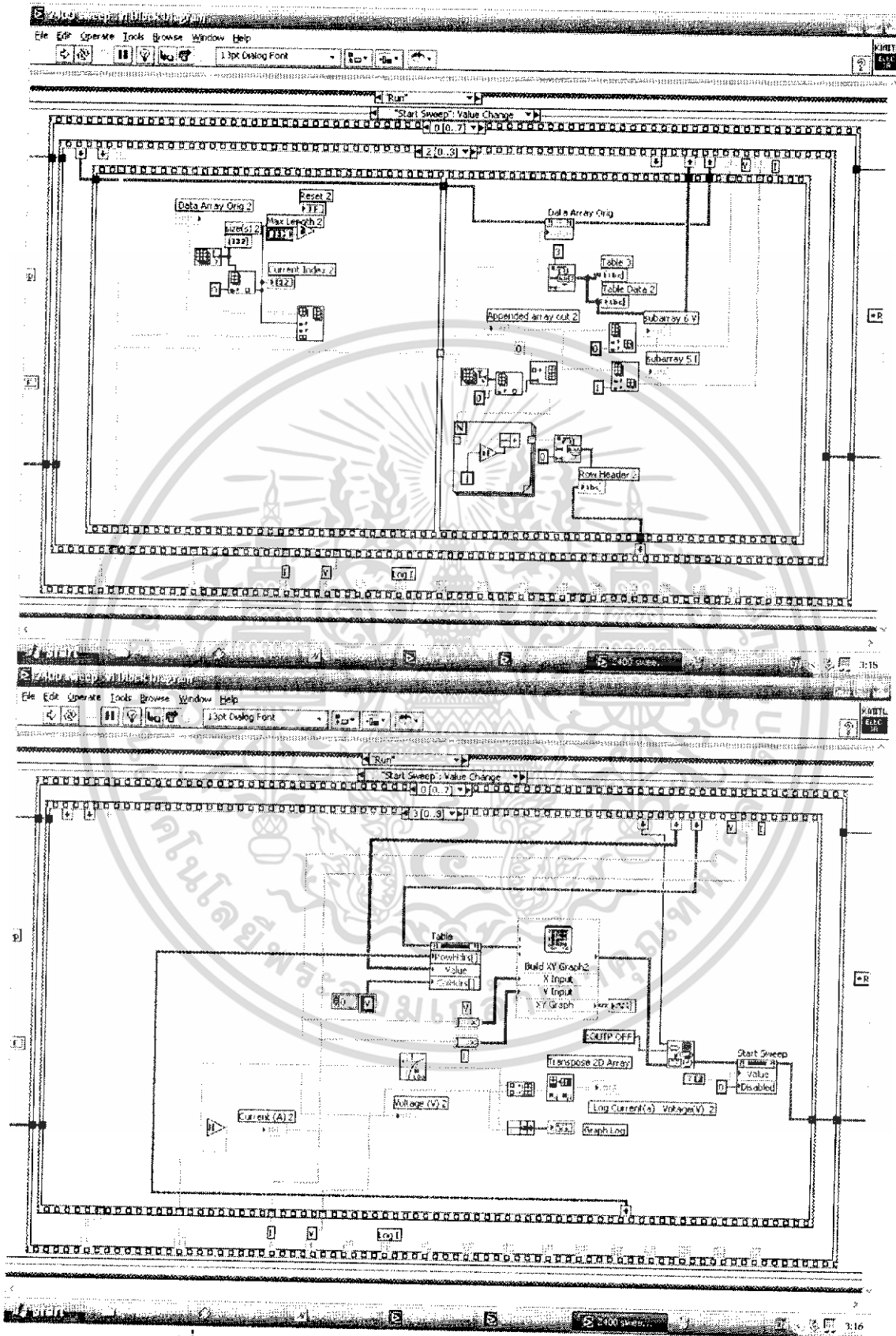
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



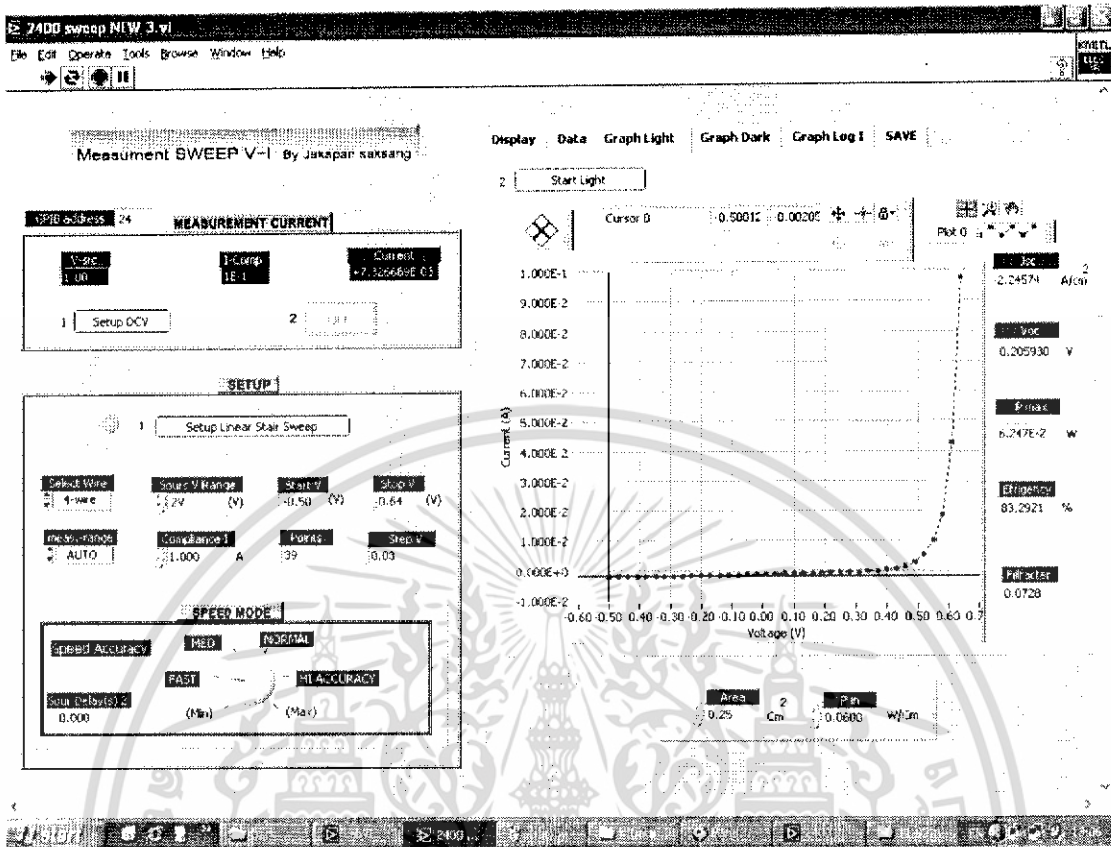
รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

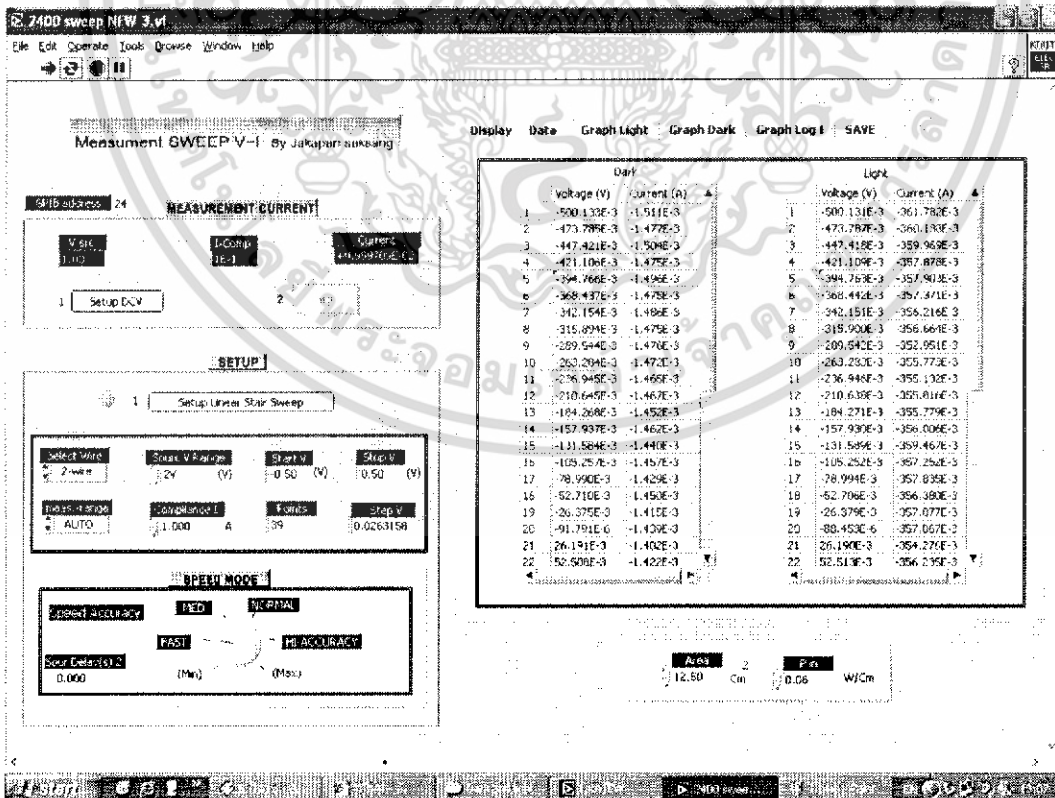


รูปที่ 3.6 Block Diagram และ Front panel ของ Program (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

