

โมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาว  
ของระบบโฟโตโวลตาอิก

I-V MODULE FOR LONG-TERM PERFORMANCE EVALUATION  
OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-502-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาว  
ของระบบโฟโตโวลตาอิก

I-V MODULE FOR LONG-TERM PERFORMANCE EVALUATION  
OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM



สณชัย มานะพิทักษ์พงศ์

SONCHAI MANAPITAKPONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 49589  
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-502-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**I-V MODULE FOR LONG-TERM PERFORMANCE EVALUATION  
OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2003**

**ISBN 974-324-502-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก
นักศึกษา	นายสนุชัช มานะพิทักษ์พงศ์
รหัสประจำตัว	41065001
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชค

### บทคัดย่อ

โมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิกได้พัฒนาให้มีราคาต่ำ โมดูลได้สร้างขึ้นโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ สัญญาณค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 3 kW ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ จะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 2 ช่อง โปรแกรมลดปริมาณข้อมูลที่ได้พัฒนาขึ้นจะทำการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิก ได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าฟิลแฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรม ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้นี้จะได้รับการบันทึกพร้อมกับค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิได้แสงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิของอากาศ ลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 5 นาที ในทุกๆ วัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอตัวอย่างผลการทดลองของค่าพารามิเตอร์และค่าประสิทธิภาพของระบบตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

<b>Thesis Title</b>	I-V Module for Long-term Performance Evaluation of Photovoltaic System
<b>Student</b>	Mr. Sonchai Manapitakpong
<b>Student ID.</b>	41065001
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Wichit Sirichote

### ABSTRACT

A low-cost I-V module for long-term performance evaluation of a grid-connected photovoltaic power system has been developed. The module was built using dedicated microcontroller boards and a linux server. Current and voltage signals from the operation of solar inverter and a 3kW PV array were digitized with a 2-channel 10-bit ADC. Data reduction software was developed to extract the performance parameters, i.e. short circuit current, open circuit voltage, maximum power, Fill-Factor, and series resistance. The insolation, PV back panel and ambient temperatures were also measured. All data are recorded every 5 minutes everyday. The report presents the result of exemplary experiment for performance parameters and system efficiency from January to April 2003.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา และแนะนำผู้วิจัยตลอดจนเป็นตัวอย่างที่ดีในการทำงานตลอดมา รวมถึงอนุเคราะห์จัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา รองศาสตราจารย์ ดร. จิตินัย แก้วแดง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประยงค์ ดวงดี ที่กรุณาให้คำชี้แนะ และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า รวมถึงบิดา-มารดา ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ รวมทั้งบุคคลที่มีความปรารถนาดีมอบให้ข้าพเจ้าทุกท่าน

สถิตย์ มานะพิทักษ์พงศ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 หลักการและเหตุผล.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ฟิสิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1 โครงสร้างและรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1.1 รอยต่อเอกพันธ์.....	7
2.1.2 รอยต่อวิวิธพันธ์.....	7
2.1.3 รอยต่อกำแพงข้อตึก.....	8
2.2 หลักการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	8
2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.3.1 ค่ากระแสลัดวงจร.....	11
2.3.2 ค่าแรงดันวงจรเปิด.....	11
2.3.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	12
2.3.4 ค่าฟิลแฟคเตอร์.....	12
2.3.5 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสง.....	13
2.3.6 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.7 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ค่าความต้านทานอนุกรม.....	14
2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.4.1 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม.....	16
2.4.2 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน.....	17
2.4.3 บายพาสส์ไดโอด.....	18
2.4.4 บล็อกกิ้งไดโอด.....	18
บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าโฟโต โวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า.....	20
3.1 ชุดเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
3.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	21
3.1.2 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
3.1.3 ทิศทางการติดตั้งชุดเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
3.2 อินเวอร์เตอร์.....	26
3.2.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	26
3.2.2 สัญญาณ ไฟฟ้าของแรงดัน และกระแส.....	29
บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย.....	31
4.1 โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดด.....	32
4.1.1 การวัดอุณหภูมิด้วย DS1820.....	33
4.1.2 การวัดความเข้มแสงแดดด้วยไพราโนมิเตอร์.....	34
4.2 การรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลวัดอุณหภูมิและความเข้มแสงกับ โมดูลวัด สัญญาณ I-V.....	36
4.2.1 พอร์ตอนุกรมแบบบัส RS-485.....	36
4.2.2 IC เบอร์ SN75176B.....	38
4.2.3 ลำดับขั้นตอนการรับส่งข้อมูลบัส RS-485.....	39
4.3 โมดูลวัดสัญญาณ I-V.....	40
4.3.1 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การวัดค่ากระแส.....	43
4.3.3 การวัดค่าพลังงานไฟฟ้า.....	45
4.4 การรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ I-V กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์.....	47
4.4.1 พอร์ตขนาน.....	47
4.4.2 การกำหนดคุณสมบัติของขาสัญญาณพอร์ตขนาน.....	48
4.4.3 Serial Peripheral Interface (SPI).....	49
4.5 ลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์.....	52
4.5.1 การหาสมการตัวแทนของกราฟ I-V.....	52
4.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสั้นใจ.....	58
4.5.3 การหาค่ากระแสลัดวงจร.....	59
4.5.4 การหาค่าแรงดันวงจรเปิด.....	60
4.5.5 การหาค่ากระแสสูงสุด แรงดันสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	62
4.5.6 การหาค่าฟิลแฟคเตอร์.....	63
4.5.7 การหาค่าความต้านทานอนุกรม.....	63
4.5.8 การหาค่ากระแสRMS ค่าแรงดันRMS และค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ.....	64
4.5.9 การหาค่าพลังงานแสงแตรวม.....	66
4.5.10 การหาค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
4.5.11 การหาค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าพลังงานไฟฟ้ารวม.....	68
4.5.12 การหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ.....	68
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	69
5.1 กราฟความสัมพันธ์ I-V ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน.....	70
5.2 กราฟความสัมพันธ์ I-V ที่ระดับอุณหภูมิต่างกัน.....	71
5.3 ค่าความต้านทานอนุกรมที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน.....	72
5.4 ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน.....	73
5.5 ปริมาณแสงแตรวมที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน.....	74
5.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	75
5.7 ค่าพลังงานรวมไฟฟ้าที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8	ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้า กระแสสลับที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน.....	77
5.9	ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ในหนึ่งวัน.....	78
5.10	ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศ.....	79
5.11	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	80
5.12	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	81
5.13	ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	82
5.14	ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ ชั่วโมง ในหนึ่งวัน.....	83
5.15	ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	84
5.16	ปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	85
5.17	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	86
5.18	ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	87
5.19	ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	88
5.20	ค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	89
5.21	ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	90
5.22	ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ โดยเฉลี่ยต่อวัน เปรียบเทียบกับ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือน เมษายน พ.ศ. 2546.....	91
5.23	ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	92
5.24	ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา	
6.1 สรุปผลการวิจัยและพัฒนาโมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพ ระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก.....	94
6.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข.....	96
6.3 แนวทางวิจัยและพัฒนาในอนาคต.....	98
เอกสารอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก ก. United States Patent Number 5,898,858.....	101
ภาคผนวก ข. วงจรที่ได้พัฒนาขึ้น.....	113
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างข้อมูลวันที่ 14 มกราคม 2546.....	116
ประวัติผู้เขียน.....	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่ทำต่อระนาบของเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละวันตลอดทั้งปี บริเวณกรุงเทพฯ.....	25
4.1 มาตรฐาน RS-485.....	37
4.2 แสดงคุณสมบัติของพอร์ตขนาบ.....	47
4.3 ตัวอย่างการหาค่าแรงดันวงจรเปิด.....	61
4.4 ตัวอย่างการหาค่าความต้านทานอนุกรม.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....5
2.2	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว.....6
2.3	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกย่อยหลายผลึก.....6
2.4	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิสหรือผลึกอสัณฐาน.....6
2.5	แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเอกพันธ์.....7
2.6	แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อวิวิธพันธ์.....7
2.7	แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อกำแพงต่อชอตต์กี.....8
2.8	แถบพลังงานของรอยต่อ P-N เมื่อมีโฟตอนตกกระทบ.....8
2.9	วงจรถ่ายทอดสัญญาณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....10
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....10
2.11	วงจรมุมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่ากระแสลัดวงจร.....11
2.12	วงจรมุมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่าแรงดันวงจรเปิด.....11
2.13	พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด.....12
2.14	ผลของความเข้มแสงที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....13
2.15	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....14
2.16	ผลของค่าความต้านทานอนุกรมที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....14
2.17	เซลล์แสงอาทิตย์ (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปทรงกลม.....15
2.18	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบกันขึ้นเป็นแผง.....16
2.19	การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม และกราฟแสดงค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น.....17
2.20	การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน และกราฟแสดงค่ากระแสที่เพิ่มขึ้น.....17
2.21	แสดงการต่อบายพาสส์ไดโอดในวงจร.....18
2.22	แสดงการต่อบล็อกกิงไดโอดในวงจร.....18
3.1	ระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า.....20
3.2	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย.....21
3.3	เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SEMENS รุ่น SP-75.....21
3.4	การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....22
3.5	การเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของโลก.....23
3.6	Solar Declination.....23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	การเปลี่ยนแปลงของ Solar Declination ตลอดทั้งปี.....24
3.8	อินเวอร์เตอร์และแผงควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย.....26
3.9	แผนภาพบล็อกของอินเวอร์เตอร์.....27
3.10	การทำงานของอินเวอร์เตอร์ เมื่อ (ก) เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นบวก และ (ข) เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นลบ.....28
3.11	วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์.....29
3.12	สัญญาณไฟฟ้าของค่าแรงดัน.....29
3.13	สัญญาณไฟฟ้าของค่ากระแส.....30
4.1	โมดูล I-V ที่ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า.....31
4.2	โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และความเข้มแสงแดดที่ได้พัฒนาขึ้น.....32
4.3	หัววัดอุณหภูมิ DS1820.....33
4.4	การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิของอากาศ.....33
4.5	การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์.....34
4.6	ไพราโนมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....34
4.7	โครงสร้างของไพราโนมิเตอร์.....35
4.8	วงจรสำหรับวัดค่าความเข้มแสงแดด.....36
4.9	การเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างตัวรับ และตัวส่งในมาตรฐาน RS-485.....37
4.10	IC เบอร์ SN75176B สำหรับการรับส่งข้อมูลในมาตรฐาน RS-485.....38
4.11	วงจรสำหรับรับส่งข้อมูลบัส RS-485.....39
4.12	โมดูลวัดสัญญาณ I-V .....40
4.13	วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า.....41
4.14	ข้อมูลค่าแรงดันจำนวน 600 ข้อมูล.....42
4.15	ข้อมูลค่าแรงดันที่ทำการคัดเลือกแล้ว.....43
4.16	วงจรสำหรับวัดค่ากระแส.....43
4.17	ข้อมูลค่ากระแสจำนวน 600 ข้อมูล.....44
4.18	ข้อมูลค่ากระแสที่ทำการคัดเลือกแล้ว.....45
4.19	รูปงานหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง.....45
4.20	วงจรสำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้า.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	ขั้วต่อแบบDB-25.....48
4.22	วงจรที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลวัดสัญญาณ I-V กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์.....49
4.23	แผนภาพบล็อกแสดงการติดต่อกันระหว่างตัวแม่และตัวลูก.....50
4.24	ไทม์มิงไดอะแกรมแสดงการส่งข้อมูลระหว่างตัวแม่และตัวลูก.....51
4.25	กราฟ I-V ของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ได้จากข้อมูลดิบ.....52
4.26	กราฟ I-V จากสมการตัวแทน เปรียบเทียบกับกราฟ I-V ที่ได้จากข้อมูลดิบ.....57
4.27	กราฟแสดงค่ากระแสลัดวงจรที่จุดตัดแกน y.....59
4.28	กราฟแสดงค่าแรงดันวงจรเปิดที่จุดตัดแกน x.....60
4.29	กราฟแสดงค่ากระแสสูงสุด ค่าแรงดันสูงสุด และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด.....62
4.30	กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรม.....63
4.31	กราฟแสดงตำแหน่งของแรงดันคายอด.....65
4.32	แสดงการคำนวณพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแผง.....67
4.33	แสดงการคำนวณพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์.....67
5.1	การรายงานข้อมูลผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต.....69
5.2	กราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน.....70
5.3	กราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับอุณหภูมิต่างกัน.....71
5.4	กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรมที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน.....72
5.5	กราฟความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน.....73
5.6	กราฟแสดงค่าปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน.....74
5.7	กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน.....75
5.8	กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน.....76
5.9	กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสลัดที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน.....77
5.10	กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวัน.....78
5.11	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศ.....79
5.12	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสสูงสุด และค่ากระแสของไฟกระแสลัด.....80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าแรงดันสูงสุด และค่าแรงดันของไฟกระแสสลับ.....	81
5.14 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า สูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ กับค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับ.....	82
5.15 กราฟแสดงค่าฟลักเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	83
5.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน.....	84
5.17 กราฟแสดงปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	85
5.18 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	86
5.19 กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	87
5.20 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้า ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน.....	88
5.21 กราฟแสดงค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	89
5.22 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	90
5.23 กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับโดยเฉลี่ยต่อวัน เปรียบเทียบกับ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	91
5.24 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	92
5.25 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศ โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมากในชีวิตประจำวัน อุปกรณ์เครื่องใช้เครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ ล้วนใช้ไฟฟ้าเสียเป็นส่วนมาก อีกทั้งความเจริญยังได้ขยายตัวไปยังชนบท ในพื้นที่ห่างไกลต่างๆ ได้มีไฟฟ้าใช้กันอย่างทั่วถึง ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการผลิตไฟฟ้าจึงต้องเพิ่มขึ้นตามความต้องการนี้ด้วย

การผลิตกระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในปัจจุบัน กระทำกันในโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่โดยใช้ทรัพยากรธรรมชาติจำนวนมาก เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้ก็มีอยู่อย่างจำกัด และนับวันก็จะหมดลงไปเรื่อยๆ จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน เพื่อให้มีพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้อย่างเพียงพอในอนาคต และพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคต

พลังงานหมุนเวียนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานความร้อนจากใต้พิภพ เป็นต้น ในบรรดาพลังงานต่างๆ ที่กล่าวมานี้ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ในการนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีมากมายมหาศาล อีกทั้งกระบวนการแปรรูปให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ยังเป็นกระบวนการที่สะอาด และไร้มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ได้โดยอิสระในพื้นที่ห่างไกลที่ระบบไฟฟ้ายังเข้าไปไม่ถึง (Stand Alone) หรือจะเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าก็ได้ (Grid Connected)

เนื่องจากปัจจุบันพื้นที่ที่เป็นแหล่งชุมชนส่วนใหญ่ล้วนมีระบบไฟของการไฟฟ้าใช้กันอยู่แล้ว ดังนั้นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมกับสายส่งไฟฟ้า (Grid Connected Photovoltaic Power System) จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน โดยระบบดังกล่าว จะมีอายุการใช้งานได้ยาวนานกว่า 20 ปี ซึ่งประสิทธิภาพหลักของระบบจะขึ้นกับสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ การที่จะดูถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานนั้นจำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลในระยะยาว เพื่อที่จะทราบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งานหรือไม่ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เห็นความสำคัญของการสร้าง โมดูล I-V สำหรับ

เอกสารประกอบคำบรรยายวิชาฟิสิกส์ของระบบโฟโตโวลตาอิกขึ้น เพื่อใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และบันทึกข้อมูลที่ได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุง และพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างโมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ที่ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ และเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าโดยตรง การวัดจะทำในขณะที่ระบบโฟโตโวลตาอิกทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยจะวัดค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของแผงโฟโตโวลตาอิก อันได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor) และค่าความต้านทานอนุกรม เป็นต้น ข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดจะบันทึกลงในคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับประเมินประสิทธิภาพของระบบโฟโตโวลตาอิก