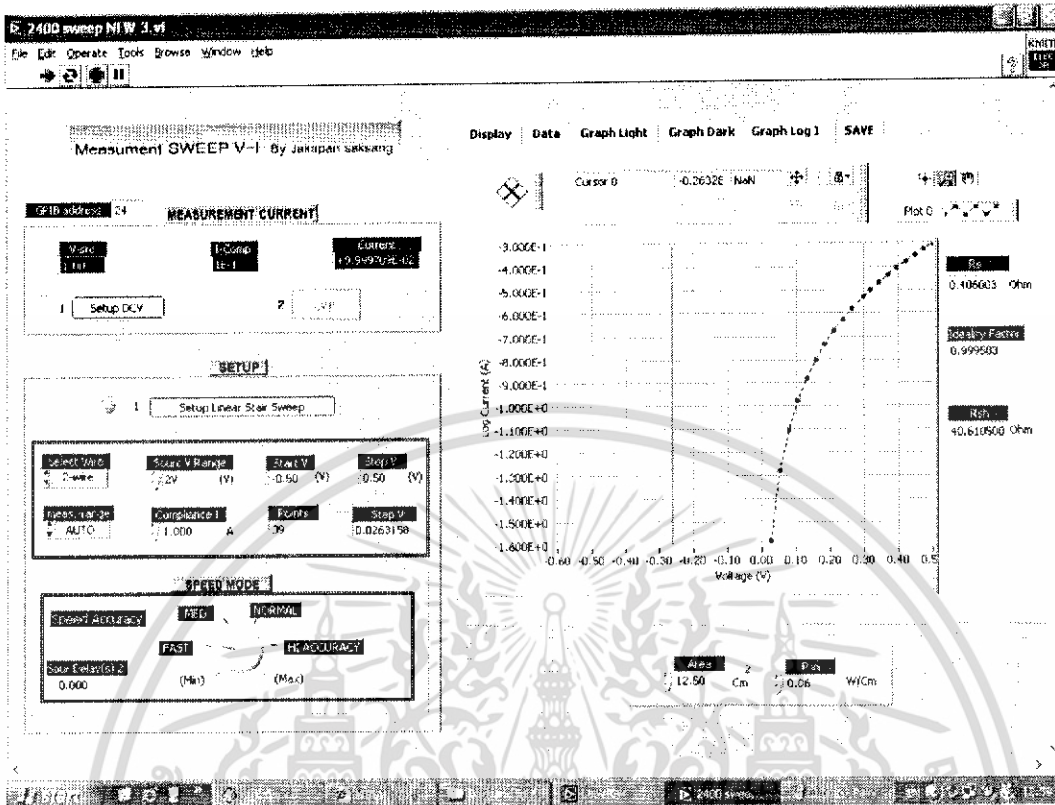


รูปที่ 3.7 กราฟที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

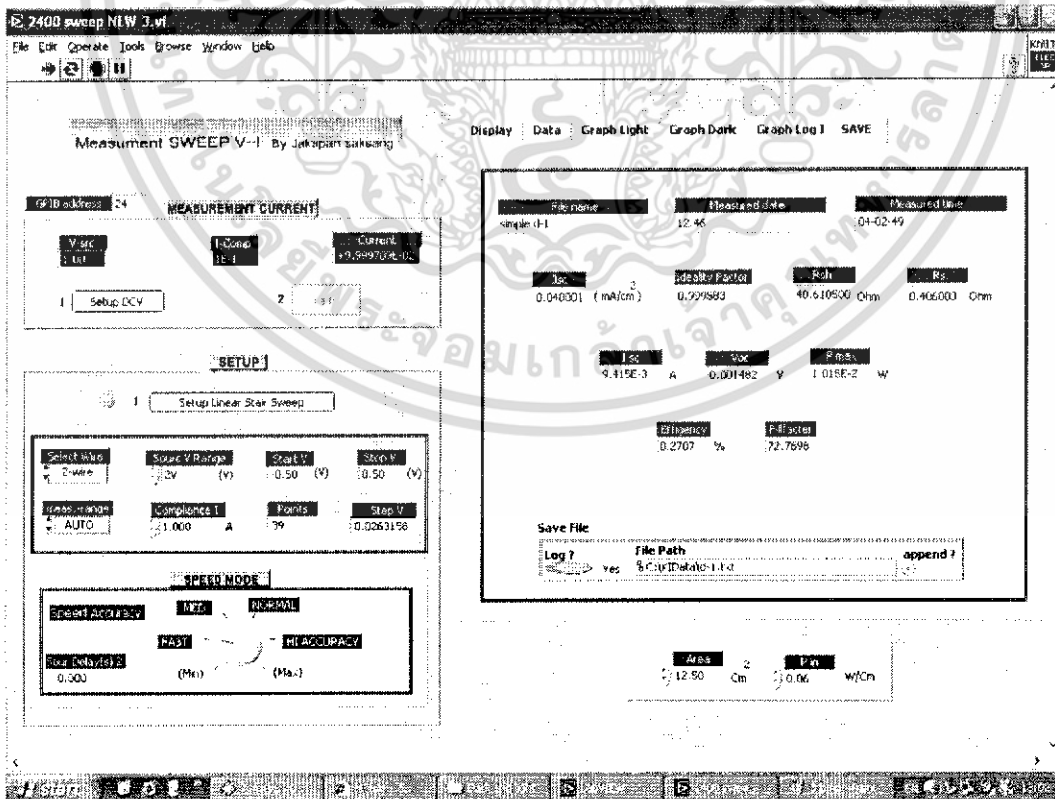


รูปที่ 3.8 ค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่า Log I-V ที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.10 ค่าการ Save file ที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

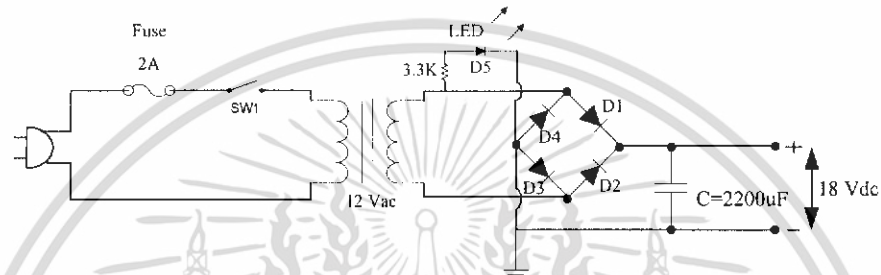
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

3.2 การสร้างเครื่องวัดเซลล์แสงอาทิตย์

3.2.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟ

ภาคแหล่งจ่ายไฟแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. แหล่งจ่ายไฟ 12 V_{DC} ของวงจรซึ่งได้จากหม้อแปลง 220 V_{AC} ทำหน้าที่แปลงไฟ 220 V เป็น 12 V โดยมี ไดโอด เบอร์ 1N4001 จำนวน 4 ตัว ต่อแบบวงจรบริดจ์และมี $C\ 2200\ \mu\text{F}$ ทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟให้มีความเรียบมากยิ่งขึ้นแต่อย่างไรก็ตามแรงดันมีออกมาเป็นแรงดันRMS ดังนั้นแรงดันจึงมีขนาดสูงกว่าปกติที่ระบุไว้ประมาณ 18 V_{DC} แสดงวงจรดังรูปที่ 3.11 ก



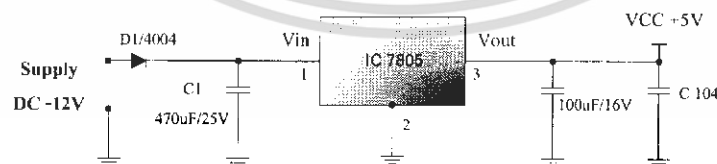
(ก) วงจรภาคจ่ายไฟ

2. แหล่งจ่ายไฟ 12 V_{DC} ซึ่งได้จากหม้อแปลงทำการแปลงเป็น 18 V_{DC} โดยใช้ IC เบอร์ 7812 และมี ไดโอด 1N4001 จำนวน 1 ตัว ต่ออนุกรมเพื่อป้องกันกระแสย้อนกลับขณะที่วงจรกำลังทำงานและมี $C\ 0.1\ \mu\text{F}/25\text{ V}$ จำนวน 2 ตัวต่อขานาน IC 7812 ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนทางด้านความถี่สูงให้หมดไป แสดงดังรูปที่ 3.15 ข



(ข) แหล่งจ่ายให้อุปกรณ์ทำความเย็น

3. แหล่งจ่าย 5 VDC ซึ่งได้จากการแปลงจาก 12 VDC โดยมี IC เบอร์ 7805 ทำหน้าที่แปลงแรงดัน 12 VDC เป็น 5 VDC เพื่อจ่ายให้แก่วงจรควบคุมอุณหภูมิ



(ค) แหล่งจ่ายให่วงจรควบคุมอุณหภูมิ

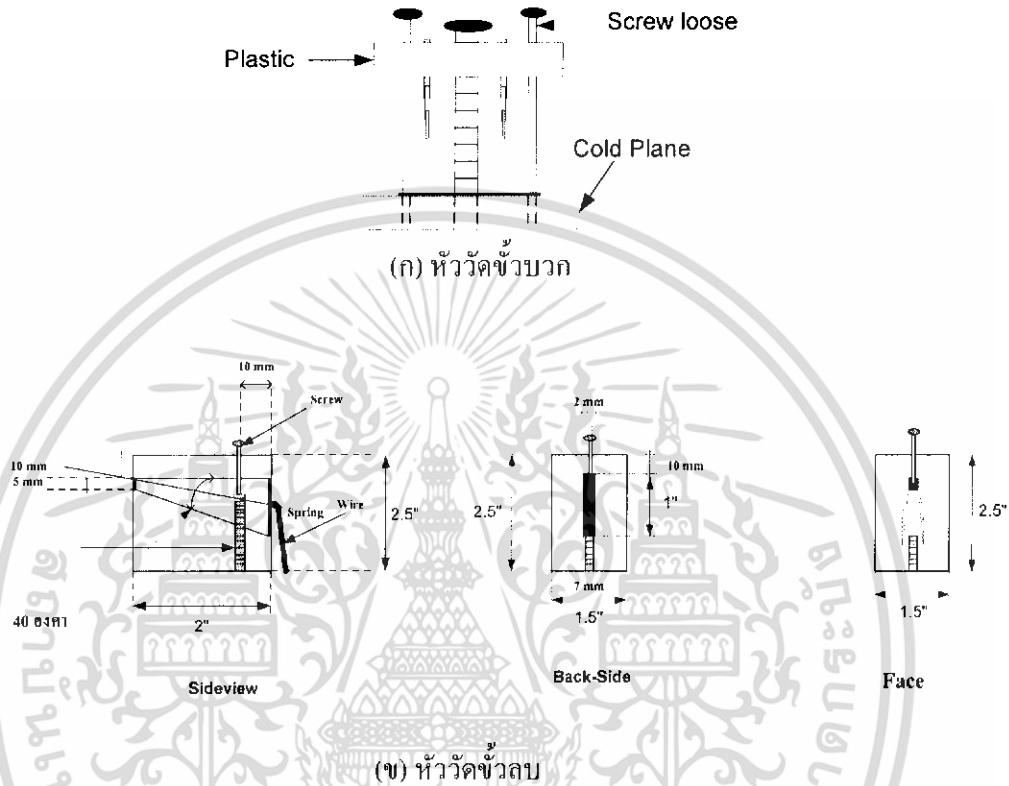
รูปที่ 3.11 วงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้ในงาน (ก) วงจรภาคจ่ายไฟ (ข) แหล่งจ่ายให้อุปกรณ์ทำความเย็น

(ค) แหล่งจ่ายให่วงจรควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การออกแบบหัววัด

ในการวัดเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นจะต้องออกแบบให้มีความสะดวกในการใช้งานได้ง่ายซึ่งจะจำแนกออกเป็น 2 แบบคือ หัววัดขั้วลบ และ หัววัดขั้วบวก แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การออกแบบขั้ววัดเซลล์แสงอาทิตย์

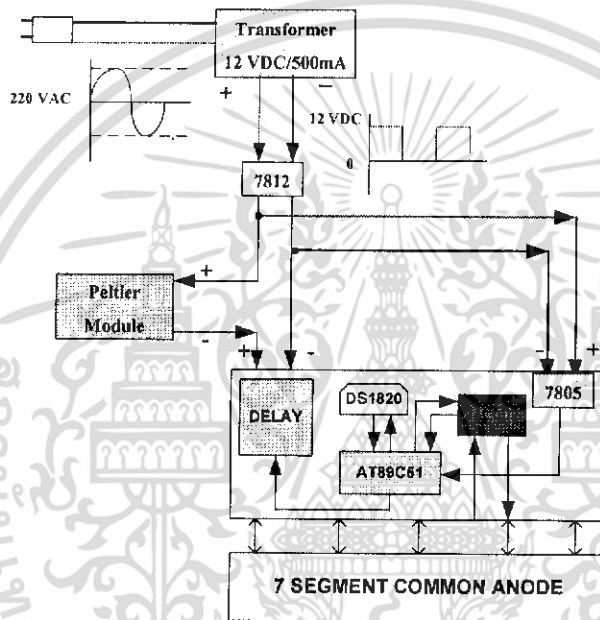
3.2.3 การนำวงจรควบคุมอุณหภูมิไปใช้งาน

การใช้งานขึ้นอยู่กับความต้องการของรีเลย์ไปใช้งาน เช่น ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิให้มีความร้อนเพิ่มขึ้นก็ใช้ขั้ว NO กับขั้ว Com และถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิให้มีความเย็นเกิดขึ้นให้ต่อกับขั้ว NC กับขั้ว Com ดังรูปที่ 3.14 และการตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ทำได้ดังนี้

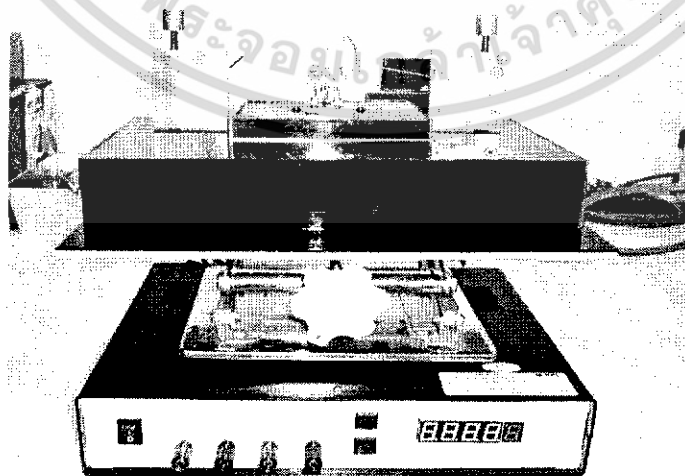
1. กดสวิทช์ SET ครั้งที่ 1 เพื่อตั้งค่าต่ำสุดจะเห็นตัวเลขที่จุดแสดงผลแสดงค่าอุณหภูมิต่ำสุด กระพริบ สังเกตขีดล่าง ที่หลักหน้า
2. กดสวิทช์ SW2 ค้างไว้ค่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทีละ 0.5 จาก -55 ถึง +125 ปล่อยสวิทช์เมื่อตัวเลขตรงกับค่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กดสวิตช์ SET ครั้งที่ 2 เพื่อตั้งค่าสูงสุดจะเห็นตัวเลขที่ชุดแสดงผลแสดงค่าอุณหภูมิ กระพริบ สังเกตว่ามีขีดบนที่หลักหน้า
4. กดสวิตช์ Sw2 ค้างไว้ค่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่ละ 0.5 จาก -55 ถึง + 125 ปล่อยสวิตช์ เมื่อตัวเลขตรงกับค่าที่ต้องการ
5. ถ้ากดสวิตช์ SW1 ครั้งที่ 3 จะวนกลับไปทำการตั้งค่าต่ำสุดอีกครั้ง และถ้าไม่กดปุ่มใดๆ สลักครุ่หน้าจจะหยุดกระพริบและกลับไปแสดงผลค่าอุณหภูมิตามปกติ



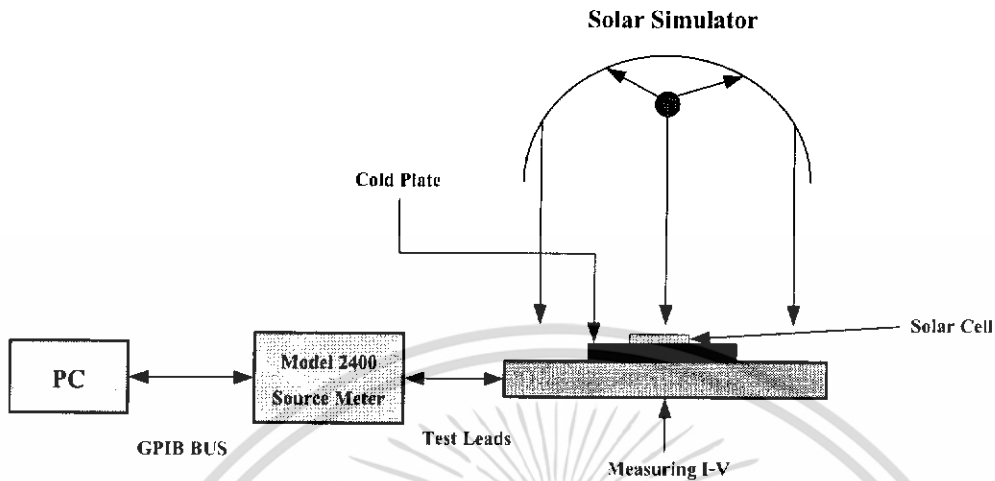
รูปที่ 3.14 การต่อใช้งานกับตัวทำความเย็น



รูปที่ 3.15 เครื่องวัด I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การวัดค่าต่าง



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อของระบบการวัดทั้งหมด

ในการเชื่อมต่อระบบจะใช้การเชื่อมต่อผ่านทางการ์ด GPIB ซึ่งใช้ระบบมาตรฐาน IEEE 488.2 ในการติดต่อกับ Source Meter เพื่อควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 GPIB BUS (IEEE-488)

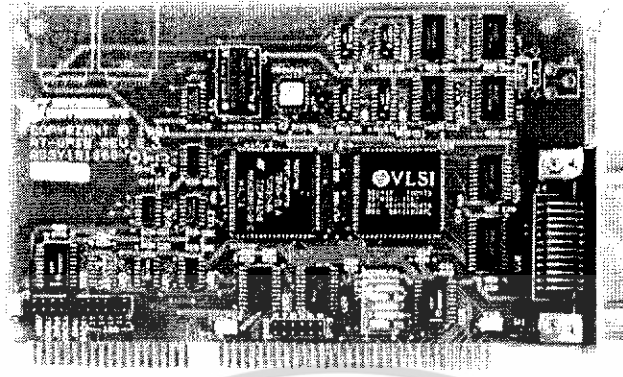
ระบบ GPIB (General Purpose Interface Bus) จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ผู้ส่ง (Talker), ผู้รับ (Listener) และผู้ควบคุม (Controller) จะทำหน้าที่ดังนี้ คือ

- ผู้ส่ง (Talker) ทำหน้าที่ส่งข้อมูล โดยในระบบสามารถมีผู้ส่ง (Talker) ได้หลายตัว แต่จะสามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละตัว

- ผู้รับ (Listener) ทำหน้าที่เป็นตัวรับข้อมูล โดยในระบบสามารถมีผู้รับ (Listener) ได้หลายตัว และผู้รับสามารถรับข้อมูลได้พร้อมกันครั้งละหลายตัว

- ผู้ควบคุม (Controller) หน้าที่ควบคุมการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

ในการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบ GPIB ระบบหนึ่งจะมีอุปกรณ์ทั้งหมดที่ต่ออยู่ในระบบ (ผู้ส่ง (Talker), ผู้รับ (Listener) และผู้ควบคุม (Controller)) ต้องไม่เกิน 15 เครื่อง สำหรับลักษณะของการ์ด GPIB และสายสัญญาณที่ใช้ในระบบ GPIB สามารถแสดงในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ลักษณะของการ์ด GPIB



รูปที่ 3.18 ลักษณะสายสัญญาณที่ใช้ในระบบ GPIB

สายสัญญาณในระบบ GPIB นี้จะเป็นสายสัญญาณแบบ 24 เส้นขนานกันและมีขั้วต่ออยู่ทางปลายทั้งสองด้านของสายเพื่อใช้ต่อกับอุปกรณ์ในจำนวนสายทั้ง 24 เส้นนี้จะมี 16 เส้นที่ทำหน้าที่เป็นสายนำสัญญาณส่วนที่เหลือ 8 เส้นจะทำหน้าที่เป็นกราวด์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 3.19

DIO1	1	13	DIO5
DIO2	2	14	DIO6
DIO3	3	15	DIO7
DIO4	4	16	DIO8
EOI	5	17	REN
DAV	6	18	GND (Twisted with DAV)
NRFD	7	19	GND (Twisted with NRFD)
NDAC	8	20	GND (Twisted with NDAC)
IFC	9	21	GND (Twisted with IFC)
SRQ	10	22	GND (Twisted with SRQ)
ATN	11	23	GND (Twisted with ATN)
SHIELD	12	24	Signal Ground

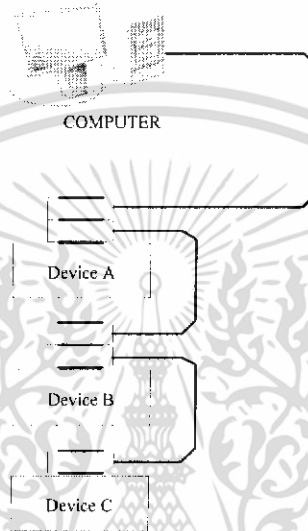
รูปที่ 3.19 สัญญาณที่ขาต่างๆของสายสัญญาณในระบบ GPIB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

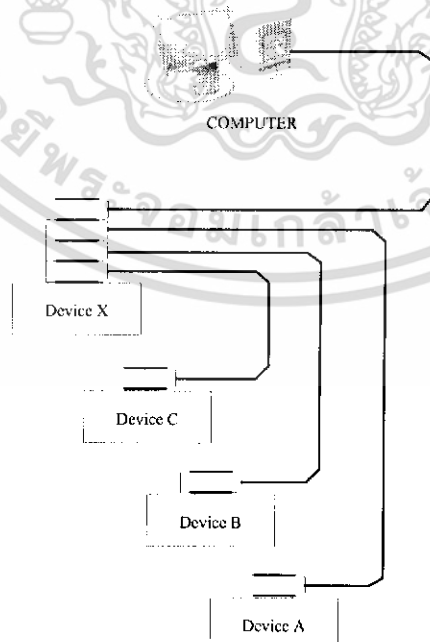
สำหรับรูปแบบในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ GPIB นั้นจะมีอยู่ 2 วิธีคือ

- การเชื่อมต่อแบบเรียงต่อกัน (Linear Configuration)
- การเชื่อมต่อแบบกระจาย (Star Configuration)

โดยลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งสองแบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อแบบเรียงต่อกัน (Linear Configuration)



รูปที่ 3.21 การเชื่อมต่อแบบกระจาย (Star Configuration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 รายละเอียดเกี่ยวกับ GPIB

GPIB นั้นเป็นสายสัญญาณแบบ 24 เส้นขนานกันมีขั้วต่อที่ตอนปลายทั้งสองของสายและสามารถนำมาต่อกันเพื่อให้สายมีความยาวขึ้นได้ จำนวนสายไฟ 24 เส้นนี้มีเพียง 16 เส้นที่ทำหน้าที่นำสัญญาณ ส่วนอีก 8 เส้น ทำหน้าที่กราวด์ (Ground) ซึ่งจำนวนสาย 16 เส้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

3.3.3 บัสข้อมูล (Data Bus) จำนวน 8 สาย

DIO1-DIO8

3.3.4 สายสัญญาณควบคุม (Controller) จำนวน 5 สาย

IFC (Interfacing Clear)

ATN (Attenuation)

SRQ (Service Request)

REN (Remote Enable)

EIO (End Or Identify)

3.4 ความหมายของสัญญาณต่างภายใน GPIB

ดังที่กล่าวแล้วว่าสายสัญญาณต่างๆ ใน GPIB ได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

3.4.1 กลุ่มสัญญาณข้อมูล

DIO1 – DIO8 (Data Input / Output) สัญญาณทั้ง 8 เส้นนี้ทำหน้าที่เป็นทางผ่านข้อมูลของระบบ

3.4.2 กลุ่มสัญญาณควบคุมการเชื่อมต่อ (Interfacing)

- ATN (Attenuation) เป็นสัญญาณที่ถูกส่งโดยอุปกรณ์ ที่เป็นตัวควบคุมเช่นเดียวกันใช้ในการให้ทุกตัวในระบบ

- EOI (End Or Identify) เป็นสัญญาณที่ถูกส่งได้โดยอุปกรณ์ที่เป็นตัวควบคุม หรืออุปกรณ์ที่เป็นตัวส่งก็ได้ ใช้สำหรับแสดงข่าวสารที่ส่งเป็นชุดนั้นได้เสร็จสิ้นลงแล้ว

- IFC (Interface Clear) เป็นสัญญาณรีเซ็ตหรือระบบกำหนดได้โดยตัวควบคุมเท่านั้น

- SRQ (Service Request) เป็นสัญญาณที่ถูกส่งจากอุปกรณ์ต่างๆเพื่อเป็นการบอกแก่ระบบว่าขณะนี้อุปกรณ์ดังกล่าวต้องการติดต่อจากตัวควบคุม

- REN (Remote Enable) สัญญาณนี้เป็นสัญญาณที่ถูกส่งจากตัวควบคุมเพียงตัวเดียวเท่านั้น เพื่อใช้สั่งให้อุปกรณ์ต่างๆเปลี่ยนจากโหมดใช้งานปกติมาเป็นการควบคุมโดยตัวควบคุมแทน

3.4.3 กลุ่มสัญญาณการรับส่งข้อมูล

-DAV (DataValid) เมื่อสัญญาณนี้ถูกดึงจากลอจิก “ low “ โดยอุปกรณ์ที่เป็นตัวส่งเป็นการแสดงว่าขณะนี้ตัวส่งได้ทำการส่งข้อมูลไปที่สายข้อมูลเรียบร้อยแล้ว

-NRFD (Nor Read For Data) เมื่อสัญญาณนี้มีลอจิก

3.4.4การเปรียบเทียบ NI-488 กับ NI-488.2

โดยปกติแล้วการส่ง การรับข้อมูล หรือการควบคุมการทำงานต่างๆของอุปกรณ์ เราสามารถใช้ NI-488 (NI-488 Functions) เมื่อเราจะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หลายๆชิ้น และหลายๆบอร์ดอินเทอร์เฟซได้ ซึ่งใน NI-488 สามารถใช้กับอุปกรณ์ได้หลายๆเครื่อง (ไม่เกิน 15 เครื่อง) เหมือนกันแต่ต้องใส่บอร์ดอินเทอร์เฟซเพียงบอร์ดเดียว ในกรณีที่ใช้บอร์ดอินเทอร์เฟซเพียงบอร์ดเดียว ดังนั้นจึงใช้คำสั่ง NI-488.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการที่นำมาใช้วัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้มีการพัฒนาระบบการวัดให้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น โดยจะพบว่าถ้าทำการวัดทีละค่าเพื่อเก็บข้อมูลและนำมาคำนวณนั้น จะใช้เวลาพอสมควร นอกจากนี้ยังได้สร้างโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะสามารถบอกได้ว่ารอยต่อ p-n ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความสมบูรณ์เพียงใด

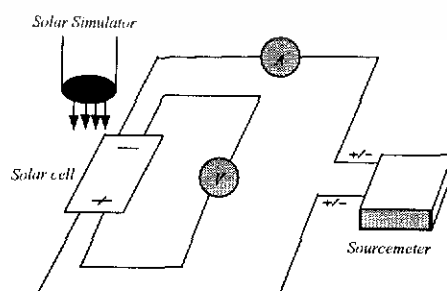
การสร้างโปรแกรมช่วยในการวัดและหลักการทำงานของโปรแกรมในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

1. แสดงกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์และกราฟ Log เพื่อนำไปคำนวณหาค่าต่างๆจากกราฟ
2. โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ค่าคำนวณหาค่า I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , J_{sc} , Fill Factor, η
3. ค่าคำนวณหาค่า ความต้านทานอนุกรม (R_s), ความต้านทานขนาน (R_{sh}), Ideality Factor(n) ของเซลล์แสงอาทิตย์
4. มีความรวดเร็วและละเอียดมากขึ้น