## 1.3 หลักการและเหตุผล

วิธีการวัดสมบัติที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกนั้น จะกระทำโดยการวัดสมบัติกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า หลังจากที่นำเซลล์แสงอาทิตย์มาเรียงต่อกันแบบอนุกรมและขนานกัน เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้น การวัดนั้นจะได้ค่าของสมบัติดังกล่าวหลังจากผลิตออกจากโรงงานภายใต้สภาวะของห้องปฏิบัติการ เมื่อนำมาใช้ร่วมกับตัวแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ หรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter) แบบทั่วไป จะไม่สามารถตรวจสอบสมบัติกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของแผงโฟโตโวลตาอิกขณะปฏิบัติงานได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ที่ได้รับการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ ดังปรากฏในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [1] ซึ่งเมื่อนำมาทำงานร่วมกับแผงโฟโตโวลตาอิกแล้ว จะทำให้การวัดสมบัติที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลตาอิกกระทำได้โดยการบันทึกค่าข้อมูลดิบของกระแส และแรงดันไฟฟ้าของแผงโฟโตโวลตาอิกในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ จากนั้นทำการลดปริมาณข้อมูลด้วยการคำนวณประมาณค่ากำลังสองต่ำสุดโดยใช้สมการ โพลีโนเมียล (Polynomial) กำลังหก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของแผงโฟโตโวลตาอิก แล้วบันทึกค่าที่ได้ลงในคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง เพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลสำหรับประเมินประสิทธิภาพของระบบโฟโตโวลตาอิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเป้าหมายมุ่งเน้นการสร้าง และพัฒนาโมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ที่ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า โดยการทำวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มตั้งแต่การศึกษา และติดตั้งระบบโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า หลังจากนั้นจะทำการศึกษาวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงโฟโตโวลตาอิก ในขณะที่กำลังทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ แล้วจึงออกแบบสร้างโมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลย่อยสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และปริมาณแสง โมดูลย่อยสำหรับวัดค่าสัญญาณ I-V และส่วนของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ (Linux Server) ซึ่งจะคอยรับข้อมูลจากโมดูลย่อยทั้งสอง แล้วนำข้อมูลที่ได้อ่านวนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของแผงโฟโตโวลตาอิก และบันทึกลงในหน่วยความจำ เมื่อสร้างโมดูล I-V เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะนำมาทำการทดลองวัดค่าและบันทึกผลอย่างต่อเนื่องทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 6:00 น. ถึง 18:00 น. ของทุกวัน โดยมีการรายงานผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ของเครื่องลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ทุกๆ 5 นาที และเนื่องจากเครื่องลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์นั้นเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จึงสามารถดูผลจากคอมพิวเตอร์ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้จากทุกที่ โดยเข้าไปที่ <http://161.246.45.243>

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอรายละเอียดของโมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ตั้งแต่หลักการเบื้องต้น แนวทางการออกแบบ จนถึงการทำโมดูลไปใช้งาน โดยแบ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนออกเป็นบทย่อยๆ ดังนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงฟิสิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกี่ยวข้อง ลักษณะโครงสร้าง และรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการแปลงพลังงาน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจถึงพื้นฐาน และหลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไป ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบผลิตไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า ตั้งแต่ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ วิธีการเชื่อมต่อของระบบ หลักการทำงาน และสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้เข้าใจ และเรียนรู้ถึงพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการออกแบบ และพัฒนาโมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก โดยจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ได้เลือกใช้ วิธีการวัด และการคำนวณอย่างละเอียดในแต่ละส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และปริมาณแสง โมดูลสำหรับวัดสัญญาณ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ และลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมวลผล และบันทึกข้อมูล เนื้อหาในบทที่ 5 เป็นผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล โดยการนำโมดูล I-V ที่สร้างขึ้นมาทำการทดลองวัด และบันทึกค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และวิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลที่ได้ในเบื้องต้น สุดท้ายในบทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการทดลอง พร้อมทั้งแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

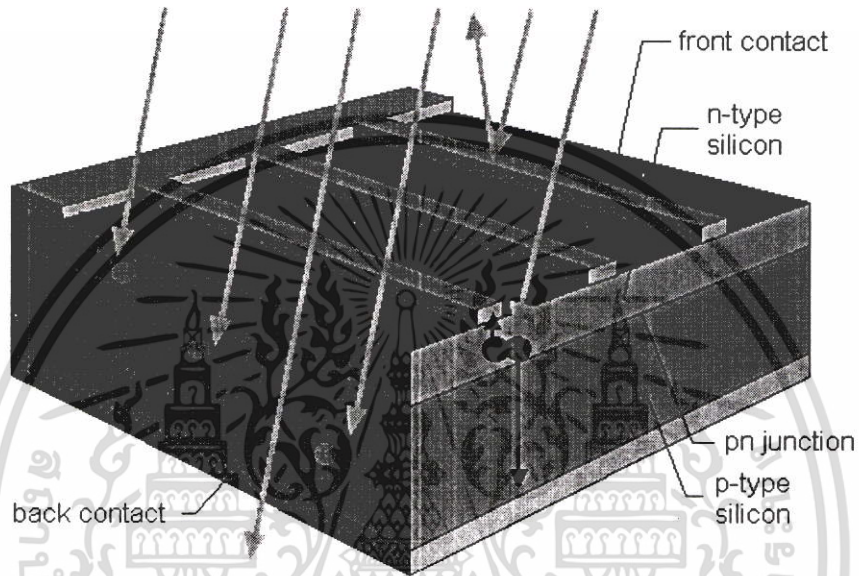


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

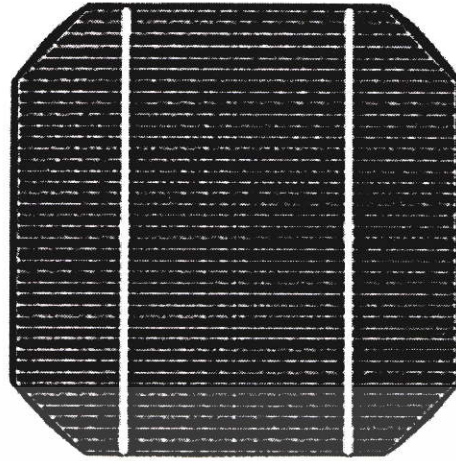
# ฟิสิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1 โครงสร้างและรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

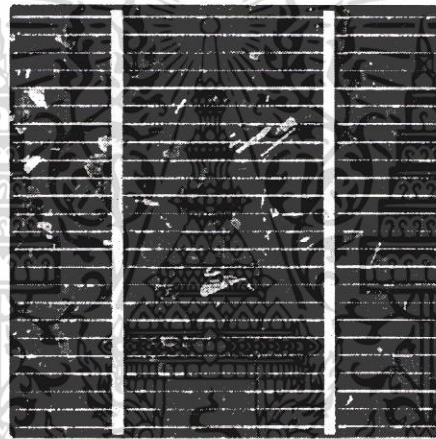


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

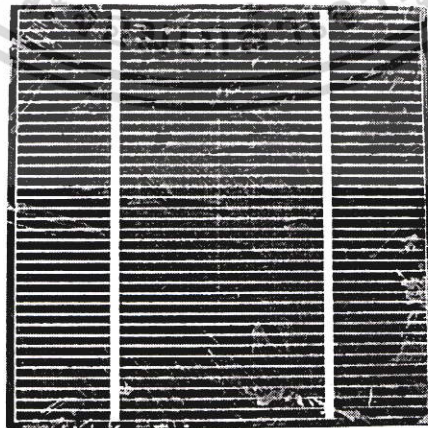
โครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีรอยต่ออยู่ภายในความหนาของเซลล์ประมาณ 10-300  $\mu\text{m}$  ผิวหน้าของเซลล์ด้านรับแสงจะมีขั้วโลหะไฟฟ้าคล้ายๆ นิ้วมือแผ่อยู่ และฉาบทับด้วยฟิล์มของสารด้านการสะท้อน ที่ผิวล่างจะมีขั้วไฟฟ้าอีกอันเคลือบปิดผิวทั้งหมด ขั้วไฟฟ้านี้ทำหน้าที่รวมพาหะซึ่งเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ออกสู่วงจรภายนอก สารกึ่งตัวนำอาจอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) ผลึกย่อยหลายผลึก (Poly Crystalline) และอะมอร์ฟัส (Amorphous) หรือผลึกอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว



รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกย่อยหลายผลึก



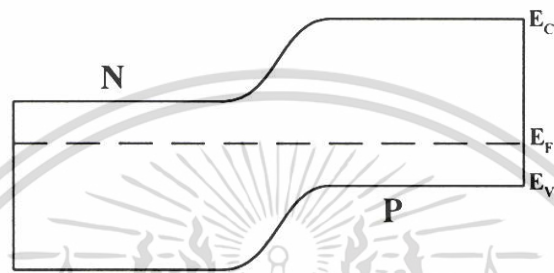
รูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส หรือผลึกอสัณฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อาจแบ่งตามประเภทรอยต่อภายในเซลล์ได้ดังนี้

### 2.1.1 รอยต่อเอกพันธ์ (Homojunction)

รอยต่อเอกพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ภายในเซลล์จะมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี ซึ่งได้มาจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน เช่น ซิลิคอน

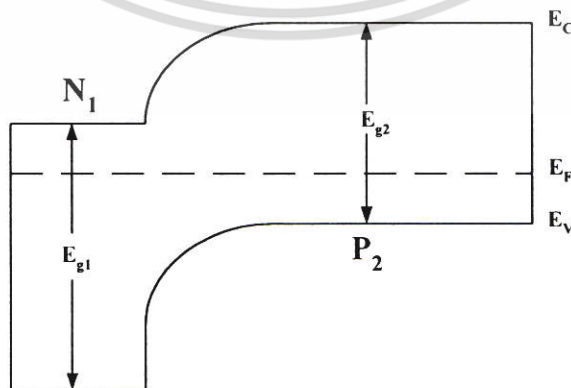


เมื่อ  $E_c$  คือ แถบนำไฟฟ้า  
 $E_f$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี  
 $E_v$  คือ แถบเวเลนซ์

รูปที่ 2.5 แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเอกพันธ์

### 2.1.2 รอยต่อวิวิธพันธ์ (Heterojunction)

รอยต่อวิวิธพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ภายในเซลล์จะมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งสาร เช่น รอยต่อระหว่าง As/GaAs, Cu<sub>2</sub>S/CdS เป็นต้น

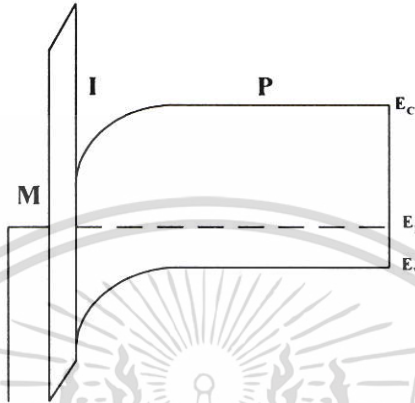


รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อวิวิธพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 รอยต่อกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี (Schottky Barrier Junction)

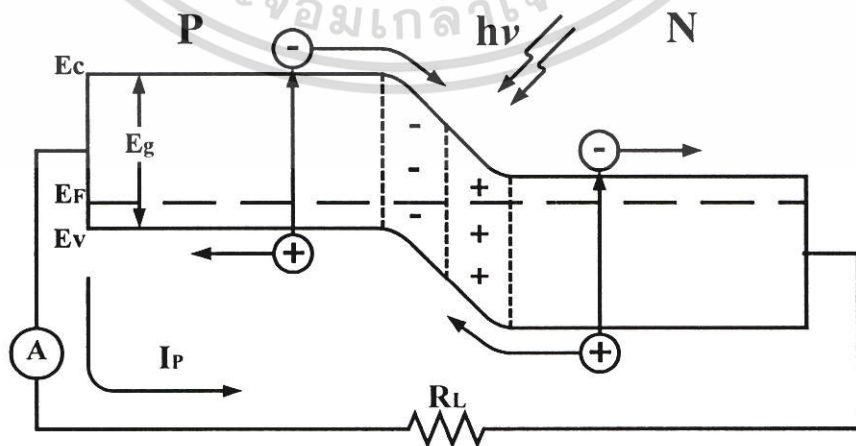
รอยต่อกึ่งตัวนำแบบชอตต์กีดังแสดงในรูปที่ 2.7 ภายในเซลล์จะประกอบด้วยรอยต่อระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ เช่น รอยต่อระหว่างพลาตินัม กับซิลิคอน(Pt/Si)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี

## 2.2 หลักการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถอธิบายในลักษณะของรอยต่อเอกพันธ์แบบ P-N ดังแสดงในรูปที่ 2.8



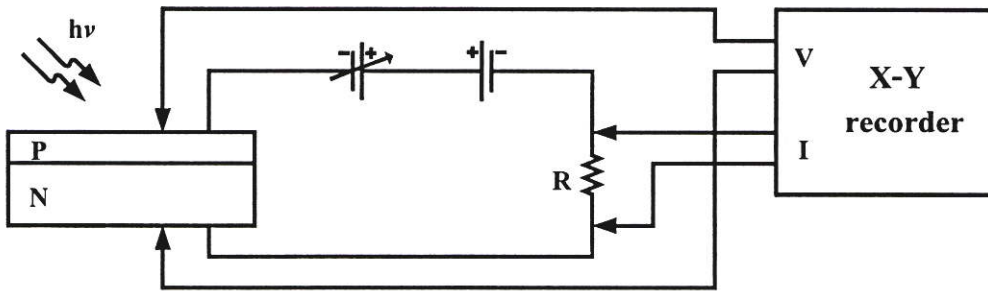
เอกสารรูปที่ 2.8 แผนพลังงานของรอยต่อ P-N เมื่อมีโฟตอนตกกระทบบนอนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพิจารณาว่าในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งแต่ละโฟตอนมีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  เมื่อโฟตอนที่ตกกระทบบนรอยต่อ P-N มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) จะส่งผลให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำยกระดับตัวเองจากแถบเวเลนซ์ ( $E_v$ ) ไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำไฟฟ้า ( $E_c$ ) และได้ทิ้งให้เกิดโฮล (hole) ซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบเวเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ข้ามไปยังด้าน N และ โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังด้าน P เมื่อต่อโหลดภายนอก ( $R_L$ ) จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า

### 2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

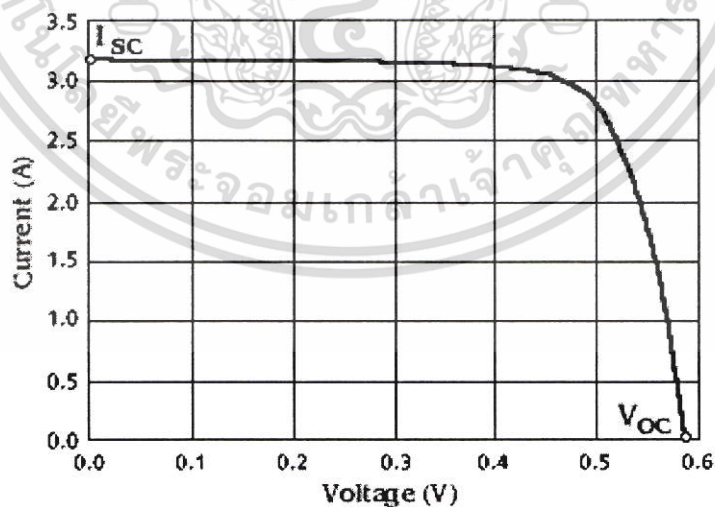
สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย การหาเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถวัดได้ด้วยวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ภายใต้ สภาวะมาตรฐานที่กำหนดคือ AM 1.5 ความเข้มแสงที่  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิของเซลล์คงที่  $25^\circ\text{C}$

AM ย่อมาจาก Air Mass โดยความเข้มของแสงอาทิตย์ที่วัดที่ AM 0 คือสภาพของแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก เป็นมาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การ NASA กล่าวคือ เป็นสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่มีกำลังแสงคิดรวมทั้งหมด โดยการอินทิเกรตทุกช่วงความยาวคลื่นจะได้ค่าความเข้มแสง  $135.5 \text{ mW/cm}^2$  ส่วนสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่ AM 1.5 เป็นมาตรฐานอันหนึ่งที่ใช้กันในการกำหนดสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ แสงอาทิตย์ที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหมอก และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ความเข้มแสงจะมีค่า  $100 \text{ mW/cm}^2$