4.1 หลักการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

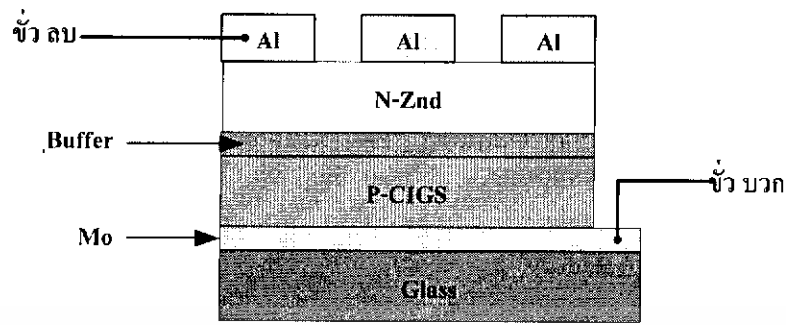
4.1.1 หลักการวัดค่ากระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการวัดกระแสและแรงดันพิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเป็นวิธีการปรับค่าของแรงดันทีละ Step โดยจะมีการกำหนดค่าเริ่มต้น และค่าสุดท้ายของแรงดัน จำนวน Step และ ค่าความเร็วในการวัด ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูก Set เพียงครั้งเดียว ก่อนที่จะทำการ Run Program เนื่องจากเป็นการ Run แบบ Performing a linear staircase sweep



รูปที่ 4.1 วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



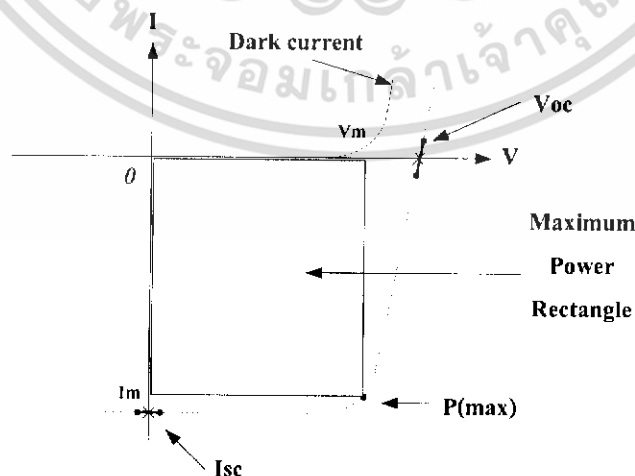
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้วัสดุ

4.1.2 Performing Linear Staircase Sweep

คือระบบการวัดค่าต่างๆที่ถูกเชื่อมต่อจะถูกส่งออกไปพร้อมกันทั้งหมดโดยค่าต่างๆนั้นจะถูกส่งไปยัง Buffer ซึ่งเป็นหน่วยความจำของ Source meter เพื่อให้มีเตอร์ทำการวัดค่าและเมื่อ Source meter วัดค่าเสร็จแล้วผลของการวัดก็就会被เก็บเข้าไปใน Buffer อีกครั้งเพื่อส่งผลกลับไปยัง Program ในคอมพิวเตอร์ซึ่งผลของ Output จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Step ที่เรากำหนดขึ้นและจะหยุดทำงานจนกว่าจบ Step สุดท้าย ซึ่งในช่วงเวลาที่ทำงานแต่ละ Step นั้นอนเวลาในการวัดจะต้องมีการหน่วงของแหล่งจ่าย และเมื่อเราต้องการกำหนดแรงดันหรือกระแสก็สามารถกำหนดได้ในด้านหน้าที่ใช้งานของ Program

ข้อดีของการวัดแบบนี้จะทำงานอัตโนมัติและจะทำตามที่กำหนดได้และสามารถทำซ้ำแบบต่อเนื่องได้สำหรับขอบเขตของการกวาดนั้นสามารถอ่านค่าอัตโนมัติจากตัว Buffer ซึ่งจะมี ความแน่นอนในการวัดและรวดเร็วด้วย

4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{oc} คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งสามารถหาจากกราฟคุณสมบัติ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์จากรูปที่ 4.3 โดยหาจากเส้นโค้งแบบ Exponential ที่ตัดผ่านแกน V ซึ่งจะพบว่าเส้นที่ตัดผ่านแกน V นั้นสามารถหาค่าประมาณของ V_{oc} ได้โดยเอาค่าจากจุด 2 จุดบนเส้นของ Exponential ที่ตัดระหว่างแกน V ที่มีค่าใกล้ที่สุดที่ตัดผ่านแล้วนำค่าจุด 2 จุดนั้นมาทำการคำนวณประมาณค่าจากสมการเส้นตรงโดยที่ V_{oc} คือจุดตัดระหว่างแกน V เกิดขึ้นนั่นเอง

I_{sc} คือเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจรซึ่งการหาค่ากระแสเช่นเดียวกับ V_{oc} แต่จะพิจารณาจากเส้นเริ่มต้นที่ตัดผ่านแกน I นั่นเอง

P_{max} คือกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหลด R_L สามารถหาค่าจากพารามิเตอร์ของกระแสสูงสุด (I_{max}) และแรงดันสูงสุด (V_{max}) ที่โหลดได้รับโดยนำมาคูณกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 4.3 และสมการที่ 4.1 พบว่าเมื่อนำไปใช้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลดที่มีความต้านทานพอดีกับจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุดซึ่งค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมนี้จะคิดจาก อัตราส่วนระหว่าง (โหลด = V_m/I_m)

$$P_{max} = I_m \times V_m \quad (4.1)$$

ขณะใช้งานเซลล์จะไม่อยู่ในภาวะลัดวงจรหรือเปิดวงจรทั้งนี้เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับโหลด ซึ่งมีความต้านทานค่าหนึ่งดังนั้นแรงดันและกระแสที่จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่า V_{oc} และ I_{sc} จากรูปที่ 4.3 เราจะเห็นว่าถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยม ผลคูณของกระแสและแรงดันจะมีค่ามากตามไปด้วยซึ่งการที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวมีความชันแตกต่างกัน เป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรมภายใน

Fill Factor ย่อมาจาก FF คืออัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดจริง กับค่าของพลังงานในอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งคิดจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้แก่โหลดต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4.2)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมาก

Efficiency (η) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์คูณกับพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ 4.3

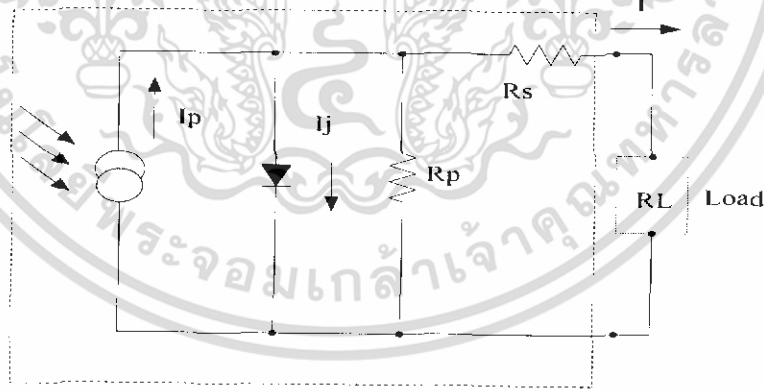
$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \times \text{FF}}{P_{\text{in}} \times \text{Area}} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ P_{in} คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ

Area คือพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของผลของความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์

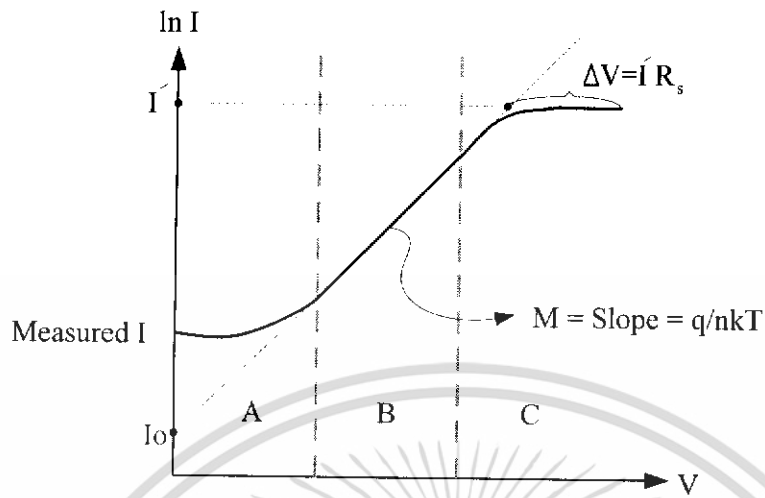
เนื่องจากค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) และค่าความต้านทานขนาน (R_{sh}) มีผลต่อค่า Fill factor (FF) ค่า P_{\max} และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 - สามารถพูดได้ว่า R_s คือ ความต้านทานอนุกรมเป็นค่ารวมของความต้านทานของผิวหน้าเซมิคอนดักเตอร์และระหว่างรอยต่อระหว่างเซมิกับโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้ว ส่วน R_{sh} คือ ความต้านทานขนานซึ่งเป็นค่าความต้านทานรวมของส่วนที่นำกระแสอันเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นในรอยต่อ (Junction) หรือ Spike ที่เกิดขึ้นรอยต่อ p-n โดยที่ I_p คือ แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Current source) และ I_j คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในทางอุทกคติ



รูปที่ 4.4 ลักษณะวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เมื่อเราพิจารณาค่าของกราฟ I_n I - V แล้ว เราสามารถจำแนกช่วงของค่าต่างๆได้เป็น 3 ช่วง โดยพิจารณาจากกราฟ ดังรูปที่รูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟ $\ln I$ - V และช่วงของพารามิเตอร์ที่สำคัญ

การหาค่าความต้านทานอนุกรมสามารถคำนวณจากค่าคุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งหาค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่มีแสงตกกระทบบจะมีค่าประมาณกระแสอิ่มตัวหรือขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีแสงตกกระทบบเลยเนื่องจากคุณลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกันแต่อาจจะแตกต่างที่ค่ากระแสตกกระทบบเท่านั้น ซึ่งค่า R_s สามารถหาได้จากการประมาณค่าโดยใช้สมการของกระแสและแรงดันของวงจรสมมูลย์เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นหนึ่งรอยต่อตั้งสมการที่ (4.4)

กำหนดให้

q (Elementary charge) เท่ากับ 1.602×10^{-19} Coulombs

I_0 (Saturation current) คือ กระแสอิ่มตัว

$\frac{nkT}{q}$ เท่ากับ 0.026 V (ที่อุณหภูมิห้อง 300K)

I เท่ากับ current intensity

k (Boltzmann's constant) เท่ากับ 1.381×10^{-23} J/K หรือ 8.617×10^{-5} eV/K

n เท่ากับ ideality factor

R_{sh} เท่ากับ shunt resistance

R_s เท่ากับ series resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสมการทั่วไปขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบคือ

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right) - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (4.4)$$

เมื่อสมมติให้ $R_{sh} = \infty$

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right)$$

จากสมการข้างบน I_0 จะน้อยมาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.4) ดังนั้นจึงได้

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) \quad (4.5)$$

ในกรณีที่กระแสสูงๆ (บริเวณ C) จากรูปที่ (4.5) ผลกระทบของ R_s ที่มีต่อ I-V Curve จะมีมากหรือสามารถพูดได้ในทางกลับกันได้ว่า R_s จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติ I-V เฉพาะในบริเวณ C ที่กระแสสูง เมื่อ ($V > V_{oc}$)

R_s สามารถหาได้โดยพิจารณาในสมการที่ (4.5) ใหม่ดังนี้

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} (V - IR_s)$$

ซึ่ง R_s สามารถหาได้โดยตรงจากกราฟคุณสมบัติ I-V ที่วัด โดยหาได้จาก

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (4.6)$$

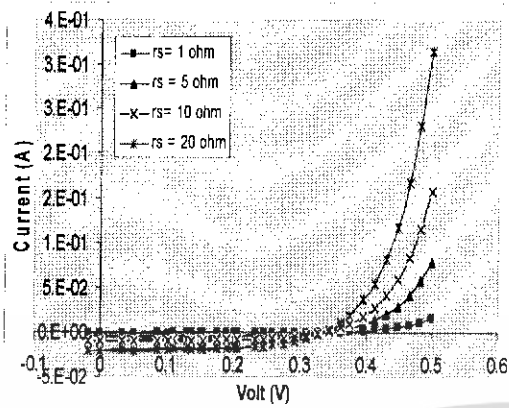
จากสมการที่ (4.4) สามารถคำนวณหาช่วงของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อกำหนดให้กระแสและ R_s เปลี่ยนไป เพื่อจะดูค่าการเปลี่ยนแปลงของช่วงของแรงดันเมื่อ $V \rightarrow V_{oc}$ แสดงผลดังรูปที่ 4.6