รูปที่ 2.9 วงจรที่ใช้วัดเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์จะได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมเหมือนกับแสงอาทิตย์ โดยมีความเข้มแสงที่  $1000 \text{ W/m}^2$  และควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ให้คงที่อยู่ที่  $25^\circ\text{C}$  ค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปในวงจรเกิดจากการนำตัวกำเนิดแรงดันที่ปรับค่าได้มาต่อกลับขั้วกับแบตเตอรี่ ซึ่งทั้งสองตัวนี้ทำหน้าที่เหมือนกับโหลดที่ปรับค่าได้ การวัดค่าแรงดันกระทำโดยการวัดคร่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนการวัดค่ากระแสทำได้โดยการนำตัวต้านทานที่มีค่าต่ำๆ มาต่ออนุกรมเข้าไปในวงจร แล้วจึงวัดแรงดันที่ตกคร่อมบนตัวต้านทานนั้นอีกครั้งหนึ่ง สัญญาณของค่ากระแส และแรงดันจะถูกบันทึกลงบนเครื่องบันทึก x-y โดยให้แกน x เป็นค่าแรงดัน และแกน y เป็นค่ากระแส จะได้กราฟความสัมพันธ์ของค่ากระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.10

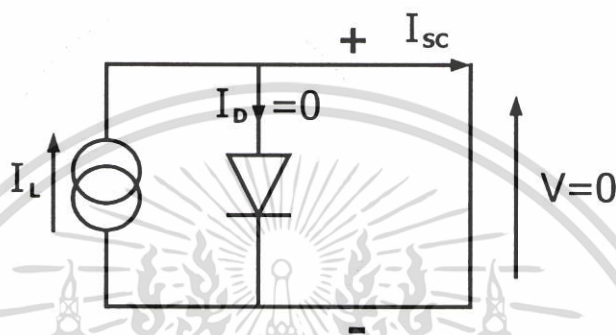


รูป 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current)

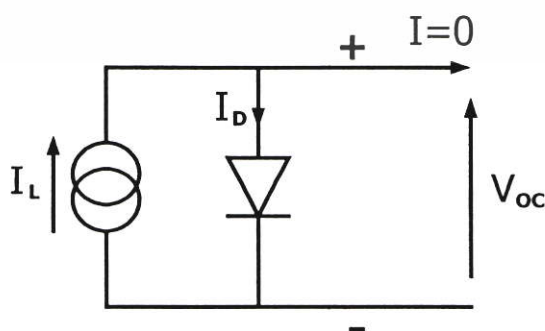
ค่ากระแสลัดวงจร หรือ Short Circuit Current ( $I_{sc}$ ) คือค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์เสมือนกับการลัดวงจรเข้าด้วยกัน ทำให้ค่ากระแสที่วัดได้มีค่าสูงสุดในขณะที่ค่าแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่ากระแสลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่ากระแสลัดวงจร

### 2.3.2 ค่าแรงดันวงจรเปิด (Open Circuit Voltage)

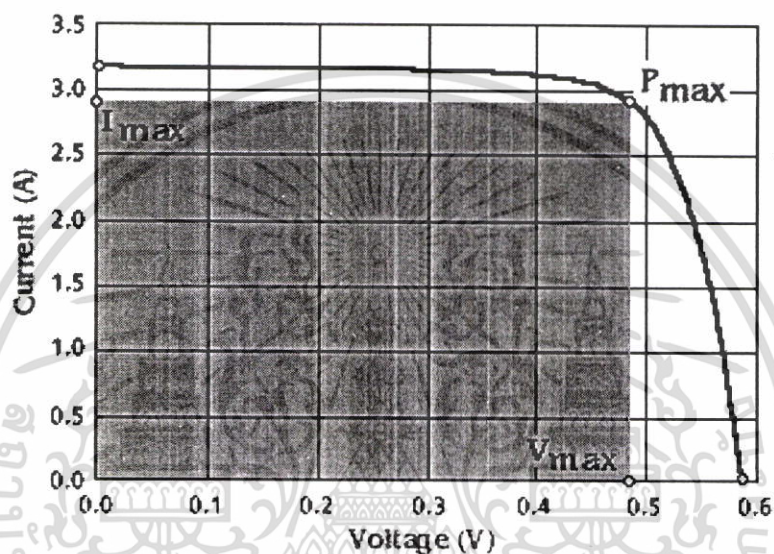
ค่าแรงดันวงจรเปิดหรือ Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีค่าสูงมากๆ เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ เสมือนกับการเปิดวงจรออกจากกัน กระแสไม่สามารถไหลผ่านจนครบวงจรได้ ทำให้ค่ากระแสที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด ซึ่งวงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่าแรงดันวงจรเปิดแสดงดังรูปที่ 2.12



เอกสารรูปที่ 2.12 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่าแรงดันวงจรเปิดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power)

ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่มากที่สุดภายใต้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยหน่วยของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีหน่วยเป็นวัตต์สูงสุด ( $W_p$ ) หรือ Peak Watt ซึ่งค่านี้จะถูกระบุไว้ในคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 2.13 พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าแสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

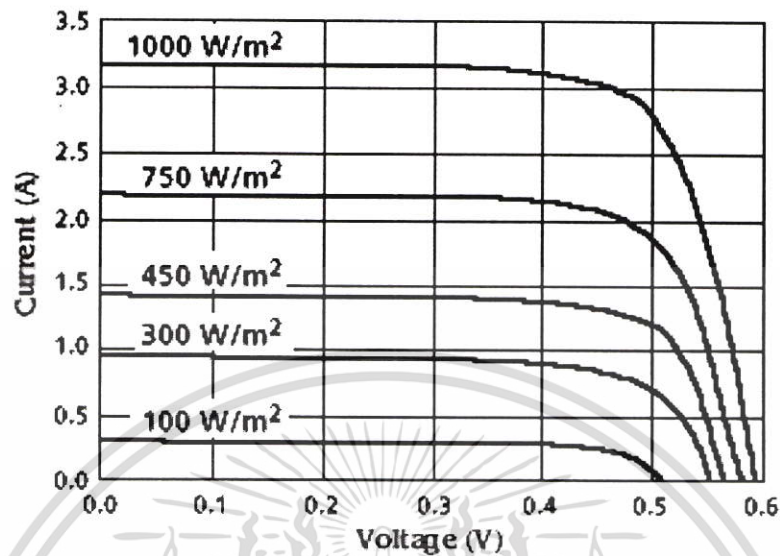
### 2.3.4 ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor)

ค่าฟิลแฟคเตอร์ คือ อัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ต่อแรงดันวงจรเปิดคูณกับค่ากระแสลัดวงจร

$$FF = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.1)$$

ค่าฟิลแฟคเตอร์เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าที่คำนวณได้จะเป็นเลขทศนิยมอยู่ในช่วง 0-1 ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป จะถือว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดี

### 2.3.5 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



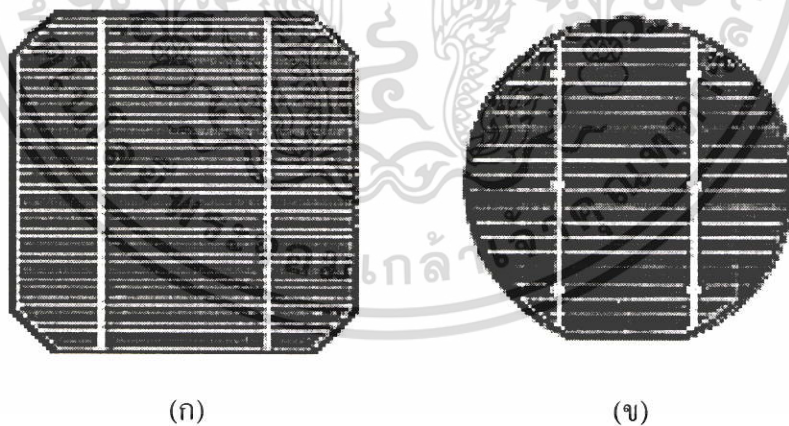
รูปที่ 2.14 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง สามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดลองภายใต้สภาวะการควบคุมให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่  $25^{\circ}C$  แล้วทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงที่ฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มต่างกัน พบว่าปริมาณกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความเข้มแสง คือเมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น 50 % ปริมาณกระแสก็จะเพิ่มขึ้น 50 % เช่นกัน แต่จะไม่มีผลมากนักต่อค่าแรงดัน คือเมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 2.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอนุกรม สามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ทำการทดลองภายใต้สภาวะการควบคุมให้ปริมาณความเข้มแสงที่ฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่อุณหภูมิคงที่  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอนุกรมภายในวงจรให้มีค่าต่างๆ กัน จะพบว่าค่ากระแสลัดวงจร และค่าแรงดันวงจรเปิดที่วัดได้จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่เส้นกราฟจะมีความชันลดลงเมื่อค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าลดลง หรือเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานลดลงเมื่อค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้น

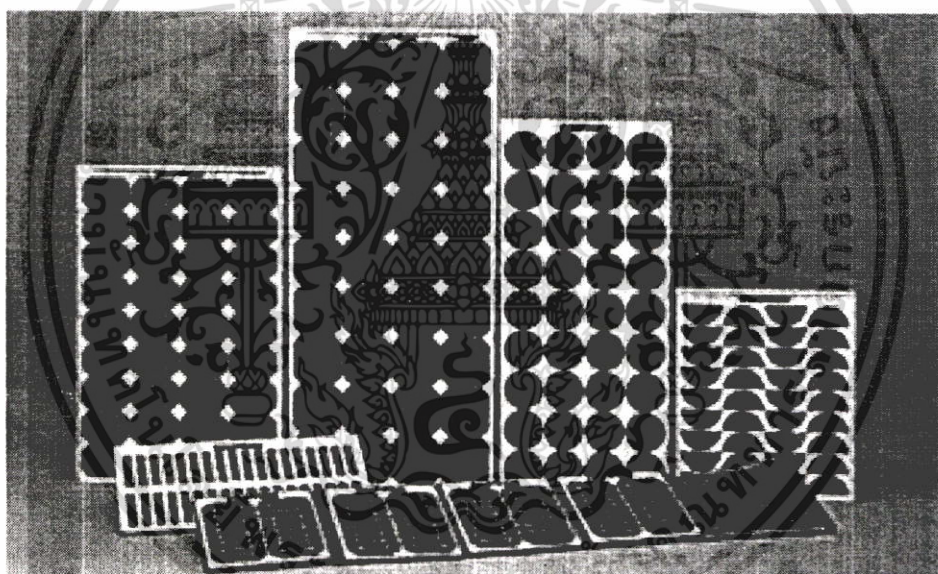
## 2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้งานโดยทั่วไปนั้น ส่วนมากจะประกอบกันในลักษณะเป็นแผง โดยภายในแผงจะมีเซลล์ย่อยที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ กัน ที่นิยมกันมากมีอยู่สองแบบ คือแบบสี่เหลี่ยม ( $100 \times 100 \text{ mm}$ ) และแบบกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง  $100 \text{ mm}$ ) โดยแต่ละเซลล์จะมีแรงดันคงที่ประมาณ  $0.5 \text{ V}$  แต่ขนาดของกระแสจะเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่หน้าตัดของชิ้นเซลล์ ซึ่งโดยเฉลี่ยจะให้ค่ากระแสลัดวงจรประมาณ  $3 \text{ A}$  ต่อพื้นที่  $100 \text{ cm}^2$



รูป 2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปทรงกลม

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะออกแบบโดยการนำชิ้นเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆอันมาต่อกันแบบอนุกรม หรือแบบขนานตามความต้องการ ซึ่งโดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะออกแบบให้มีแรงดันมาตรฐานที่ 1.5 V, 6 V, 12 V, 24 V และ 48 V เป็นต้น เซลล์ที่เชื่อมต่อกันแล้วจะต่อสายไฟออกมาภายนอก ทำเป็นขั้วบวกและขั้วลบไว้ที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ด้านหน้าปิดทับด้วยกระจกนิรภัยที่สามารถให้แสงผ่านได้สูง (High Transmission Glass) โดยให้แสงผ่านได้ถึง 92 % และยังเคลือบด้วยสาร Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) เป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้น และฝุ่นละอองถูกเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ด้านหลังของแผงจะมีแผ่นยึดด้านหลัง (Back Cover) ทำจากสารโพลีเมอร์ที่มีชื่อทางการค้าว่า TEDLAR ซึ่งจะมีแผ่นอลูมิเนียมบางๆ แทรกอยู่ตรงกลางเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แผงเซลล์จะถูกเข้ากรอบด้วยอลูมิเนียมชุบแข็งเพื่อให้อึดทนทาน และง่ายต่อการยึดติดกับโครงสร้างต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 2.18

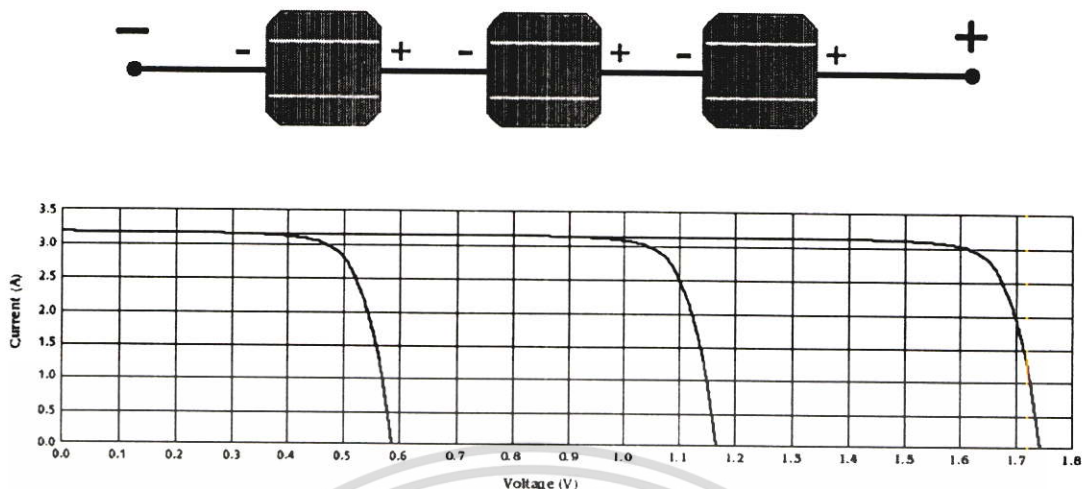


รูปที่ 2.18 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบกันขึ้นเป็นแผง

#### 2.4.1 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมนั้น จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ารวมของเซลล์ทั้งหมดมีค่าสูงขึ้นในขณะที่ค่ากระแสจะมีค่าเท่าเดิม ดังแสดงจากกราฟในรูปที่ 2.19 โดยทั่วไปแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกออกแบบให้ใช้กับระบบไฟฟ้าขนาด 12 V จึงต้องนำเอาชิ้นเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 32-36 ชิ้น เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 16-18 V เพื่อให้เพียงพอที่จะประจุไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ขนาด 12 V ได้

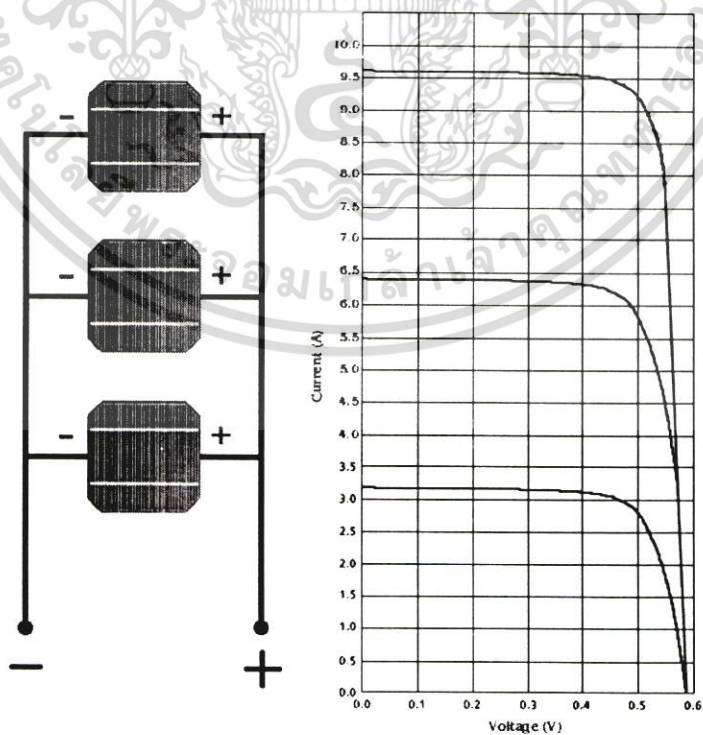
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม และกราฟแสดงค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น

### 2.4.2 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

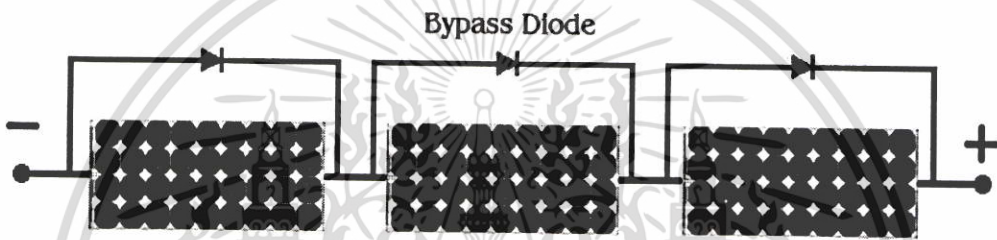
การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะทำให้ค่ากระแสรวมของเซลล์ทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าแรงดันจะมีค่าเท่าเดิม ดังแสดงจากกราฟในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน และกราฟแสดงค่ากระแสที่เพิ่มขึ้น

### 2.4.3 บายพาสไดโอด (Bypass Diode)

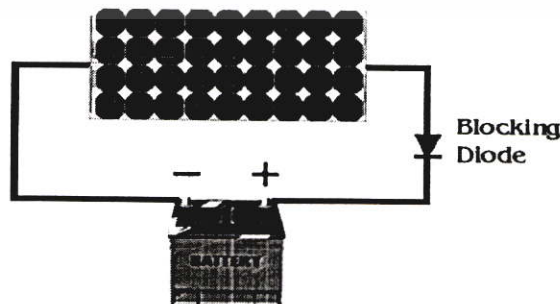
การต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้แรงดันสูงนั้นจะต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันแบบอนุกรม ถ้าเซลล์ใดเซลล์หนึ่งในวงจรที่ต่ออนุกรมกันอยู่ เกิดไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้เช่น ในกรณีที่เซลล์นั้นถูกเงาบังทำให้ไม่ได้รับแสงอาทิตย์ เซลล์นั้นจะมีสภาพเหมือนกับไดโอดที่อยู่ในสภาวะไบแอสย้อนกลับ (Reverse Bias) มีผลทำให้ตลอดทั้งวงจรนั้นไม่สามารถจ่ายพลังงานออกมาได้ และตัวเซลล์นั่นเองก็อาจจะเกิดความเสียหายได้ วิธีการแก้ไขทำได้โดยการต่อบายพาสไดโอดคร่อมเซลล์ดังแสดงในรูป 2.21 เมื่อเซลล์ใดเซลล์หนึ่งถูกเงาบัง กระแสจากเซลล์อื่นๆ ก็สามารถไหลผ่านตัวบายพาสไดโอดจนครบวงจรได้ เพียงแต่พลังงานที่ได้จะมีปริมาณลดลง



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อบายพาสไดโอดในวงจร

### 2.4.4 บล็อกกิ้งไดโอด (Blocking Diode)

ในระบบไฟฟ้าแบบสแตนด์อโลน (Stand Alone) ส่วนมากมักจะมึระบบแบตเตอรี่สำรองไว้สำหรับจ่ายไฟฟ้าให้โหลดในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ โดยจะมีบล็อกกิ้งไดโอดต่ออนุกรมอยู่ในวงจรระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลย้อนกลับเข้ามาในเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.22 แสดงการต่อบล็อกกิ้งไดโอดในวงจร ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

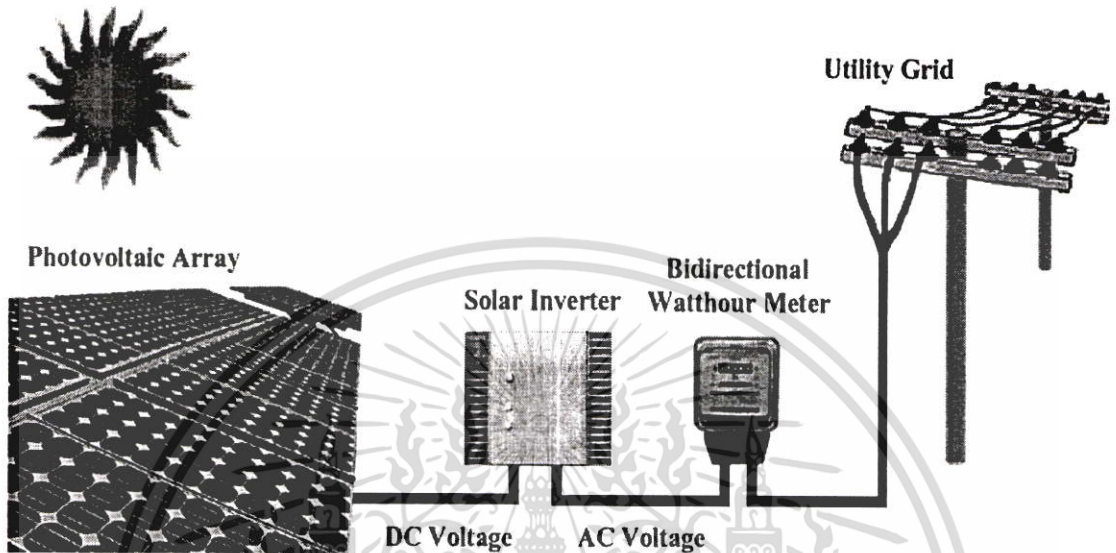
ช่วงแรกขณะที่แรงดันของแบตเตอรี่ต่ำกว่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไหลผ่านบล็อกกิ้งไดโอด ไปประจุในแบตเตอรี่ จนกระทั่งเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวบล็อกกิ้งไดโอดจะช่วยป้องกันการดิซชาร์จของแบตเตอรี่กลับเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแรงดันต่ำกว่าแบตเตอรี่เมื่อเกิดเงาบังขึ้นบนเซลล์ หรือในเวลากลางคืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า

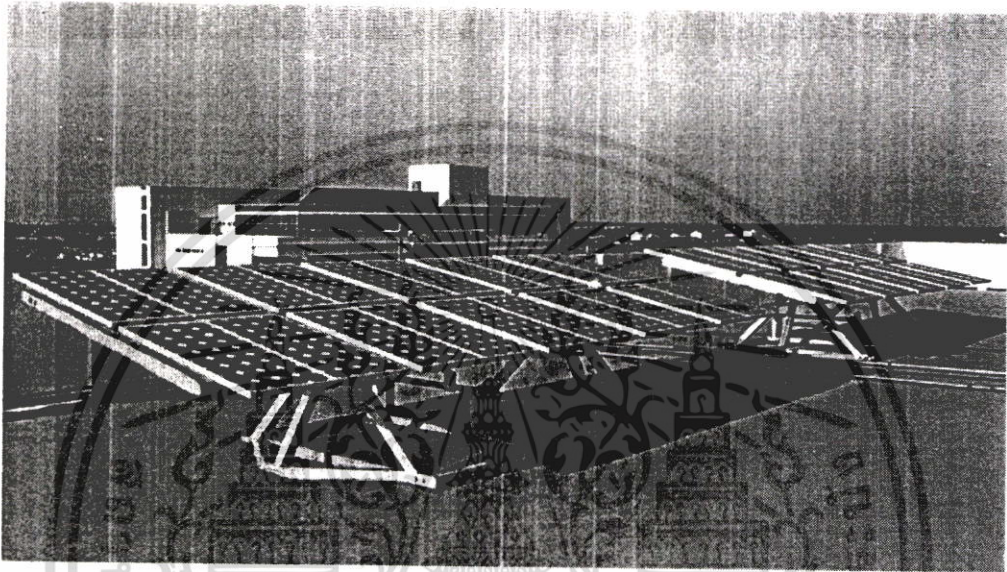


รูปที่ 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า คือระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับสายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยระบบดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นระบบเสริมให้การไฟฟ้า กล่าวคือกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในตอนกลางวันจะถูกส่งไปยังเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างภายในบ้าน ทำให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากสายส่งของการไฟฟ้ามีปริมาณลดลง ในกรณีที่ไม่มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณมากกว่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าต้องการ กระแสไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะไหลย้อนกลับเข้าไปในสายส่งของการไฟฟ้า ทำให้มาตรวัดกำลังไฟฟ้า (Watthour Meter) หมุนถอยหลังกลับ เหมือนเป็นการขายไฟคืนให้การไฟฟ้า ส่วนในเวลากลางคืนที่ระบบไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ก็ยังคงต้องใช้ไฟจากการไฟฟ้าตามปกติ

### 3.1 ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Array)

ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 3.2 คือการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ แผง มาต่อกันทั้งแบบขนานและอนุกรม เพื่อให้ได้ค่าแรงดัน และค่ากระแสที่เหมาะสมที่จะนำไปแปลง ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป



รูปที่ 3.2 ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

Solar module SP75		
<b>Electrical parameters</b>		
Maximum power rating $P_{max}$ [W/m <sup>2</sup> ]	12 V/6 V	
Rated current $I_{MPP}$ [A]	75	
Rated voltage $V_{MPP}$ [V]	4.4/8.8	
Short circuit current $I_{SC}$ [A]	17.0/8.5	
Open circuit voltage $V_{OC}$ [V]	4.8/9.6	
	21.7/10.9	
<b>Thermal parameters</b>		
NOCT <sup>2)</sup> [°C]	45 ±2	
Temp. coefficient: short-circuit current	2.06 mA/°C	
Temp. coefficient: open-circuit voltage	-0.77 V/°C	
<b>Qualification test parameters<sup>4)</sup></b>		
Temperature cycling range [°C]	-40 to +85	
Humidity freeze, Damp heat [%RH]	85	
Maximum system voltage [V]	600 V per UL 1709 V per IEC61730	
Wind Loading PSF [N/m <sup>2</sup> ]	50 [2400]	
Maximum distortion <sup>3)</sup> [°]	1.2	
Halstone impact	Inches [mm]	1.0 [25]
	MPH [m/s]	52 [23]
Weight	Pounds [kg]	16.7 [7.6]

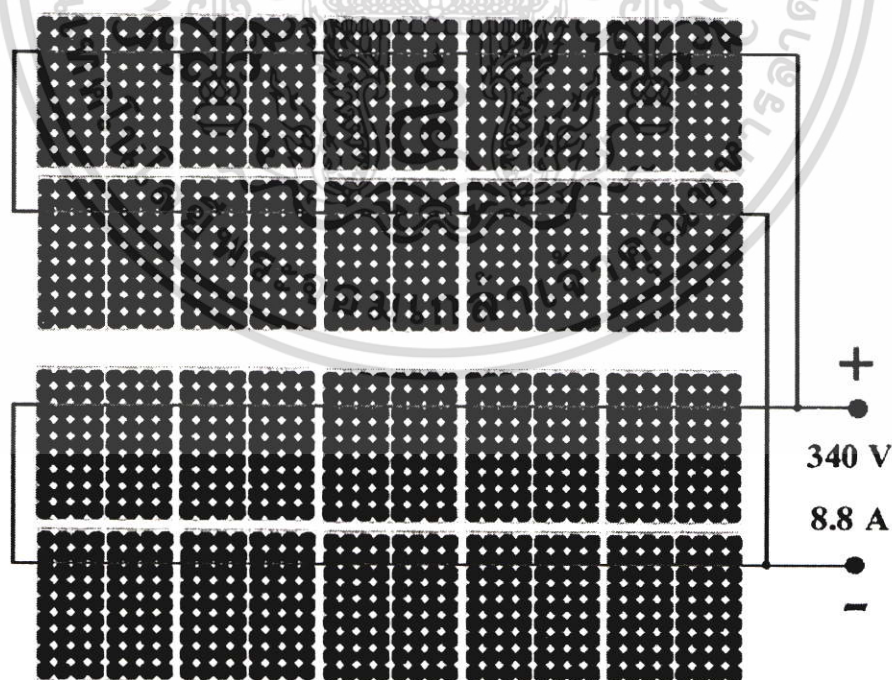
รูปที่ 3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SEMENS รุ่น SP-75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SEMENS รุ่น SP-75 ภายในแผงจะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Single-crystalline) จำนวน 36 เซลล์ ให้ค่ากำลังสูงสุด  $75 W_p$  ที่แรงดันสูงสุด  $17 V$  และกระแสสูงสุด  $4.8 A$  มีค่ากระแสลัดวงจรที่  $4.8 A$  และค่าแรงดันเปิดวงจรที่  $21.7 V$  เมื่อวัดที่ค่าความเข้มแสง  $1000 W/m^2$  และอุณหภูมิ  $25 ^\circ C$  สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $-40 ^\circ C$  จนถึง  $+85 ^\circ C$  โดยมีค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น  $2.06 mA$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1 ^\circ C$  และค่าแรงดันวงจรเปิดจะลดลง  $77 mV$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1 ^\circ C$

### 3.1.2 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมที่จะนำไปแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้น จะต้องมีค่ามากกว่าค่าแรงดันค้ำยอดของไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_p$ ) หรือมีค่ามากกว่า  $310 V$  ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 20 แผง ถูกนำมาต่อแบบอนุกรมกัน เพื่อให้ได้ค่าแรงดัน  $340 V$  และค่ากระแส  $4.4 A$  หรือมีกำลังประมาณ  $1.5 kW_p$  ชุดเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะถูกสร้างขึ้นมาสองชุด แล้วนำมาเชื่อมต่อกันแบบขนาน ซึ่งจะทำให้ได้กระแสเพิ่มขึ้นเป็น  $8.8 A$  และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ  $3 kW_p$  ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 ทิศทางการติดตั้งชุดเซลล์แสงอาทิตย์

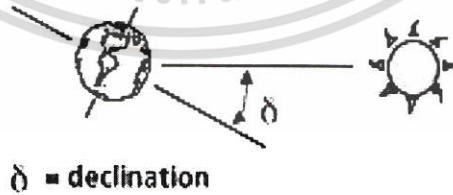
ทิศทางการติดตั้งชุดเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีผลต่อแนวรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์ ถ้ารังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในทิศทางตั้งฉากกับแผงเซลล์ก็จะทำให้พลังงานแสงที่ได้รับมีค่าสูง จึงจำเป็นที่จะต้องปรับทิศทางของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันหน้ารับรังสีแสงอาทิตย์ในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวรังสีแสงอาทิตย์เสมอ

เนื่องจากระนาบการหมุนของแกนโลกเอียง 23.5 องศา จากระนาบของวงโคจรของโลก รอบดวงอาทิตย์ โดยจะเอียงแบบนี้ตลอดทั้งปี ทำให้เกิดฤดูกาลขณะที่ซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้หันหน้าเข้าและออกจากดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของโลก

มุมที่ระนาบการหมุนของแกนโลกทำกับระนาบของวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ เรียกว่า Solar Declination ( $\delta$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

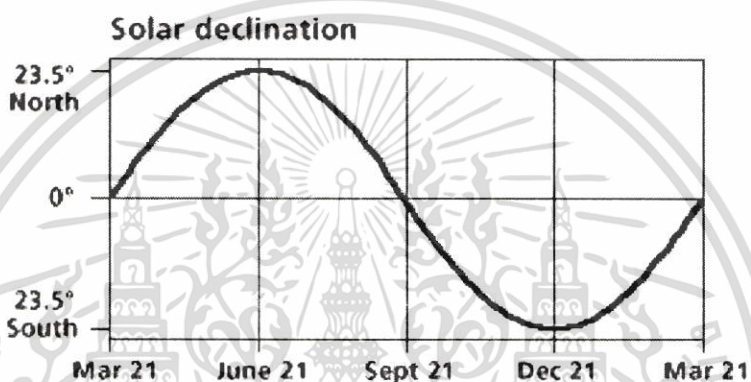


รูปที่ 3.6 Solar Declination

ค่า Solar Declination จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี ซึ่งสามารถคำนวณหาค่ามุมได้จากสูตร