เมื่อให้

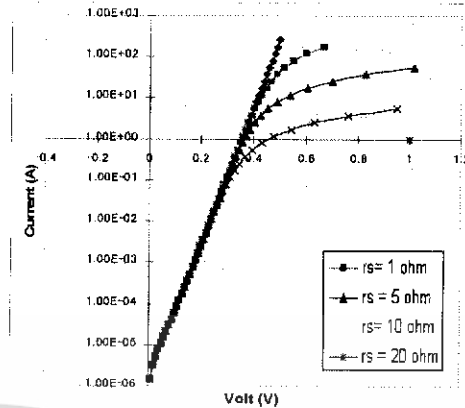
$$I_0 = 3.00E-9 \text{ A}, n=1, v' = 0 - 0.7 \text{ V}, R_{sh} = 1.00E7 \ \Omega$$

$$R_s = 1 \ \Omega, 5 \ \Omega, 10 \ \Omega, 20 \ \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อิทธิพลของ I-V



(ข) อิทธิพลของ ln I - V

รูปที่ 4.6 อิทธิพลที่มีผลต่อความต้านทานอนุกรมเซลล์แสงอาทิตย์

(ก) อิทธิพลของ I-V

(ข) อิทธิพลของ ln I - V

ความต้านทานขนาน (R_{sh}) สามารถหาค่าแบบประมาณได้จากสมการที่ (4.4) โดยนำหลักทฤษฎีความต้านทานในอุดมคติเข้ามาพิจารณาเช่นกัน ดังในสมการที่ (4.8)

เมื่อพิจารณาในกรณี $R_s = 0$ เราสามารถเขียนสมการที่ (4.4) ได้ใหม่ดังนี้

$$I = I_0 \left(\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \tag{4.8}$$

ดิฟ I เทียบกับ V จะได้

$$\frac{dI}{dV} = I_0 \frac{d}{dV} \left[\left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \right]$$

$$\frac{dI}{dV} = I_0 \frac{q}{nkT} \exp \frac{q}{nkT} dV - \frac{dV}{R_{sh}}$$

$$\frac{dI}{dV} = I_0 \frac{q}{nkT} \exp \frac{q}{nkT} - \frac{1}{R_{sh}}$$

$$\frac{1}{R_{sh}} = \left(\frac{dI}{dV} \right) - I_0 \frac{q}{nkT} \exp \frac{q}{nkT}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - I_0 \frac{q}{nkT} \exp \frac{qV}{nkT} \right]^{-1} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.9) เมื่อพิจารณาเทอมของ $\exp \frac{qV}{nkT}$ เมื่อ $V \rightarrow 0$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ประมาณเท่ากับ 1 เราสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

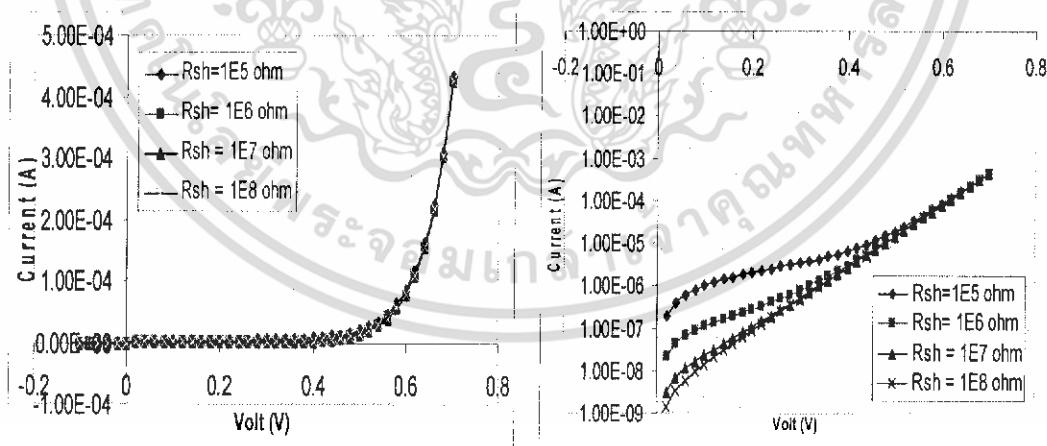
$$R_{sh} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - I_0 \frac{q}{nkT} \right]^{-1} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.4) สามารถคำนวณหาช่วงความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยประมาณและ สามารถแทนค่าคงที่ลงในสมการ แล้วนำมาพล็อตกราฟโดยกำหนดให้กระแสและ R_{sh} เปลี่ยนไป เพื่อจะดูค่าการเปลี่ยนแปลงของช่วงของแรงดันเมื่อ $V \rightarrow 0$ แสดงผลดังรูปที่ 4.7

เมื่อให้

$$I_0 = 3.00E-9 \text{ A}, n=1, v' = 0 - 0.7 \text{ V}, R_s = 1.00E-2 \text{ } \Omega$$

$$R_{sh} = 1E5 \text{ } \Omega, 1E6 \text{ } \Omega, 1E7 \text{ } \Omega, 1E8 \text{ } \Omega$$



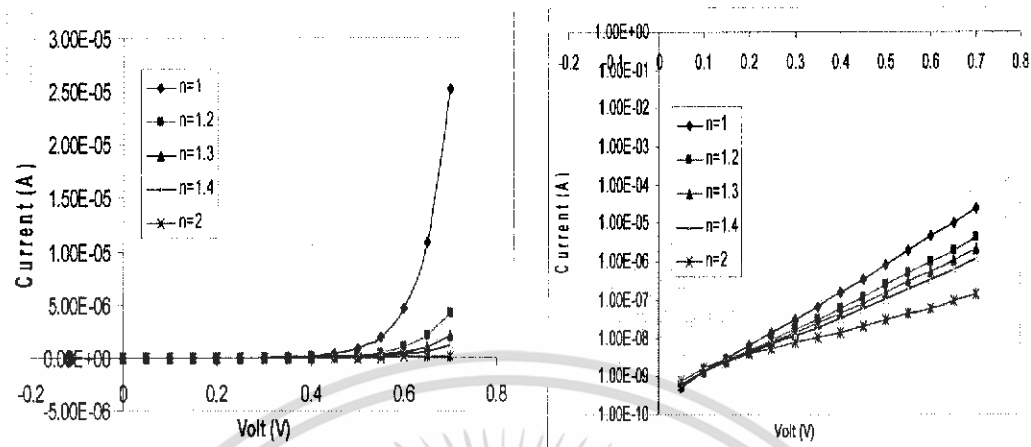
(ก) อิทธิพลของ I - V

(ข) อิทธิพลของ $\ln I - V$

รูปที่ 4.7 อิทธิพลที่มีผลต่อความต้านทานขนานเซลล์แสงอาทิตย์

(ก) อิทธิพลของ I - V (ข) อิทธิพลของ $\ln I - V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อิทธิพลของ I-V

(ข) อิทธิพลของ ln I - V

รูปที่ 4.9 อิทธิพลที่มีผลต่อ Ideality Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์

(ก) อิทธิพลของ I-V (ข) อิทธิพลของ ln I - V

4.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อจนวนพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบมาจากการวัดที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและสามารถนำข้อมูลไปศึกษาได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น ตลอดจนหาความสัมพันธ์ค่ากระแสและแรงดันที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS

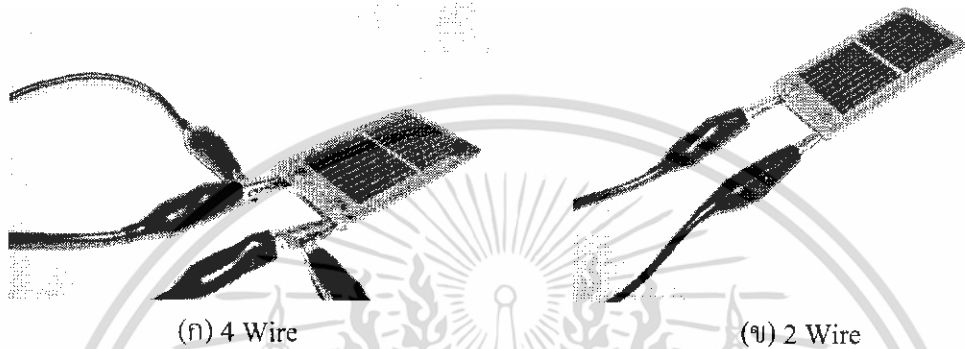
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Source meter	11. Peltier	1 ตัว
2. Solar cell	12. IC เบอร์ AT89C51	1 ตัว
3. สายวัด	13. IC เบอร์ 7805	1 ตัว
4. การ์ด GPIB	14. DELAY 10 A	1 ตัว
5. สาย เชื่อมต่อ IEEE 488 GPIB	15. Segment Aommon Anode	1 ตัว
6. คอมพิวเตอร์	16. Tr. เบอร์ C9012	4 ตัว
7. เครื่อง Solar simulator	17. IC เบอร์ 24LO02	1 ตัว
8. แผ่น PCB	18. ตัวต้านทาน 270 โอห์ม	8 ตัว
9. ตะกั่ว	19. Capacitor 30 P	2 ตัว
10. เซนเซอร์เบอร์ DS 1820 1 ตัว	20 Switch กดคิดป้อนยดับ	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ขั้นตอนการทดลองการวัดแบบ Performing Linear Staircase Sweep

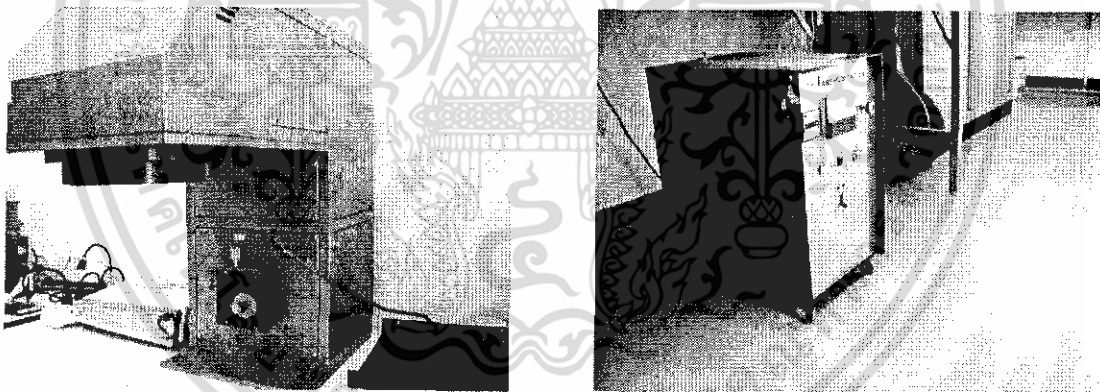
1. นำตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบ 4 Wire และ 2 Wire กับ Source meter ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



(ก) 4 Wire

(ข) 2 Wire

รูปที่ 4.10 วิธีการต่อแบบต่างๆ (ก) 4 Wire และ (ข) 2 Wire



(ก) ตัวกำเนิดแสง

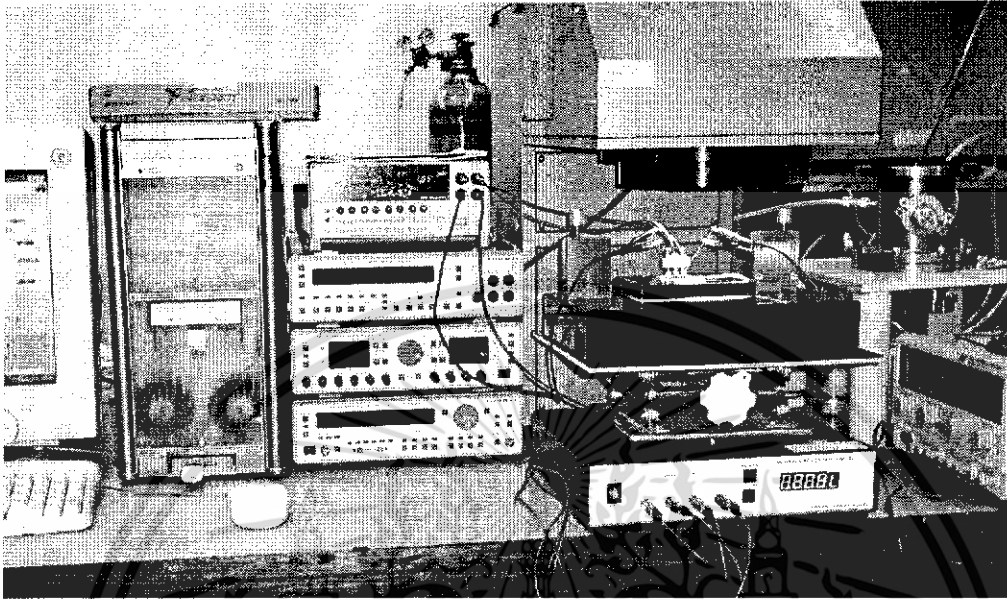
(ข) ตัวควบคุม

รูปที่ 4.11 เครื่อง Solar Simulator ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ตัวกำเนิดแสง (ข) ตัวควบคุม

2. เปิดเครื่อง Source meter และเปิด โปรแกรมที่ทำกรวัด
3. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิและ ตั้งค่าอุณหภูมิ(ในการทดลองนี้จะตั้งค่าไว้ที่ 25 องศา)
4. เปิดเครื่อง Solar Simulation แล้วต่อระบบต่างๆเข้าด้วยกันทั้งหมด
5. กดปุ่ม Run ที่ โปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมติดต่อกับเครื่องมีวัดผ่านทางการ์ด GPIB
6. Set ค่าที่จะต้องการวัดในโปรแกรมและกำหนดชื่อที่จะ Save file
7. กดปุ่ม Setup Linear Stair Sweep เพื่อทำการ Set ค่าทั้งหมดก่อนจะถูกส่งค่าไปยัง Source meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กดปุ่ม Start Sweep เพื่อส่งค่าไปยัง Buffer ของเครื่องวัดให้ทำตามคำสั่งตามที่ถูก Set ไว้

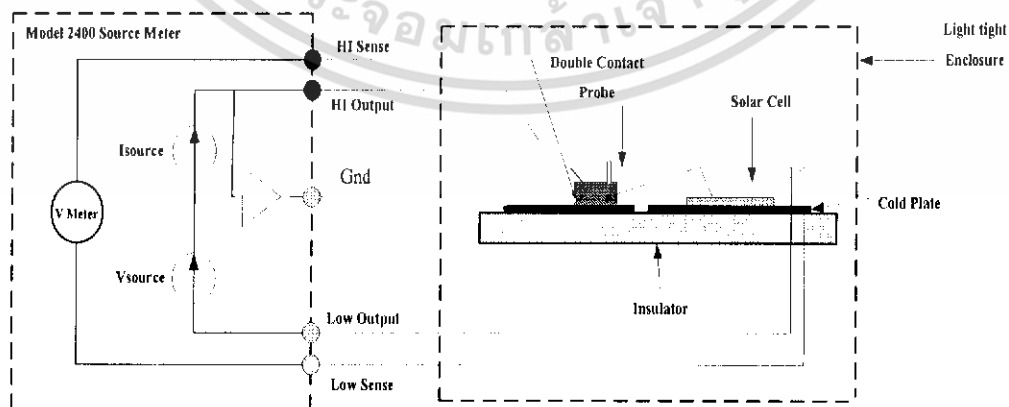


รูปที่ 4.12 วิธีการเชื่อมต่อกับระบบต่างๆ

9. อ่านค่ากระแสและแรงดันแล้วนำมาพล็อตกราฟ จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากกราฟแล้ว Save File แบบ notepad ไว้ตามที่ต้องการใน Windows

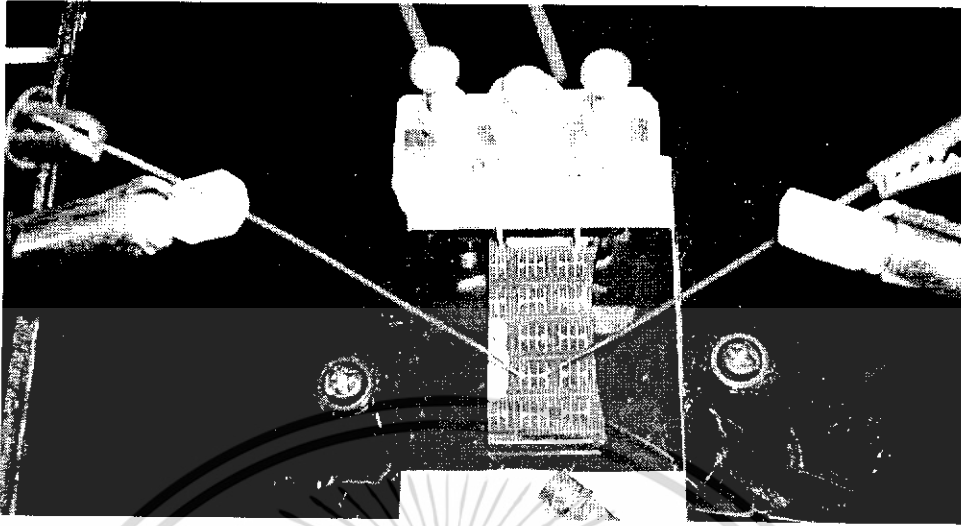
10. นำผลของ File notepad ที่ได้จากการวัดได้นำไปพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

4.4 การทดลองระบบการวัด



รูปที่ 4.13 การต่อแบบ 2 Wire และ 4 Wire

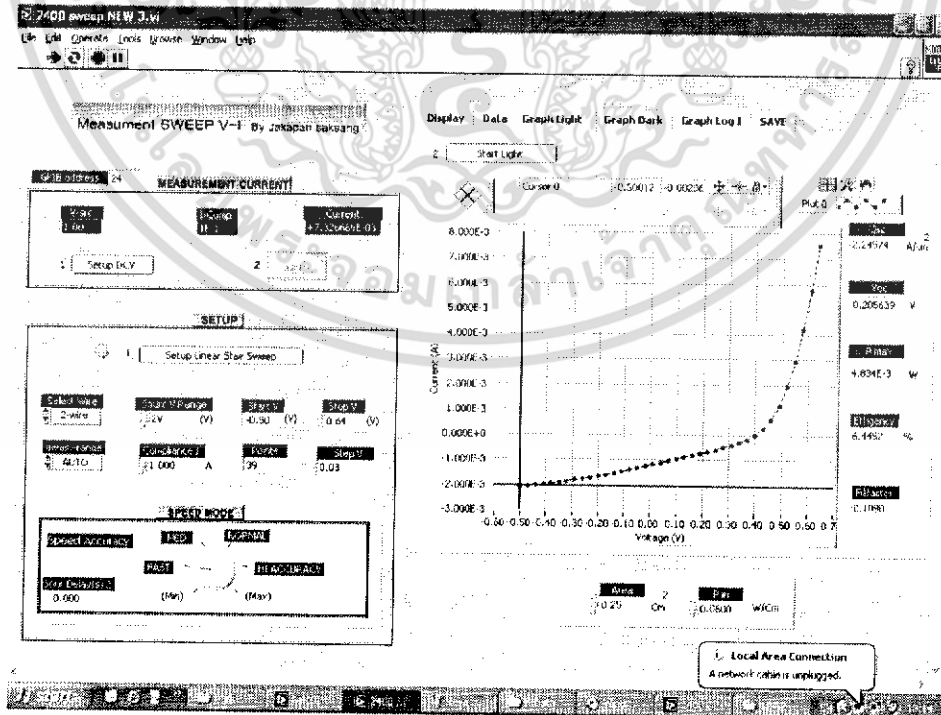
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การวัดแบบ 2 Wire และ 4 Wire

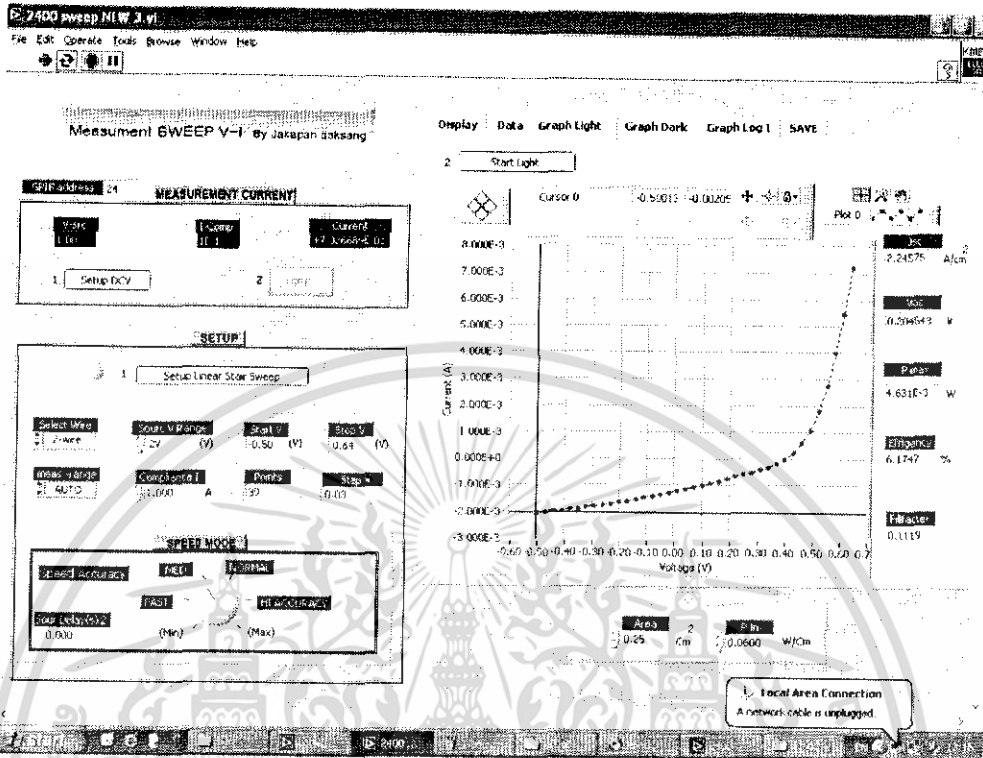
4.4.1 การทดสอบระบบการวัดแบบ 2 Wire

ในการวัดค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เราสามารถวัดแบบระบบ 2 Wire แสดงวิธีการต่อดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเราได้ทำการทดลองวัดแบบ 2 wire ที่ความเร็วต่างๆ ที่ความละเอียด 39 จุด ดังรูปที่ 4.16 เมื่อวัดค่าแล้ว save file แล้วนำค่าต่างๆ มาทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.17