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ \frac{360}{365} \times (284 \times \text{day of year}) \right] \quad (3.1)$$

ค่า day of year กำหนดให้วันที่ 1 มกราคม มีค่าเป็น “1” ซึ่งเมื่อแทนค่าจาก “1” ถึง “365” แล้วนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของ Solar Declination ตลอดทั้งปี

เมื่อนำตำแหน่งที่ตั้งของกรุงเทพฯ ที่มีละติจูดประมาณ 15 องศาเหนือ มาคำนวณเพื่อหาค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่ทำต่อระนาบของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันตลอดทั้งปี จะได้ค่ามุมดังแสดงในตารางที่ 3.1

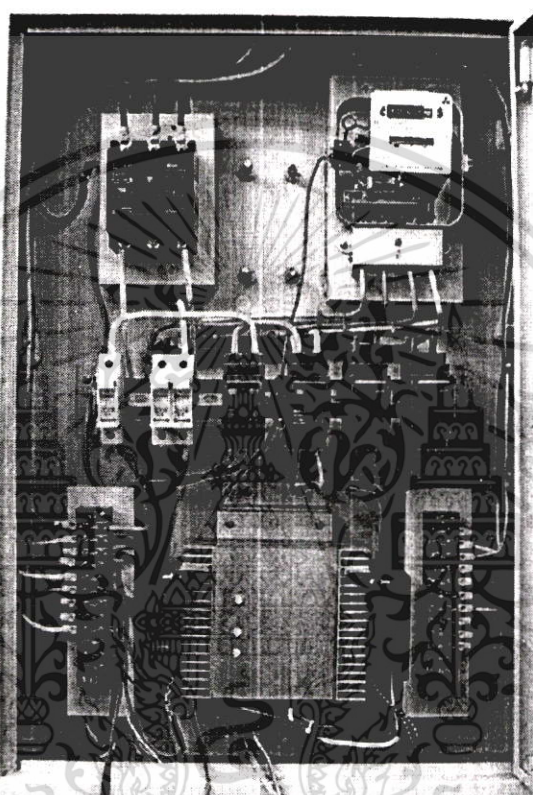
ตารางที่ 3.1 แสดงค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่ทำต่อระนาบของเซลล์แสงอาทิตย์  
ในแต่ละวันตลอดทั้งปี บริเวณกรุงเทพฯ

Date	Jan	Feb	Mar	April	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	38S	32S	23S	10S	0	7N	8N	2N	7S	19S	30S	37S
2	37S	32S	22S	10S	0	7N	8N	2N	7S	19S	30S	37S
3	37S	31S	22S	10S	0	7N	8N	2N	8S	20S	31S	37S
4	37S	31S	22S	9S	0	7N	7N	2N	8S	20S	31S	37S
5	37S	31S	21S	9S	1N	7N	7N	1N	8S	20S	31S	37S
6	37S	31S	21S	8S	1N	7N	7N	1N	9S	21S	31S	37S
7	37S	30S	20S	8S	1N	7N	7N	1N	9S	21S	32S	37S
8	37S	30S	20S	8S	2N	7N	7N	0	10S	22S	32S	37S
9	37S	30S	20S	7S	2N	7N	7N	0	10S	22S	32S	38S
10	37S	29S	19S	7S	2N	8N	7N	0	10S	22S	33S	38S
11	36S	29S	19S	7S	2N	8N	7N	0	11S	23S	33S	38S
12	36S	29S	18S	6S	3N	8N	6N	0	11S	23S	33S	38S
13	36S	28S	18S	6S	3N	8N	6N	0	12S	23S	33S	38S
14	36S	28S	18S	5S	3N	8N	6N	0	12S	24S	34S	38S
15	36S	28S	17S	5S	3N	8N	6N	1S	12S	24S	34S	38S
16	36S	27S	17S	5S	4N	8N	6N	1S	13S	25S	34S	38S
17	35S	27S	16S	4S	4N	8N	6N	1S	13S	25S	34S	38S
18	35S	27S	16S	4S	4N	8N	6N	2S	14S	25S	34S	38S
19	35S	26S	16S	4S	4N	8N	5N	2S	14S	26S	35S	38S
20	35S	26S	15S	3S	5N	8N	5N	2S	14S	26S	35S	38S
21	35S	26S	15S	3S	5N	8N	5N	3S	15S	26S	35S	38S
22	34S	25S	14S	2S	5N	8N	5N	3S	15S	27S	35S	38S
23	34S	25S	14S	2S	5N	8N	5N	4S	16S	27S	35S	38S
24	34S	25S	14S	2S	5N	8N	4N	4S	16S	27S	36S	38S
25	34S	24S	13S	1S	5N	8N	4N	4S	16S	28S	36S	38S
26	34S	24S	13S	1S	6N	8N	4N	5S	17S	28S	36S	38S
27	33S	24S	12S	1S	6N	8N	4N	5S	17S	28S	36S	38S
28	33S	23S	12S	0	6N	8N	3N	5S	18S	29S	36S	38S
29	33S	-	12S	0	6N	8N	3N	6S	18S	29S	36S	38S
30	33S	-	11S	0	6N	8N	3N	6S	18S	29S	37S	38S
31	32S	-	11S	-	6N	-	3N	6S	-	30S	-	38S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับสายส่งไฟฟ้า โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปที่ 3.8

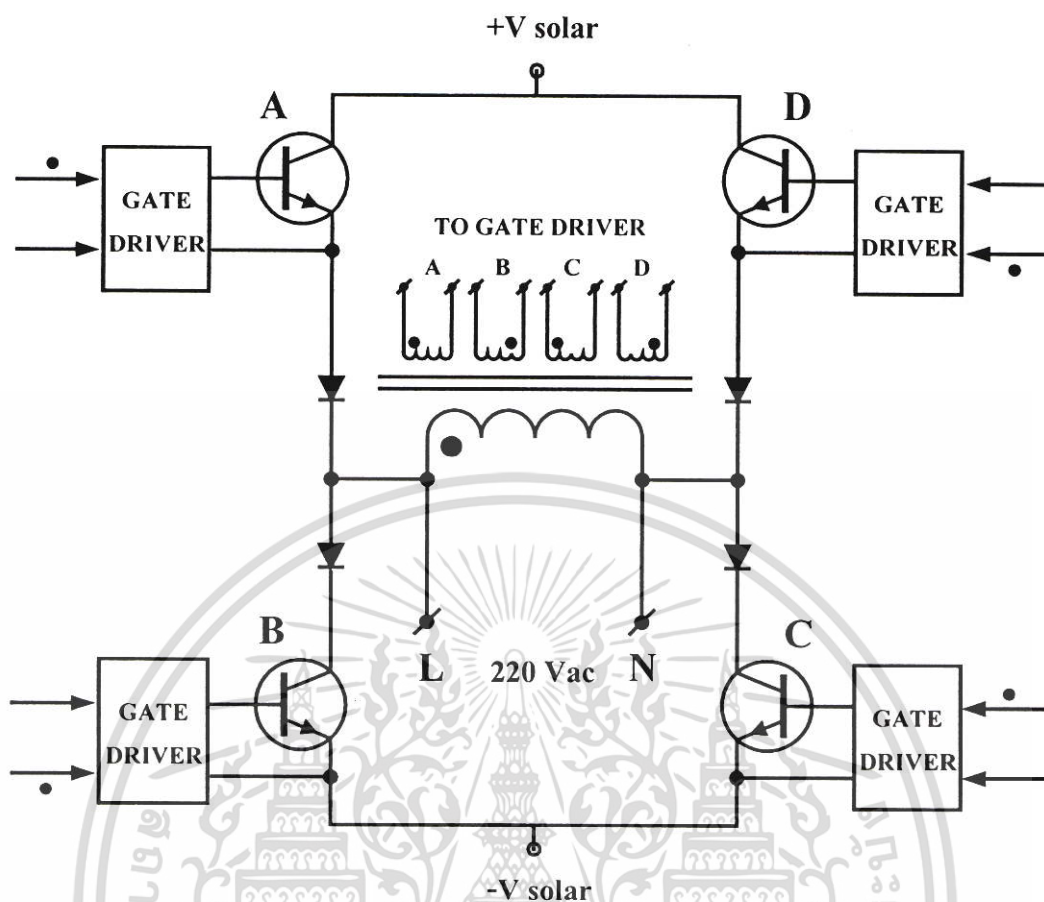


รูปที่ 3.8 อินเวอร์เตอร์และแผงควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

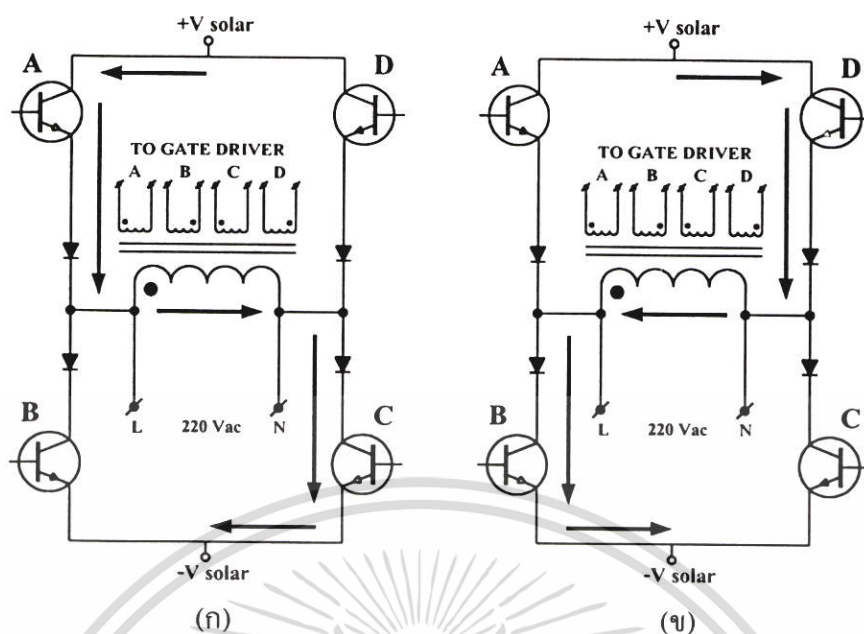
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ จะต่อเข้ากับวงจรสลับขั้วแบบเอชบริดจ์ (H-bridge) ซึ่งประกอบไปด้วย IGBT ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์จำนวนสี่ตัวคอยสลับขั้วไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีหม้อแปลงซิงโครไนซ์ (Synchronizing Transformer) เป็นตัวส่งสัญญาณให้ชุดขับขาเกต (Gate Driver) ทำการเปิด-ปิด IGBT ให้ทำงานสอดคล้องกับไฟฟ้ากระแสสลับของการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนภาพบล็อก (Block Diagram) ของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.9 ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่งโครไนซ์จะต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เพื่อแปลงขนาดไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิทั้งสี่ขดให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 V และกระแส 40 mA ที่มีจังหวะการทำงานพร้อมกันกับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เพื่อใช้ในการสั่งงานชุดขับขาเกิดในการเปิด-ปิด IGBT ทั้งสี่ตัว จุดที่อยู่บนรูปบอกลถึงเฟสการทำงานของแต่ละขด โดยขด A และ C จะทำงานพร้อมกันเมื่อเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นบวกและ ขด B และ D จะทำงานพร้อมกันเมื่อเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นลบ



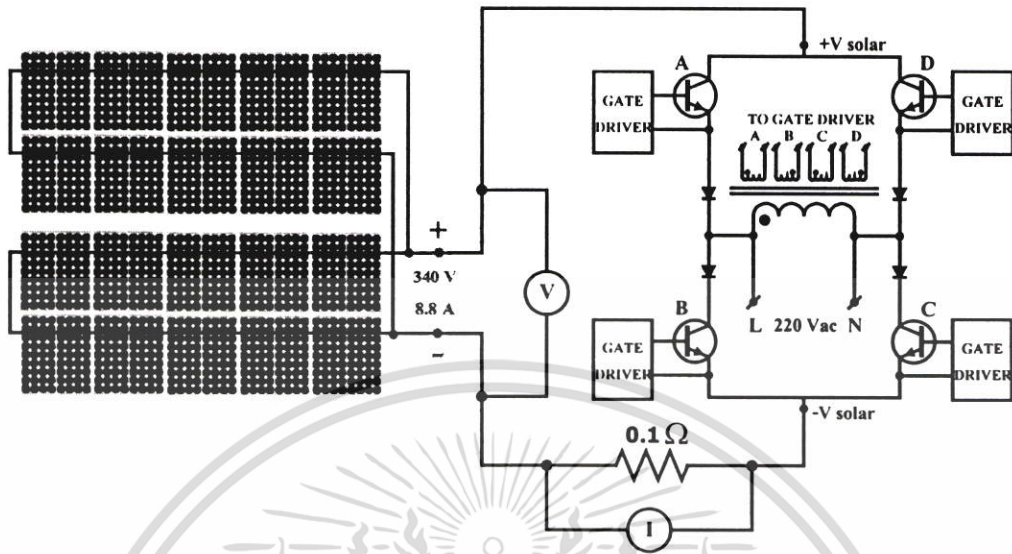
รูปที่ 3.10 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ เมื่อ (ก) เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นบวก และ (ข) เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นลบ

จากรูป 3.10 (ก) เมื่อเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นบวก ขดลวดทุติยภูมิ ขด A และ C จะส่งสัญญาณไปยังชุดขับขาเกต เพื่อสั่งให้ IGBT A และ C ทำงาน ในขณะที่ IGBT B และ D นั้นไม่ทำงาน ทำให้ขั้วบวกของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับไลน์ (L) และขั้วลบต่อเข้ากับนิวทรัล (N) กระแสไฟฟ้าที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายเข้าไปสู่ไลน์ของการไฟฟ้า

ในทางกลับกัน จากรูป 3.10 (ข) เมื่อเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นลบ ขดลวดทุติยภูมิขด B และ D จะส่งสัญญาณไปยังชุดขับขาเกต เพื่อสั่งให้ IGBT B และ D ทำงาน ในขณะที่ IGBT A และ C หยุดทำงาน ทำให้ขั้วบวกของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับนิวทรัล และขั้วลบต่อเข้ากับไลน์ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์จะไหลสวนทางกับครั้งแรก ทำให้เกิดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขึ้น

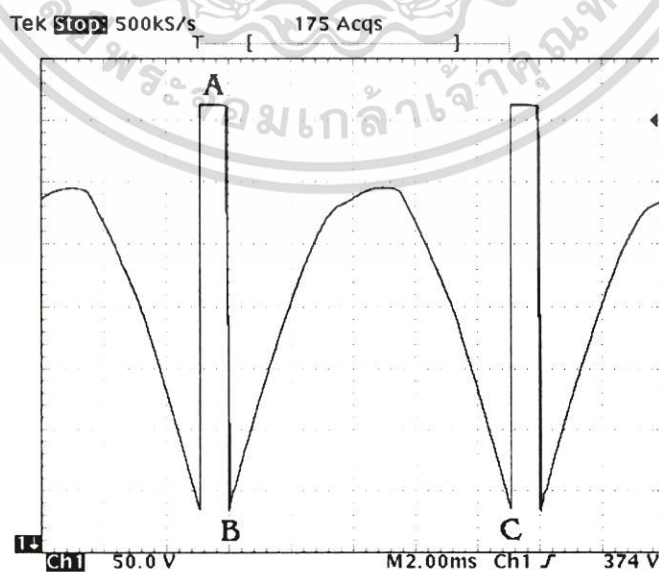
อย่างไรก็ตามการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาศัยวงจรสลับขั้วแบบเอชบริดจ์นั้นจะต้องมีช่วงเวลาสั้นๆ ที่ตัดไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อป้องกันการช็อตกัน เนื่องจาก IGBT ทั้งสี่ตัวทำงานพร้อมกัน ในขณะที่เฟสของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือลบเป็นบวก โดยการให้ IGBT คู่ที่ทำงานอยู่หยุดการทำงานก่อนถึงจุดเปลี่ยนเฟส เป็นเวลา  $500 \mu\text{s}$  และหลังจากเปลี่ยนเฟสแล้ว  $500 \mu\text{s}$  จึงสั่งให้ IGBT อีกคู่หนึ่งทำงาน ดังนั้นจะมีเวลาช่วงที่ IGBT ทั้งสี่ตัวหยุดทำงานพร้อมกันเป็นเวลา  $1 \text{ ms}$