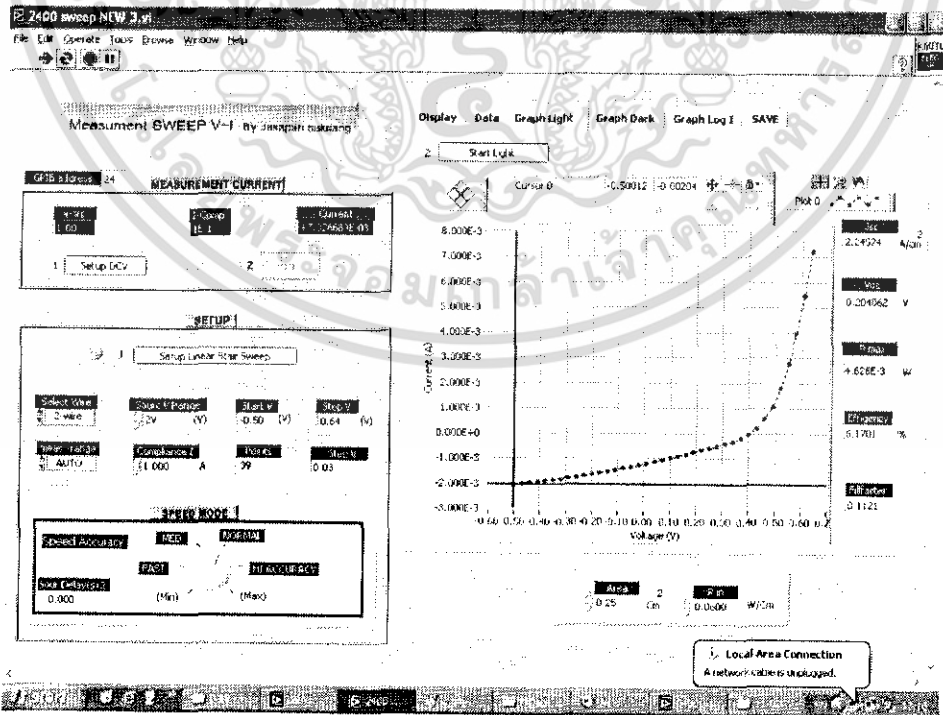


(ก) ระบบการวัดแบบ Fast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

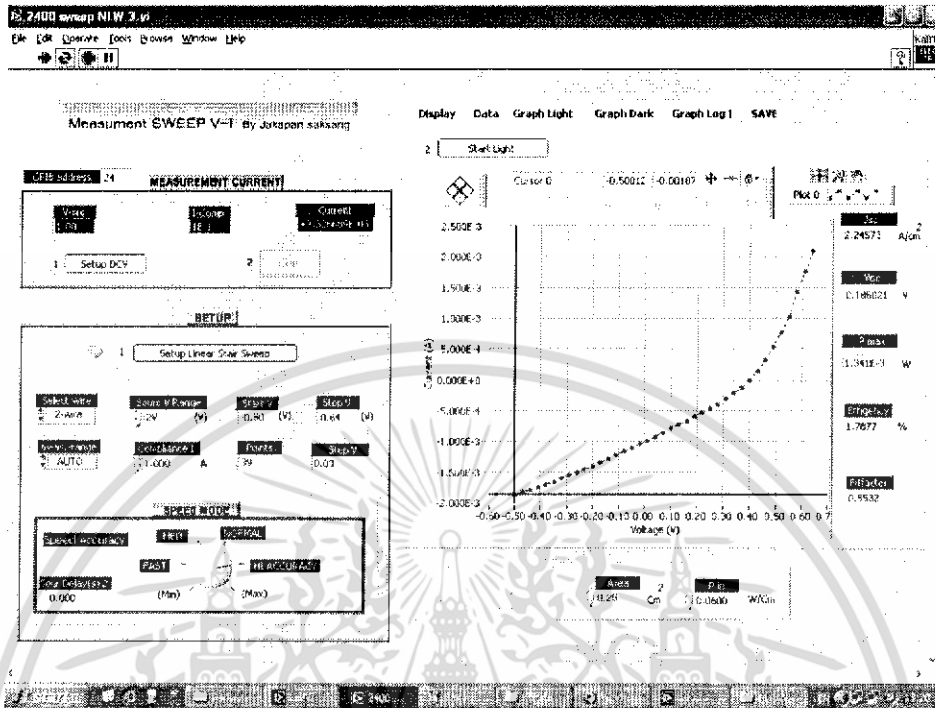


(ข) ระบบการวัดแบบ MED



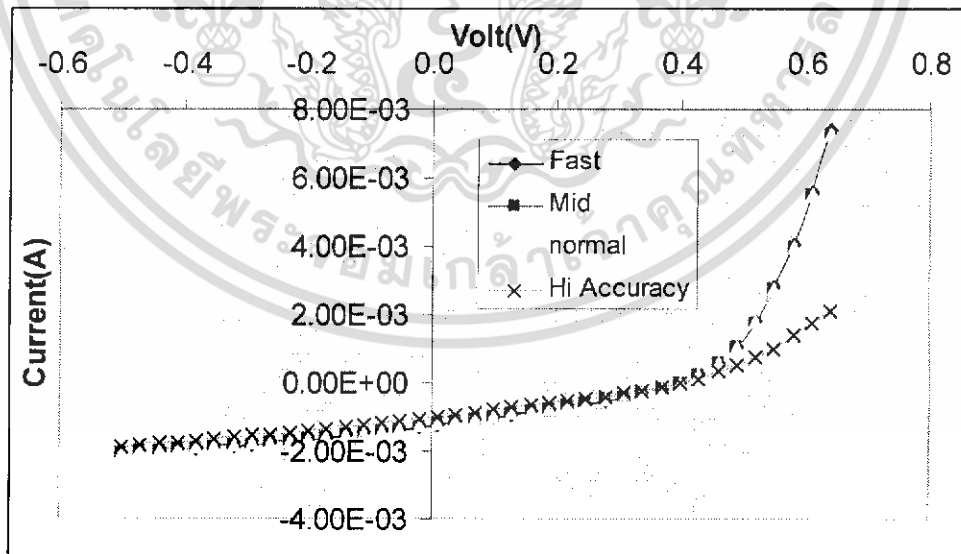
(ค) ระบบการวัดแบบ Normal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



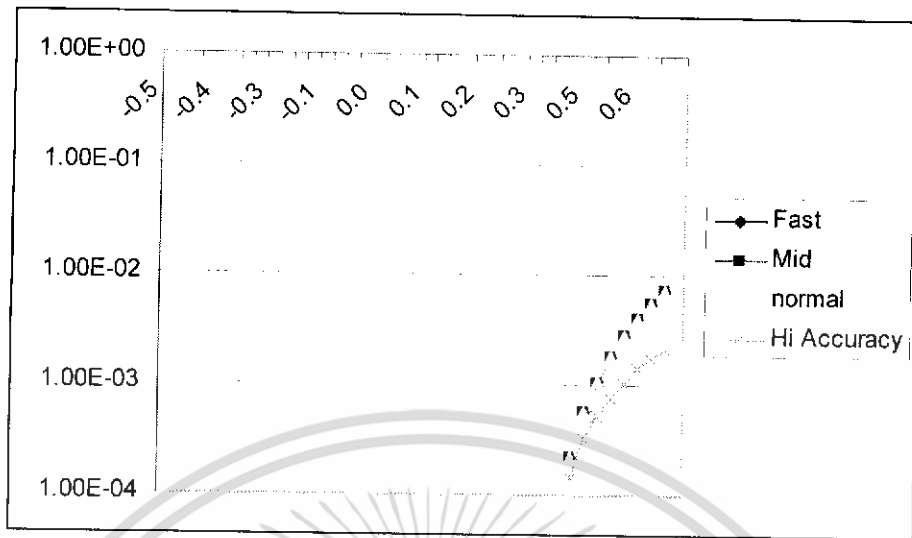
(ง) ระบบการวัดแบบ HI ACCURACY

รูปที่ 4.15 ระบบการวัดแบบ 2 wire ที่ความเร็วระดับต่างๆ



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ขณะมีแสงตกกระทบบเซลล์

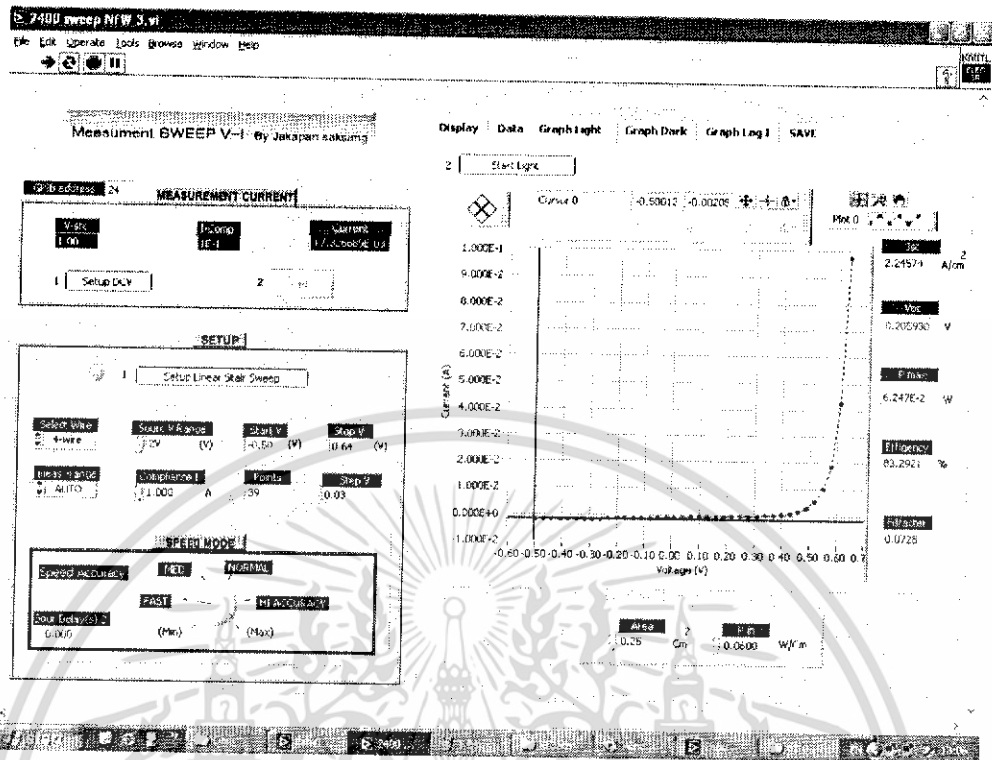
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



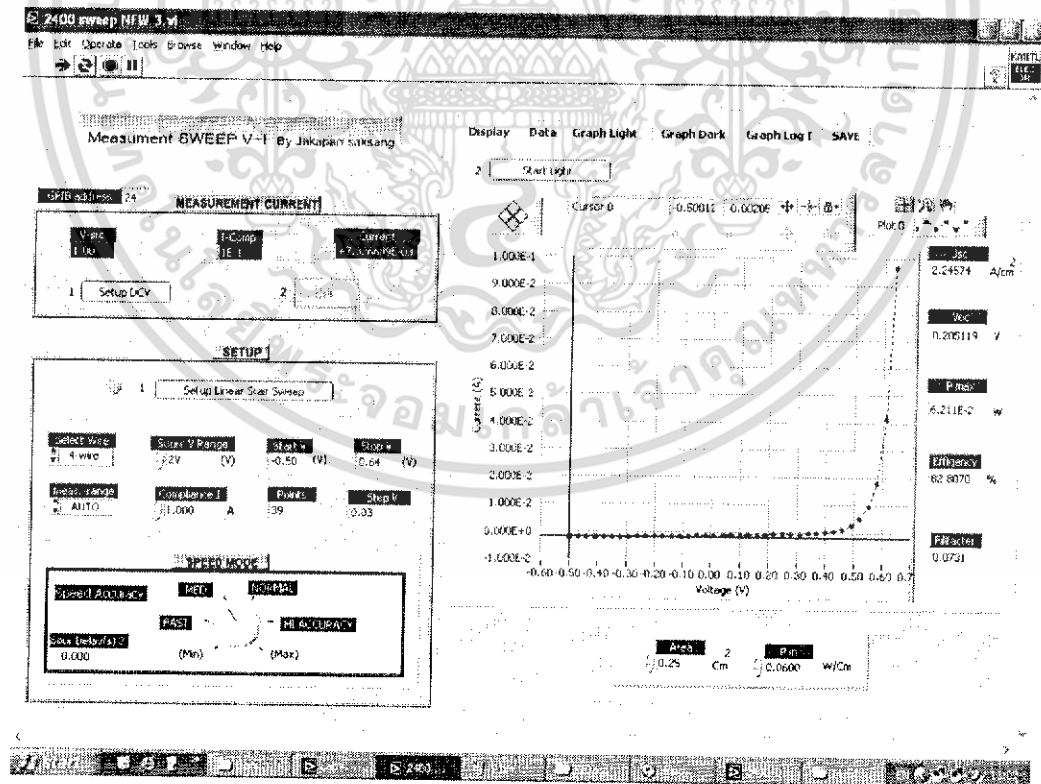
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I - V$ ขณะมีแสงตกกระทบบเซลล์

4.4.2 การทดลองวัดความเร็วแบบ 4 wire

จากการทดลองทดลองระบบการวัดแบบ 4 wire ดังรูปที่ 4.18 จะให้ความละเอียดสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกระบบนี้มาใช้ในการทดลองวัดความเร็ว ในการวัดความเร็วนั้นเราสามารถจำแนกความเร็วที่แตกต่างกันได้ 4 ระดับคือ แบบ Fast , แบบ MED , แบบ Normal และ แบบ Hi Accuracy แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมิเตอร์ด้วยตลอดจนศึกษาและหาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการทดลองวัดเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 4 Wire ที่ความเร็วต่างๆแสดงผลการวัดได้ดังรูปที่ 4.19

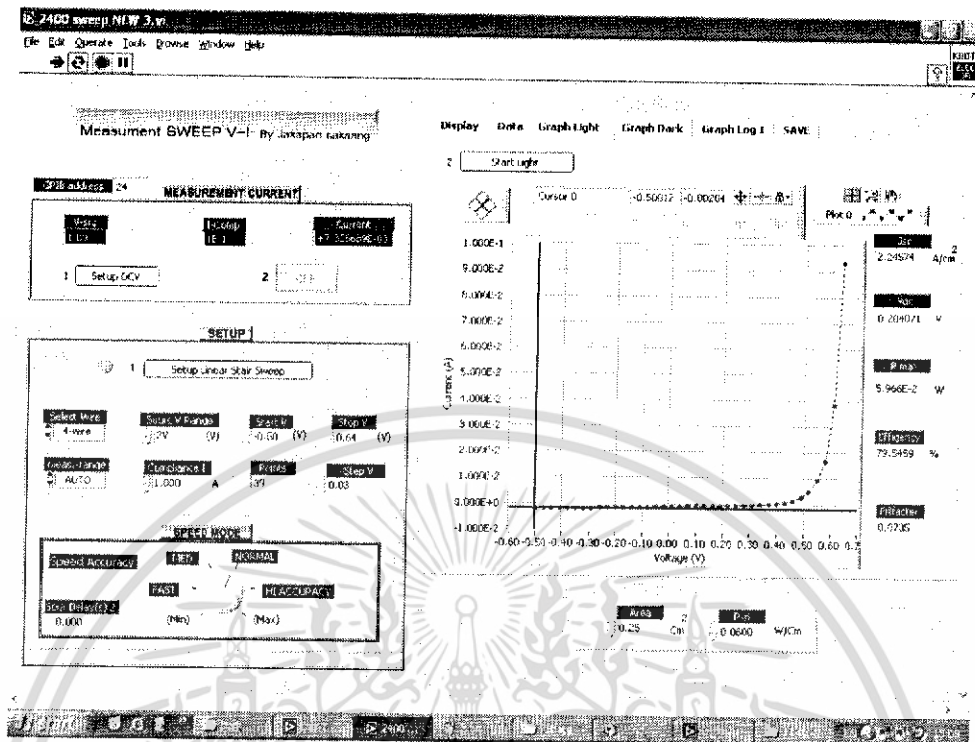


(ก) วัดความเร็วที่ FAST

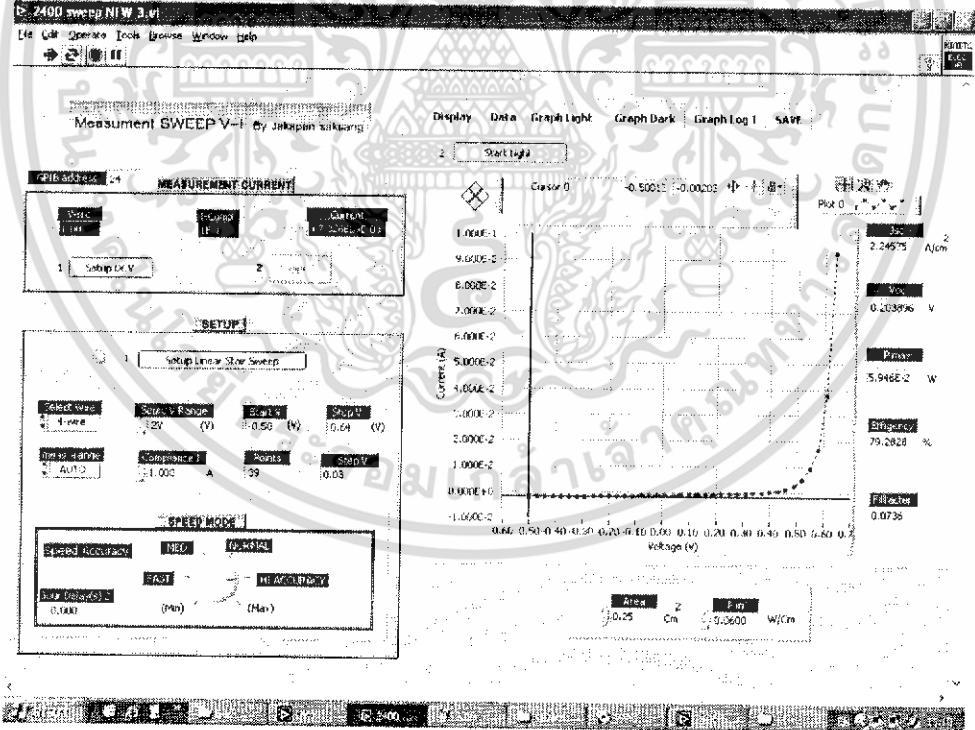


(ข) วัดความเร็วที่ MED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วัดความเร็วที่ NORMAL

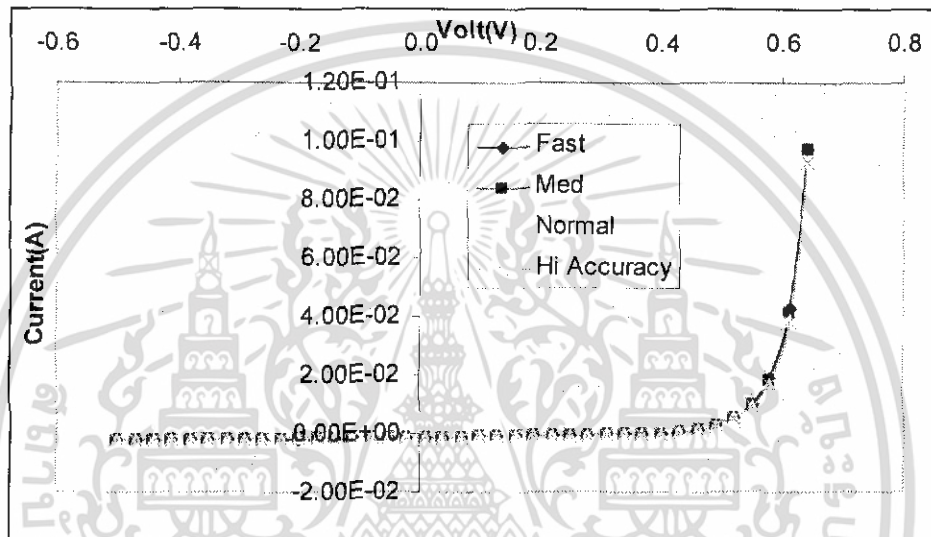


(ง) วัดความเร็วที่ HI ACCURACY

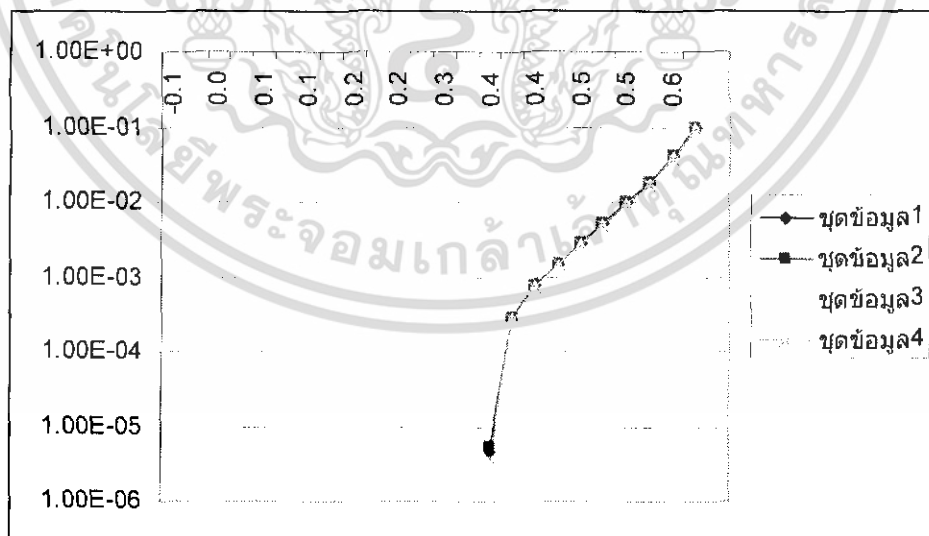
รูปที่ 4.18 ผลการทดลองวัดความเร็ว (ก) วัดความเร็วที่ FAST (ข) วัดความเร็วที่ MED
(ค) วัดความเร็วที่ NORMAL (ง) วัดความเร็วที่ HI ACCURACY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดค่าพบว่าที่ระบบการวัดแบบ 4 Wire จะมีประสิทธิภาพต่อการวัดค่าและมีความละเอียดมากกว่าแบบ 2 Wire เนื่องจากแบบ 4 wire มีการไบอัสแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสแยกออกจากกันจึงไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเหมือน 2 wire และพบว่าระบบการวัดที่ต่างกันจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ได้ด้วย เมื่อนำผลการทดลองที่วัดค่าซึ่งเป็น File notepad มาเปรียบเทียบกับค่าระหว่างค่ากระแสและแรงดันขณะที่มีแสงตกกระทบบ้างได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I และ V ขณะที่มีแสงตกกระทบบ้าง



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I และ V ขณะที่มีแสงตกกระทบบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในบทนี้ได้ทดลองโดยปรับเปลี่ยนค่าต่างและสังเกตผลที่ได้และสามารถวิเคราะห์ออกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. การทดลองระบบการวัดพบว่าที่ ระบบแบบ 4 Wire จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการวัดแบบ 2 Wire เนื่องจากในทางการวัดแบบ 4 wire จะไม่มีสัญญาณรบกวนซึ่งแตกต่างจากการวัดแบบ 2 wire ที่มีสัญญาณรบกวนมากกว่าซึ่งจะส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์และเมื่อนำค่ากระแสและแรงดันมาพล็อตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I และ V ระบบวัดแบบ 2 Wire กับ 4 Wire ดังรูปที่ 4.17 และดังรูปที่ 4.20

2. การทดลองวัดความเร็วที่ ค่าความเร็วแตกต่างกันพบว่าค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเร็วต่างๆจะมีความแม่นยำและความละเอียดในการวัดแตกต่างกัน และที่ความเร็ว FAST จะทำให้ได้สัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนมากกว่าแบบ MED อย่างเห็นได้ชัดซึ่งการวัดแบบ FAST จะใช้เวลาในการวัดเร็วที่สุดส่วนการวัดแบบ MED จะเร็วกว่า NORMAL แต่ช้ากว่าแบบ FAST ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับกรวัดที่ความเร็วระหว่าง MED กับ NORMAL จะพบที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่ก็เพียงพอที่จะสังเกตเห็นได้ ส่วนการวัดที่ความเร็ว HI ACCURACY พบว่าสัญญาณมีความเรียบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 3 แบบแรกและมีการใช้เวลาในการวัดนานที่สุดและมีความแม่นยำที่สุด

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากงานที่ได้ทำและทดลองทั้งหมดคือ การพัฒนาสร้างโปรแกรมและทดสอบระบบวัด เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอัตรโนมิติ และ โปรแกรมวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ได้ทำในเทอมที่แล้ว ในส่วนของเทอมนี้ได้สร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ขณะที่มีแสงตกกระทบและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อชนิดพีและเอ็นไม่คงที่ ซึ่งเซลล์ที่นำมาวัดเป็นเซลล์ต้นแบบซึ่งเมื่อทำการวัดแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน และยังสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางและนำไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ต่อไป

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลของความต้านทานเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาค่าแบบประมาณได้จากสมการที่ (4.4) โดยนำหลักทฤษฎีความต้านทานในอุดมคติเข้ามาพิจารณา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกคือความต้านทานอนุกรม(R_s) เมื่อพิจารณาในกรณีที่กระแสสูงๆ (บริเวณ C) เมื่อ ($V > V_{oc}$) จะได้ $R_s = \frac{\Delta V}{I'}$ ส่วนที่ 2 คือ ความต้านทานขนาน (R_{sh}) สามารถหาค่าแบบประมาณได้จากสมการที่ (4.4) เมื่อพิจารณาในกรณี $R_s = 0$ และเมื่อพิจารณาเทอมของ $\exp \frac{qV}{nkT}$ เมื่อ $V \rightarrow 0$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ประมาณเท่ากับ 1 เราจะได้

$$R_{sh} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - I_0 \frac{q}{nkT} \right]^{-1}$$

นอกจากนี้จากวงจรความต้านทานในอุดมคติเรายังสามารถวิเคราะห์ผลของ กระแสอิ่มตัว (Saturation current) ได้จากสมการที่ (4.4) ได้โดยเราสามารถหา กระแสอิ่มตัว ได้จากเส้นตรงที่ตัดแกน y และสามารถวิเคราะห์ได้จากรูปที่ (4.8) และ ยังสามารถหา n (Ideality factor) โดยประมาณจากความชันในช่วงของ n (Ideality Factor) หรือในช่วง B โดยที่ n หาได้จากเส้นความชัน (Slope = $\frac{q}{nkT}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้สามารถแบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์
2. สร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิและหัววัดเซลล์แสงอาทิตย์
3. ตัวโปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมา 2 โปรแกรม คือ

3.1 โปรแกรมวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 โปรแกรมวัดสภาพต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์

ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมานี้จะเป็นประโยชน์ในการที่จะช่วยในการ

วิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้โดยง่ายและยังเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมแก่ผู้ที่จะมาทำตัวโครงการนี้ต่อไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช , “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” , ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2544
2. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช , “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์” , ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545
3. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์. เทคโนโลยีการสร้างและการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.
4. คู่มือเครื่องม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม1.
กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
5. El-Adawi , “A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V. Characteristic curve considering its shunt resistance- new approach” , Physics Department, Faculty of Science, Saudi Arabia.
6. Ewa Radziemska , “ Dart-I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells ” ,
Chemical Faculty Gdansk University of Technology, 2004
7. Guillermo Santana, Arturo Morales-Acevedo , ” Gettering defects by aluminum upon the dark and illuminated I characteristics of N^+P silicon solar cells” , Departamento de Ingenieria Eléctrica, Mexico, D. F.
8. Martin A.Green “ SOLARCELL ” , Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.07632 , 1982.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

q	Electronic charge	1.602E-19	Coulomb
c	Velocity of light in vacuum	3.00E8	m/s
h	Planck's constant	6.625E-34	Joule-s
k	Boltzmann's constant	1.380E-23	Joule/K
kT/q	thermal voltage	0.02586	V(at 300 K)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้