### 3.2.2 สัญญาณไฟฟ้าของแรงดัน และกระแส



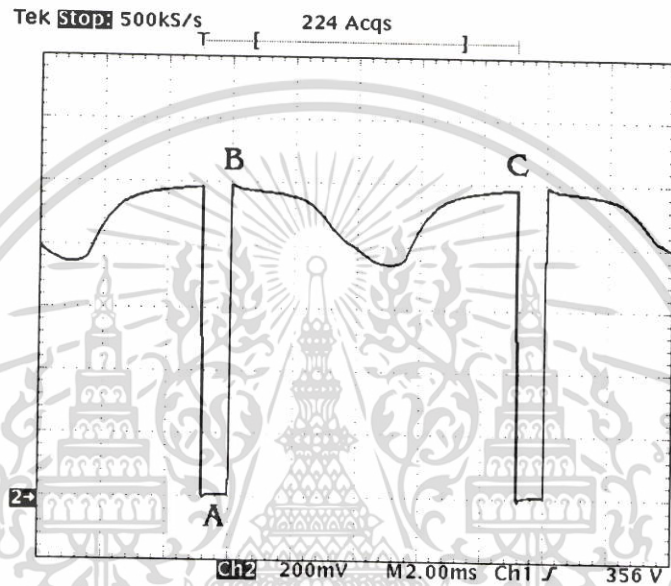
รูปที่ 3.11 วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.11 วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์นั้นทำได้ด้วยการอ่านค่าจากออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยการวัดสัญญาณไฟฟ้าของค่าแรงดันนั้นทำได้โดยการวัดค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วบวก และขั้วลบของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนการวัดสัญญาณไฟฟ้าของค่ากระแสทำได้โดยการนำตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม ต่ออนุกรมกับวงจร แล้วจึงใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม



เอกสารรูปที่ 3.12 สัญญาณไฟฟ้าของค่าแรงดัน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 คือรูปสัญญาณไฟฟ้าของค่าแรงดันที่วัดคร่อมระหว่างขั้วบวก และขั้วลบของ ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ ที่จุด A คือช่วงที่ IGBT ทั้งสี่ตัวหยุดทำงาน สัญญาณไฟฟ้าของค่าแรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันวงจรเปิดของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะกินเวลาในช่วงนี้ประมาณ 1 ms หลังจากนั้นอีก 9 ms ที่เหลือ (จากจุด B ถึง จุด C) เอชบริดจ์จะทำหน้าที่เชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับไฟฟ้ากระแสตรงของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งรูปสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะเป็นรูปสัญญาณไฟฟ้าของไฟกระแสสลับ

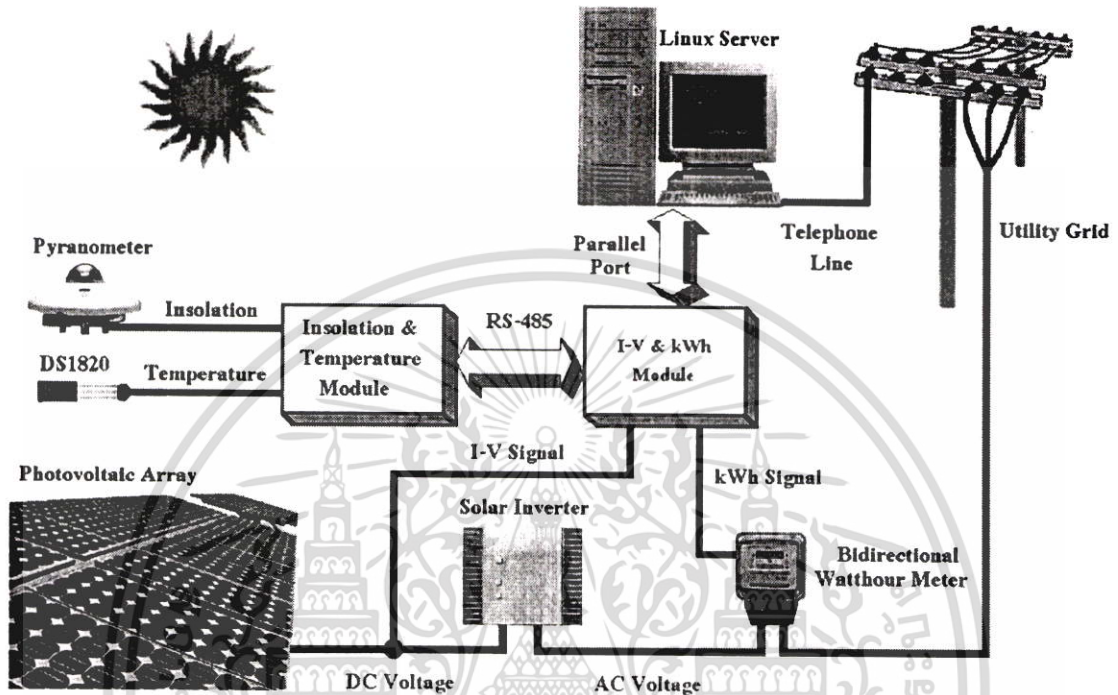


รูปที่ 3.13 สัญญาณไฟฟ้าของค่ากระแส

รูปที่ 3.13 คือ รูปสัญญาณไฟฟ้าของค่ากระแสที่วัดคร่อมตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม ที่ต่ออนุกรมอยู่ในวงจร ที่จุด A คือช่วงเวลาที่ IGBT ทั้งสี่ตัวหยุดทำงาน ทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจร สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จึงมีค่าเป็นศูนย์ จากจุด B ถึงจุด C เป็นช่วงที่เอชบริดจ์เชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับไฟฟ้ากระแสตรงของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งรูปสัญญาณไฟฟ้าของค่ากระแสที่วัดได้นี้ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คือเมื่อค่าแรงดันมีค่าน้อย ค่ากระแสจะมีค่ามาก และเมื่อค่าแรงดันมาก ค่ากระแสจะมีค่าน้อย

## บทที่ 4

### การดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 4.1 โมดูล I-V ที่ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิกชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.1 โมดูล I-V สำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ที่ได้ออกแบบขึ้นนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1. โมดูล สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และความเข้มแสงแดด
2. โมดูล สำหรับวัดสัญญาณ I-V และค่าพลังงานไฟฟ้า
3. ลิנקซ์เซิร์ฟเวอร์สำหรับการประมวลผล และบันทึกข้อมูล

การทำงานของระบบจะมีลิנקซ์เซิร์ฟเวอร์เป็นตัวควบคุมหลัก ซึ่งจะทำการส่งสัญญาณผ่านทางพอร์ตขนานไปยัง โมดูลวัดสัญญาณ I-V เพื่อขอข้อมูลดิบทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 6.00 น. จนถึง 18.00 น. ของทุกวัน เมื่อโมดูลวัดสัญญาณ I-V ได้รับสัญญาณจากลิנקซ์เซิร์ฟเวอร์ ก็จะส่งสัญญาณผ่านทางบัส RS-485 ไปยังโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดดเพื่อขอข้อมูล ในช่วงเวลาที่โมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดดกำลังทำการเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิ และความเข้มแสงแดด โมดูลวัดสัญญาณ I-V ก็ทำการเก็บข้อมูลค่ากระแส และแรงดัน ไปพร้อมๆกัน เมื่อโมดูลทั้งสองได้ข้อมูลครบ โมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดดก็จะส่งข้อมูลกลับมายัง โมดูลวัดค่า

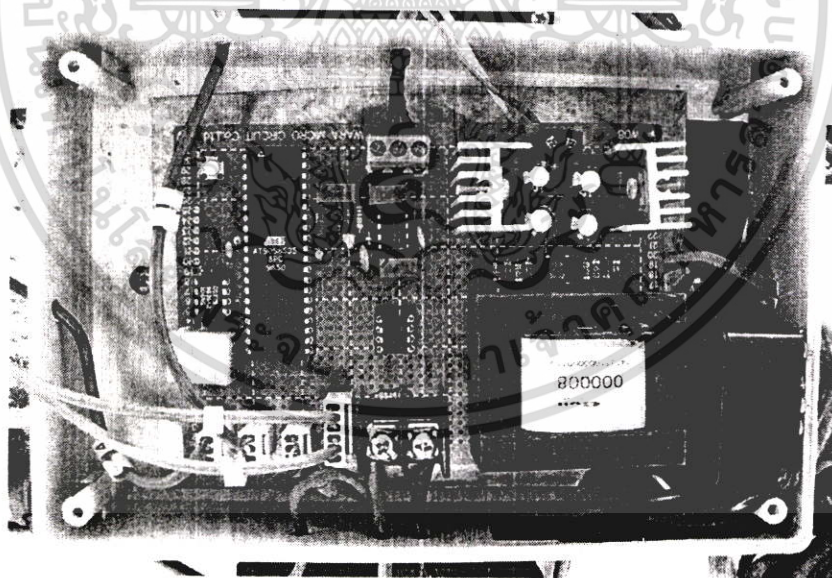
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ I-V ทั้งนี้ที่โมดูลวัดสัญญาณ I-V ได้รับข้อมูลแล้ว ก็จะนำค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดดนั้นมาเรียงต่อเข้ากับข้อมูลค่ากระแสและแรงดัน และนำส่งต่อไปยังลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

เมื่อลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ได้รับข้อมูลดิบแล้ว ก็จะทำการลดปริมาณข้อมูลด้วยการคำนวณค่ากำลังสองต่ำสุด โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังหก เพื่อดึงพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ อันได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากำลังไฟสูงสุด ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าความต้านทานวงจรอนุกรม ข้อมูลที่คำนวณได้ทั้งหมดนี้จะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์อย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก

#### 4.1 โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดด

โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และค่าความเข้มของแสงแดด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT90S8535 เป็นตัวควบคุม และประมวลผลในการวัดอุณหภูมิจาก DS1820 และความเข้มแสงแดดจากไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) โมดูลนี้จะติดตั้งอยู่บนดาต้าไฟใต้ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ และจะรับส่งข้อมูลกับโมดูลสำหรับวัดสัญญาณ I-V ผ่านทางบัส RS-485



รูปที่ 4.2 โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดดที่ได้พัฒนาขึ้น

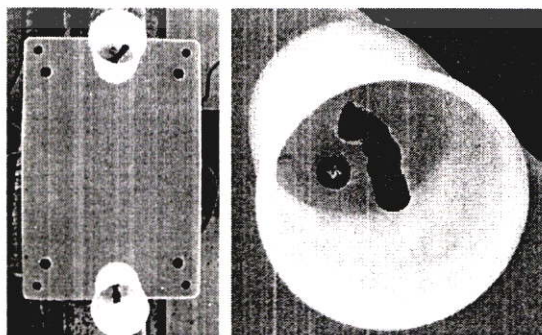
#### 4.1.1 การวัดอุณหภูมิด้วย DS1820



รูปที่ 4.3 หัววัดอุณหภูมิ DS1820

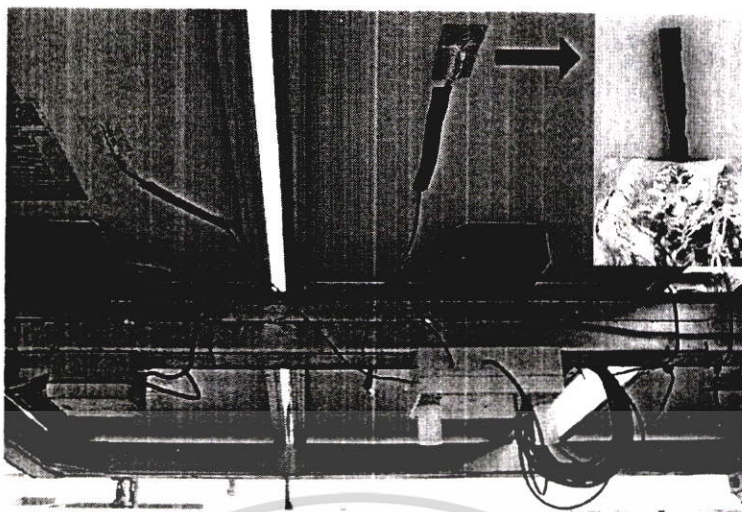
จากรูปที่ 4.3 คือหัววัดอุณหภูมิ DS1820 ซึ่งให้ค่าเป็นดิจิตอลขนาด 9 บิต มีความละเอียด  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่  $-10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+85^{\circ}\text{C}$  มีความเร็วในการแปลงสัญญาณจากอุณหภูมิไปเป็นข้อมูลดิจิตอลในเวลา 750 ms ใช้สายสัญญาณในการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงหนึ่งเส้น ด้วยการส่งข้อมูลแบบอนุกรม และ DS1820 แต่ละตัวยังมีหมายเลขประจำตัวอยู่ภายใน ทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลของ DS1820 หลายๆ ตัวในสายส่งเส้นเดียวกันได้ โดยการอ้างหมายเลขประจำตัวในการรับส่งข้อมูล

การวัดค่าอุณหภูมินั้นจะวัดด้วยกันสองค่า คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศ และค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าอุณหภูมิของอากาศจะใช้หัววัดอุณหภูมิสองตัวติดตั้งอยู่ในที่ร่มได้ ชุดเซลล์แสงอาทิตย์ โดยให้หัววัดอุณหภูมิลอยอยู่ในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ค่าที่อ่านได้ทั้งสองค่าจะนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่าอุณหภูมิ ส่วนค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้หัววัดอุณหภูมิสามตัวติดตั้งด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์สามแผง ค่าที่อ่านได้ทั้งสามค่าจะนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การติดตั้งหัววัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4.1.2 การวัดความเข้มแสงแดดด้วยไพราโนมิเตอร์

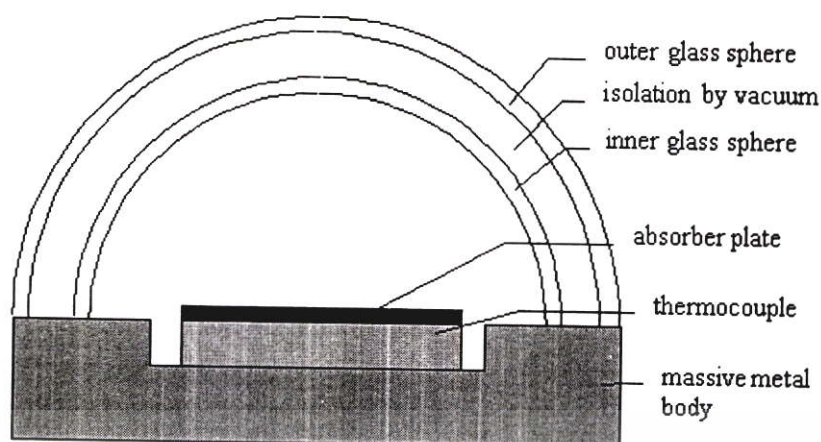


รูปที่ 4.6 ไพราโนมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

รังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านในบรรยากาศของโลกจะถูกดูดกลืน สะท้อน และกระเจิง โดยโมเลกุลของน้ำ ฝุ่นละออง และก๊าซต่างๆ ทำให้รังสีที่ตกกระทบลงผิวโลกประกอบไปด้วยรังสีสองส่วน คือ รังสีตรง ซึ่งเป็นรังสีที่พื้นโลกได้รับจากดวงอาทิตย์โดยตรง และรังสีกระเจาย ซึ่งเป็นรังสีที่ได้จากการสะท้อน และการกระเจิงของรังสีแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศ การวัดความเข้มแสงแดดที่ตกกระทบบนผิวโลกทำได้โดย การใช้เครื่องมือที่เรียกว่าไพราโนมิเตอร์ซึ่งในงาน

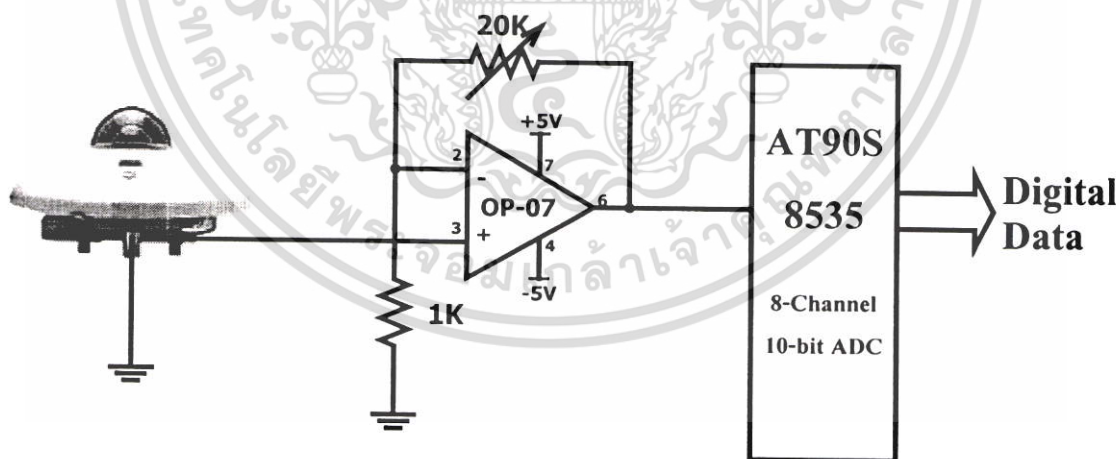
วิจัยนี้ได้เลือกใช้ไพราโนมิเตอร์ของบริษัท Kipp & Zonen Model – CM11 ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นว่าเว็บไซต์นี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของไพราโนมิเตอร์

จากรูปที่ 4.7 คือโครงสร้างของไพราโนมิเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยกรอบแก้วใสรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ระหว่างกรอบแก้วจะเป็นสุญญากาศ ภายในเป็นเทอร์โมไพล์ (Thermopile) ประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จำนวนหนึ่งร้อยรอยต่อ สำหรับวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขั้วร้อนกับขั้วเย็น โดยขั้วร้อนทาสีดำและรับแสงอาทิตย์ ส่วนขั้วเย็นทาสีขาวและซ่อนไว้ใต้โคมบังแดด ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วร้อนและขั้วเย็นมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มแสงแดดที่ตกกระทบ โดยไพราโนมิเตอร์ model-CM11 จะให้สัญญาณขาออกที่  $5.14 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$



รูปที่ 4.8 วงจรสำหรับวัดค่าความเข้มแสงแดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่วัดได้จากไพราโนมิเตอร์จะนำมาเข้าวงจรขยายชนิดป้อนกลับแบบลบโดยใช้ ออปแอมป์ เพื่อกำหนดอัตราขยายให้เหมาะสมกับแรงดันขาเข้าของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอก เป็นดิจิทัล โดยใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต ที่มีอยู่ในไมโคร คอนโทรเลอร์เบอร์ AT90S8535 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกจากวงจรขยายให้เป็นข้อมูล ดิจิทัล แล้วนำไปคำนวณกลับให้เป็นความเข้มแสงแดด

ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิของอากาศ และค่าความเข้มแสงแดดจะส่ง ไปยังไมโครวัดค่า I-V ผ่านทางบัส RS-485 เพื่อนำไปรวมกับข้อมูลของค่ากระแส และแรงดัน ก่อน จะส่งข้อมูลทั้งหมดให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ต่อไป

## 4.2 การรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครวัดอุณหภูมิและความเข้มแสงกับไมโครวัดสัญญาณ I-V

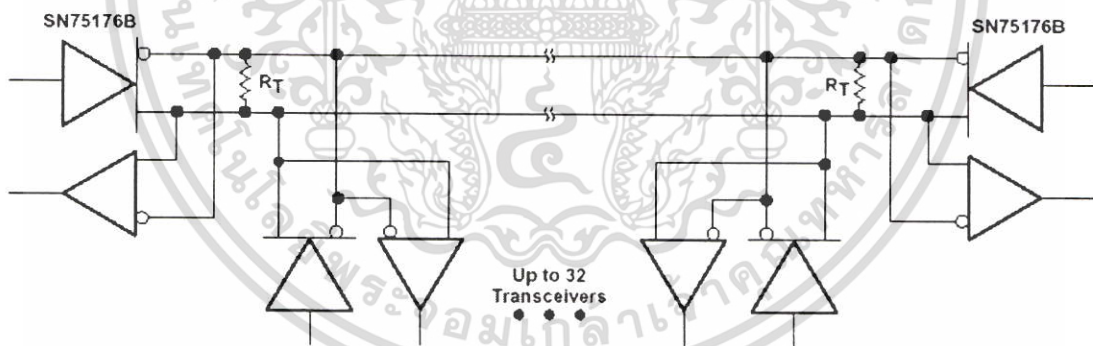
การจะส่งข้อมูลจากไมโครวัดอุณหภูมิและความเข้มแสงไปยังลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์โดยตรงนั้น ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากพอร์ตนานที่ใช้รับส่งข้อมูลกับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์นั้นต่ออยู่กับไมโครวัด สัญญาณ I-V อีกทั้งระยะทางจากไมโครวัดอุณหภูมิและความเข้มแสงที่ติดตั้งอยู่บนชั้นคาเฟ่กับ ตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการชั้นสามนั้นมีระยะทางไกลกันมาก ดังนั้นจึงต้องทำการ ส่งข้อมูลจากไมโครวัดอุณหภูมิและความเข้มแสงไปยังไมโครวัดสัญญาณ I-V ผ่านทางบัส RS-485 เสียก่อน แล้วจึงให้ไมโครวัดสัญญาณ I-V ส่งข้อมูลต่อไปให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ อีกครั้งหนึ่ง

### 4.2.1 พอร์ตอนุกรมแบบบัส RS-485

RS-485 เป็นมาตรฐานการรับส่งข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม ซึ่งสามารถรับส่งสัญญาณได้ใน ระยะไกล และมีความเร็วสูง โดยใช้สายสัญญาณเพียงสองเส้นสามารถเชื่อมต่อตัวรับ และตัวส่งได้ มากถึง 32 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยตัวส่งจะอ้างหมายเลขประจำตัวของตัวรับก่อนที่จะทำการ รับส่งข้อมูล แต่จะเป็นการสื่อสารแบบทางเดียว (half-duplex) คือจะส่งหรือรับข้อมูลได้เพียงอย่าง เดียว ณ เวลาหนึ่ง

ตารางที่ 4.1 มาตรฐาน RS-485

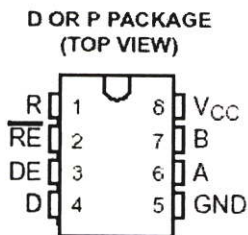
Parameter	Conditions
Mode of operation	Differential
Allowed no. of Tx and Rx	32 Tx 32 Rx
Maximum cable length	4000ft length
Maximum data rate	10Mbps
Minimum driver output range	1.5V
Maximum driver output range	5V
Maximum driver short-circuit current	250mA
Tx load impedance	54
Rx input sensitivity	200mV
Rx input voltage range	-7V to +12V
Rx logic high	>200mV
Rx logic low	<200mV



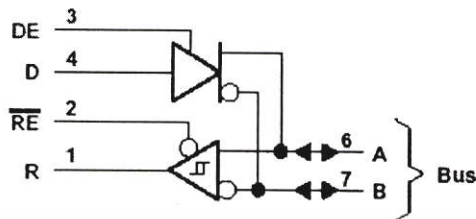
รูปที่ 4.9 การเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างตัวรับ และตัวส่งในมาตรฐาน RS-485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 IC เบอร์ SN75176B



logic diagram (positive logic)



Function Tables

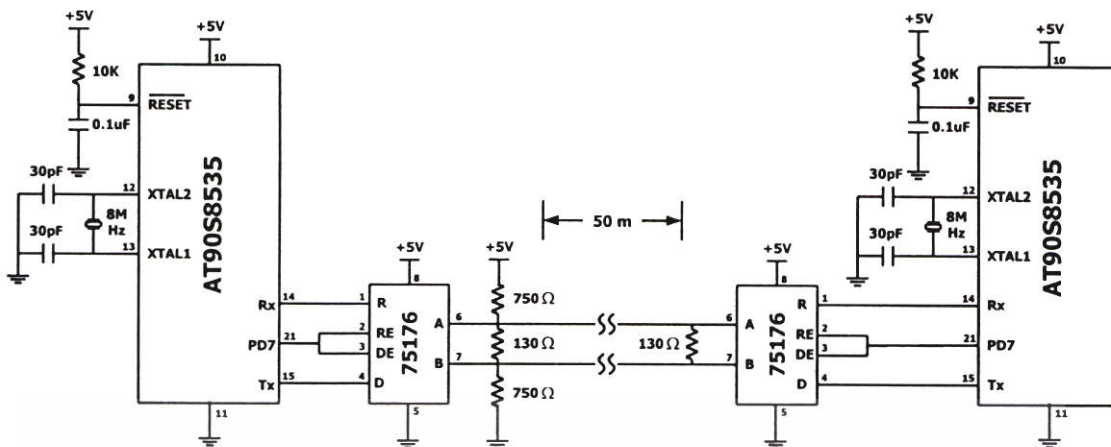
DRIVER				RECEIVER		
INPUT D	ENABLE DE	OUTPUTS		DIFFERENTIAL INPUTS A - B	ENABLE RE	OUTPUT R
		A	B			
H	H	H	L	$V_{ID} \geq 0.2V$	L	H
L	H	L	H	$-0.2V < V_{ID} < 0.2V$	L	?
X	L	Z	Z	$V_{ID} \leq -0.2V$	L	L
				X	H	Z
				Open	L	H

H = high level. L = low level. ? = indeterminate. X = irrelevant. Z = high impedance (off)

รูปที่ 4.10 IC เบอร์ SN75176B สำหรับการรับส่งข้อมูลในมาตรฐาน RS-485

จากรูปที่ 4.10 คือ IC เบอร์ SN75176B เป็น IC สำหรับการรับส่งข้อมูลในมาตรฐาน RS-485 โดยมีขา DE เป็นขาสำหรับควบคุมการส่งข้อมูล เมื่อขา DE มีสัญญาณอยู่ในระดับสูง (high level) ตัว IC จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งข้อมูล ถ้าที่ขา D มีสัญญาณอยู่ในระดับสูงด้วย จะทำให้สัญญาณขาออกที่ขา A มีสัญญาณอยู่ในระดับสูง และขา B มีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ (low level) แต่ถ้าสัญญาณที่ขา D มีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ จะทำให้สัญญาณขาออกที่ขา A มีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ และขา B มีสัญญาณอยู่ในระดับสูง ส่วนในกรณีที่ขา DE มีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ จะทำให้ค่าสัญญาณที่ขา A และ B อยู่ในสภาวะอิมพีแดนซ์สูง (high impedance)

ในกรณีของการรับข้อมูลจะต้องกำหนดให้ขา RE มีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ สัญญาณขาออกที่ขา R จะสัญญาณอยู่ในระดับสูง เมื่อมีผลต่างของความต่างศักย์ที่ขา A และขา B มีค่ามากกว่าเท่ากับ 0.2 V และจะมีสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ เมื่อผลต่างของความต่างศักย์ที่ขา A และขา B มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ -0.2 V ในกรณีที่ผลต่างของความต่างศักย์ที่ขา A และขา B มีค่าอยู่ระหว่าง -0.2 V ถึง 0.2 V สัญญาณที่ขา R จะไม่สามารถระบุได้ว่าอยู่ในระดับใด ส่วนในกรณีที่ขา RE มีสัญญาณอยู่ในระดับสูง จะทำให้ค่าสัญญาณที่ขา R อยู่ในสภาวะอิมพีแดนซ์สูง



รูปที่4.11 วงจรสำหรับรับส่งข้อมูลบัส RS-485

เนื่องจากการรับส่งข้อมูลแบบบัส RS-485 เป็นการรับส่งข้อมูลแบบทางเดียว คือจะส่งหรือรับข้อมูลได้เพียงอย่างเดียว ณ เวลาหนึ่ง ดังนั้นจึงทำการซ็อดตา DE และ  $\overline{RE}$  เข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้ากับพอร์ต PD7 ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้กำหนดสถานะการทำงานของ SN75176B จะทำให้เป็นตัวรับหรือตัวส่งในเวลานั้น โดยเมื่อ PD7 มีสถานะเป็น “1” SN75176B จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งข้อมูล และเมื่อ PD7 มีสถานะเป็น “0” SN75176B จะทำหน้าที่เป็นตัวรับข้อมูล

### 4.2.3 ลำดับขั้นตอนการรับส่งข้อมูลบัส RS-485

โดยปรกติเมื่อยังไม่มีกรรับส่งข้อมูลกันระหว่างโมดูลวัดสัญญาณ I-V และ โมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง ก็จะกำหนดให้สถานะของทั้งสองโมดูลอยู่ในสถานะตัวรับทั้งคู่ จนเมื่อโมดูลวัดสัญญาณ I-V ต้องการขอข้อมูลจากโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง ก็จะเปลี่ยนสถานะตัวเองให้เป็นตัวส่ง เพื่อส่งสัญญาณไปยังโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง ซึ่งได้กำหนดรหัสในการติดต่อไว้คือค่า “#1”

โมดูลวัดสัญญาณ I-V (ส่ง) =====> #1 =====> โมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง (รับ)

เมื่อโมดูลวัดสัญญาณ I-V ส่งสัญญาณออกไปแล้วก็จะเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นตัวรับเพื่อรอรับข้อมูลที่จะถูกส่งกลับมา ส่วนทางด้านโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง เมื่อได้รับสัญญาณจากโมดูลวัดสัญญาณ I-V แล้ว ก็จะทำการเปรียบเทียบว่ารหัสที่ส่งมานั้นถูกต้องหรือไม่ ถ้าถูกต้องก็จะทำการอ่านค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และค่าความเข้มแสงจากตัวเซ็นเซอร์ แล้วเปลี่ยนสถานะของตัวเองจากตัวรับให้มาเป็นตัวส่ง เพื่อส่งข้อมูลที่ได

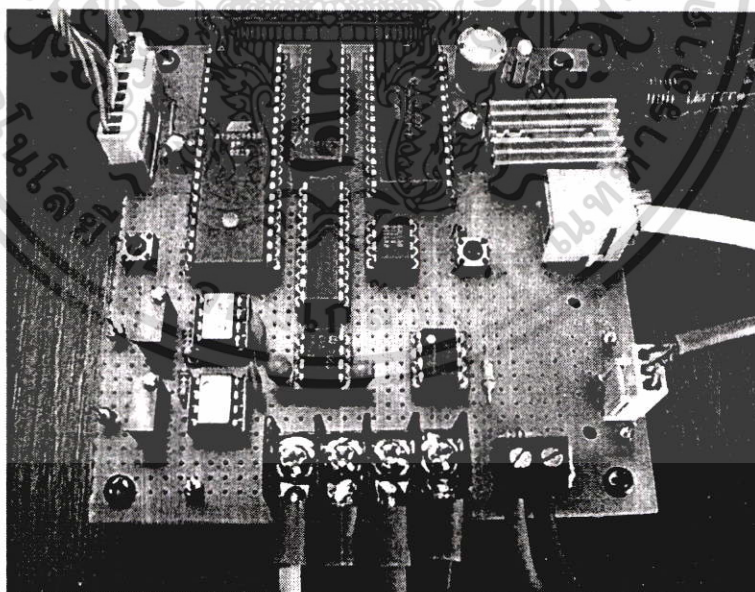
ทั้งหมดกลับไปให้กับโมดูลวัดสัญญาณ I-V โดยจัดเรียงข้อมูลทั้งหมดเป็นชุดข้อมูลเดียวกัน มีเครื่องหมาย “#” เป็นตัวเริ่มและตัวจบข้อมูล และมีเครื่องหมาย “:” เป็นตัวขึ้นระหว่างข้อมูล

โมดูลวัดสัญญาณ I-V(รับ) <= #Tcell:Tamb:Irradiance# <= โมดูลวัดอุณหภูมิและความเข้มแสง(ส่ง)

เมื่อโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงส่งข้อมูลให้โมดูลวัดสัญญาณ I-V เรียบร้อยแล้วก็จะเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นตัวรับอีกครั้งหนึ่ง เพื่อรอรับสัญญาณขอข้อมูลจากโมดูลวัดสัญญาณ I-V ในครั้งต่อไป

### 4.3 โมดูลวัดสัญญาณ I-V

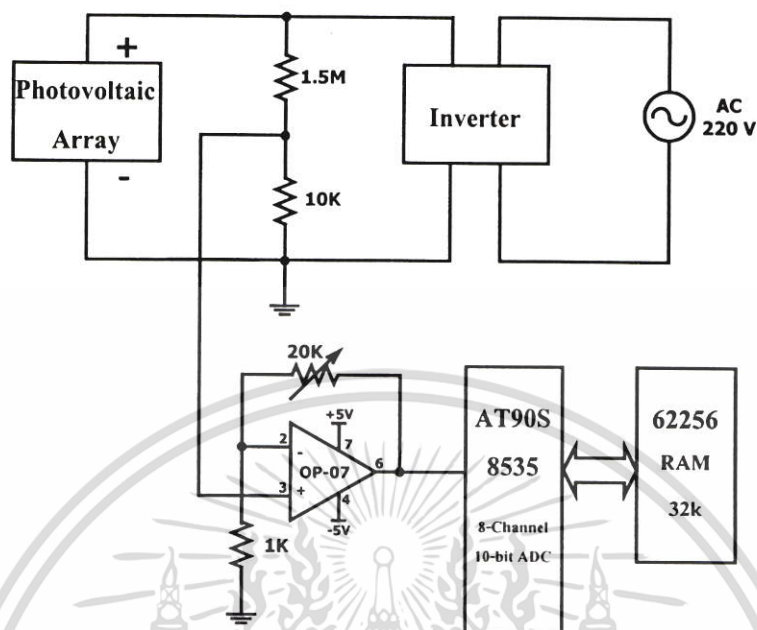
โมดูลวัดสัญญาณ I-V ที่ได้พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT90S8535 เป็นตัวควบคุมในการวัดสัญญาณกระแส และแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่กำลังทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ แล้วเก็บข้อมูลที่ได้อลงในหน่วยความจำ อีกส่วนหนึ่งที่โมดูลนี้จะวัดค่าก็คือค่าพลังงานไฟฟ้าจากมาตรวัดกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะได้ทราบถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.12 โมดูลวัดสัญญาณ I-V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

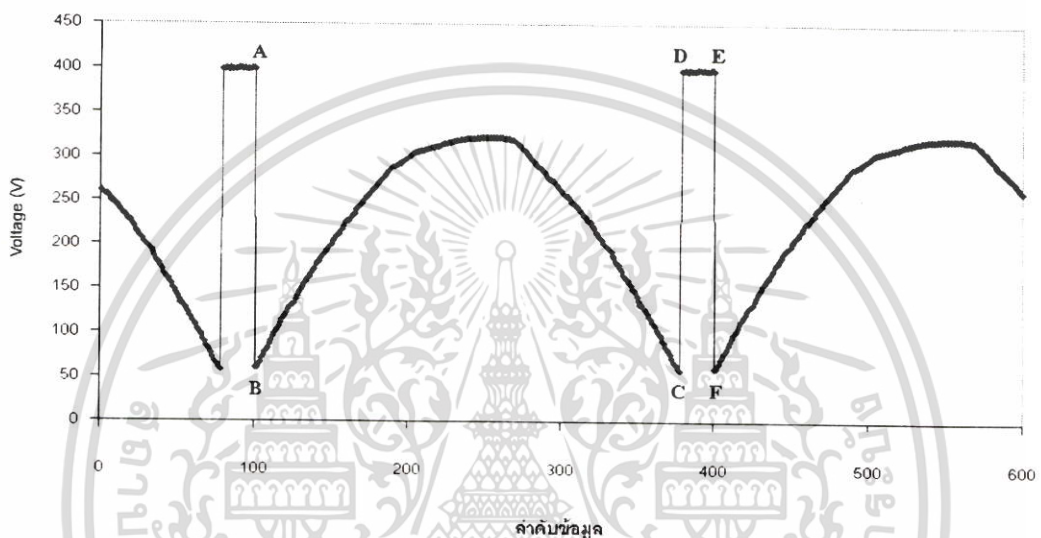
### 4.3.1 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

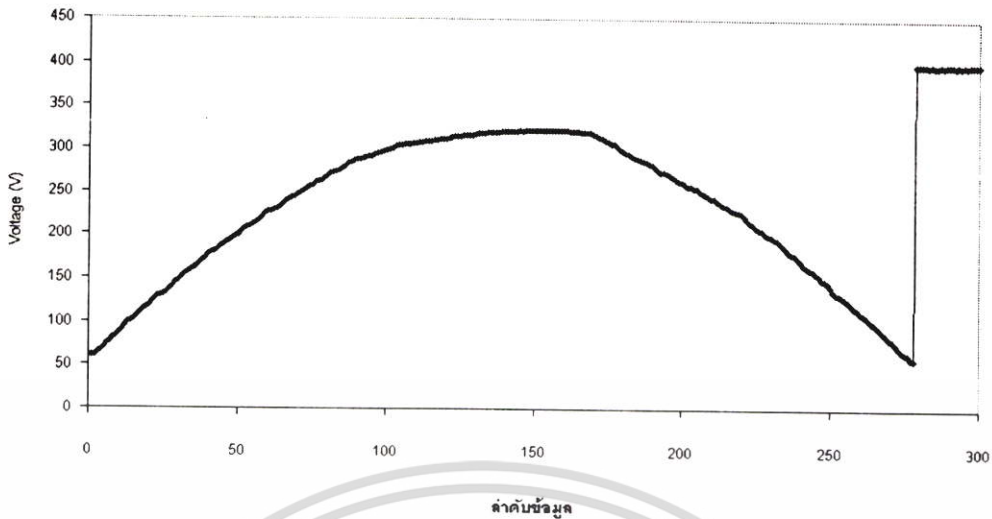
จากรูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่กำลังทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีค่าสูงถึง 400 V การจะวัดสัญญาณนี้ได้จะต้องทำการลดทอนขนาดของสัญญาณให้มีขนาดเหลือเพียง 5 V เพื่อให้เหมาะสมกับแรงดันขาเข้าของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล โดยการใช่วงจรแบ่งแรงดันที่ประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 1.5 M และ 10 K ซึ่งได้คำนวณให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานมีค่าต่ำแล้วทำการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน 10 K นำไปเข้าวงจรขยายชนิดป้อนกลับแบบลบโดยใช้ออปแอมป์ โดยกำหนดอัตราขยายสัญญาณให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณแรงดันมีค่าอยู่ในช่วง 0-5 V แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ซึ่งได้ใช่วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลที่มีอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT90S8535 มีความละเอียด 10 บิต แปลงข้อมูลแบบการประมาณสืบเนื่อง (Successive Approximation) โดยมีความเร็วในการแปลงประมาณ 33  $\mu$ s ต่อหนึ่งข้อมูล หรือจะได้ข้อมูลประมาณ 300 จุด ในการวัดสัญญาณหนึ่งลูกคลื่น (10 ms) ค่าที่ได้จะเก็บลงในหน่วยความจำเพื่อที่จะส่งไปให้ลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ทำการคำนวณต่อไป

ในการวัดสัญญาณค่าแรงดันนั้น จะไม่ทราบว่าได้เริ่มต้นเก็บค่าสัญญาณจากจุดใดมาก่อน ดังนั้นเพื่อให้ได้รูปสัญญาณที่สมบูรณ์ เราจะต้องทำการเก็บค่าสัญญาณจำนวนมากเข้ามาก่อน แล้วจึงมาคัดเลือกรูปสัญญาณที่สมบูรณ์อีกครั้งหนึ่ง โดยจากการทดลองจะพบว่าความเร็วในการแปลงข้อมูลของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล จะได้ค่า 300 จุดในหนึ่งรูปสัญญาณ ดังนั้นจึงทำการเก็บค่าข้อมูลจำนวน 600 จุดมาก่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เพื่อที่จะแน่ใจได้ว่ามีสัญญาณที่มีความสมบูรณ์อย่างน้อยหนึ่งรูป



รูปที่ 4.14 ข้อมูลค่าแรงดันจำนวน 600 ข้อมูล

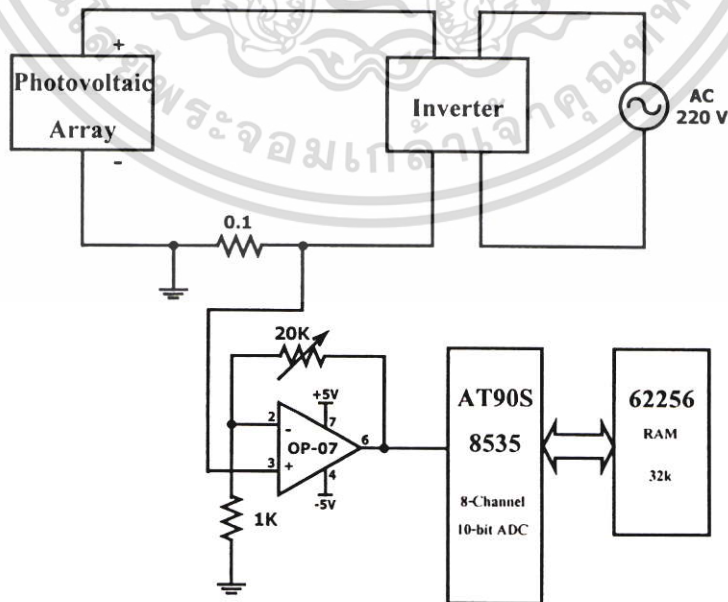
จากข้อมูล 600 จุดที่ได้ เราจะใช้เทคนิคในการเขียนโปรแกรมเพื่อคัดเลือกข้อมูลที่จะให้รูปสัญญาณที่มีความสมบูรณ์ออกมา โดยการหาความแตกต่างของแต่ละข้อมูล จากรูป 4.14 ค่าที่จุด A เมื่อนำมาลบกับค่าที่จุด B จะเกิดเป็นผลต่างที่มีค่ามากที่สุด จึงให้จุด B เป็นจุดเริ่มของรูปสัญญาณ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อไปจนถึงจุด C และ D ก็จะทำให้ค่าผลต่างที่มากที่สุดอีกจุดหนึ่ง แต่ค่าที่ได้เป็นค่าลบ เนื่องจากจุด C มีค่าน้อยกว่าจุด D จึงยังไม่ใช่จุดสิ้นสุดของรูปสัญญาณ ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อไปจนถึงจุด E และ F ซึ่งจะให้ค่าผลต่างมีค่ามากที่สุดเช่นเดียวกับจุด A และ B จึงให้จุด E เป็นจุดสิ้นสุดของรูปสัญญาณ เมื่อนำรูปสัญญาณที่สมบูรณ์มาเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ข้อมูลค่าแรงดันที่ทำการคัดเลือกแล้ว

สัญญาณค่าแรงดันนี้ ยังไม่ใช่ตัวแทนของสัญญาณที่จะส่งให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะต้องทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณก่อน โดยการเก็บสัญญาณค่าแรงดันอย่างต่อเนื่อง 10 สัญญาณ แล้วหาค่าเฉลี่ยของรูปสัญญาณทั้งหมด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณค่าแรงดันที่จะส่งให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

4.3.2 การวัดค่ากระแส

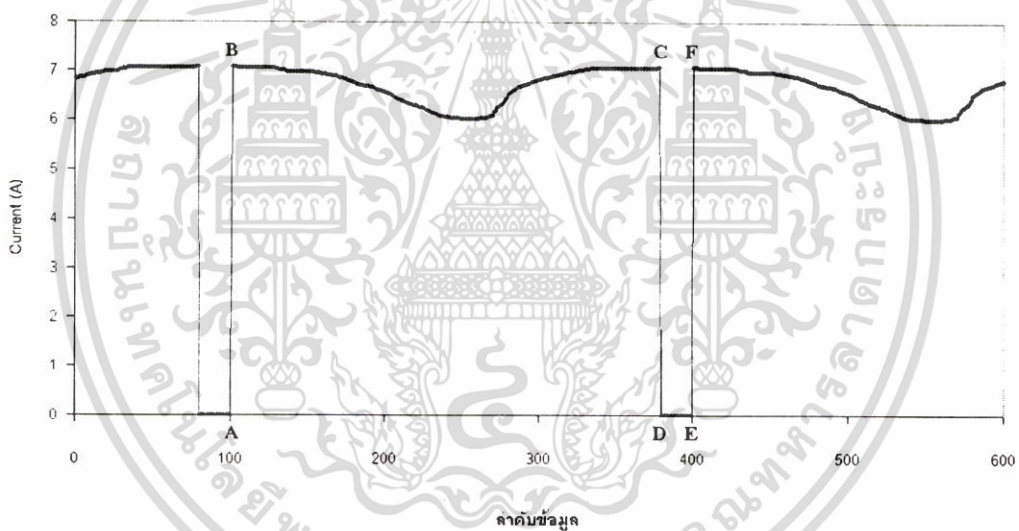


รูปที่ 4.16 วงจรสำหรับวัดค่ากระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสของไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่กำลังทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์นั้น จะวัดได้โดยการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  ที่ต่ออนุกรมอยู่ในวงจร แล้วนำค่าที่ได้ไปเข้าวงจรปรับสภาพสัญญาณชนิดป้อนกลับแบบลบโดยใช้ออปแอมป์ กำหนดอัตราขยายสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณกระแสที่อยู่ในรูปของค่าความต่างศักย์ในช่วง  $0-5 \text{ V}$  แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีอยู่ในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT90S8535 ข้อมูลที่แปลงเป็นดิจิตอลแล้วจะถูกเก็บลงในหน่วยความจำเพื่อที่จะส่งให้ลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ทำการคำนวณต่อไป

เช่นเดียวกับการวัดสัญญาณแรงดัน เราไม่สามารถทราบได้ว่าเริ่มต้นเก็บสัญญาณกระแสมาจากจุดใด ดังนั้นเพื่อที่จะให้ได้รูปสัญญาณกระแสที่สมบูรณ์หนึ่งรูปนั้น เราจะต้องทำการเก็บค่าสัญญาณจำนวนมากมาก่อน แล้วจึงมาคัดเลือกรูปสัญญาณที่สมบูรณ์อีกครั้ง โดยเริ่มต้นจะทำการเก็บค่าข้อมูล 600 จุดมาก่อน เพื่อที่จะแน่ใจได้ว่ามีสัญญาณที่มีความสมบูรณ์อย่างน้อยหนึ่งรูป

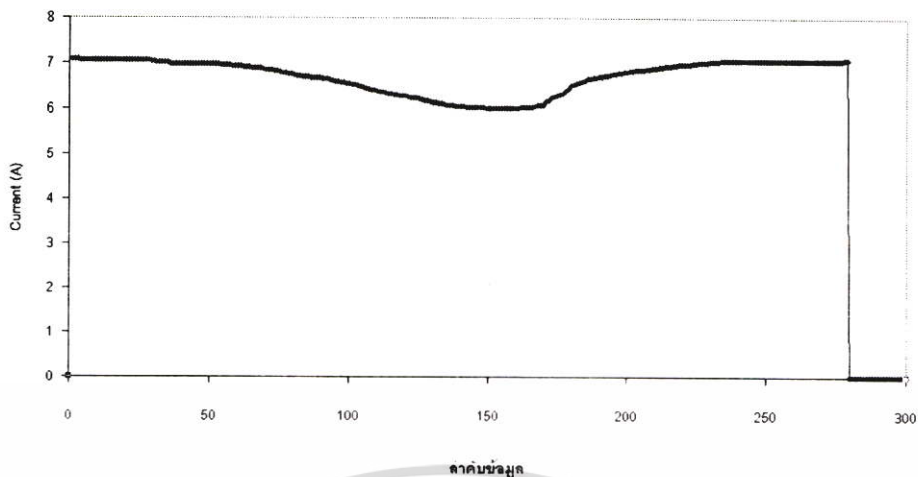


รูปที่ 4.17 ข้อมูลค่ากระแสจำนวน 600 ข้อมูล

จากข้อมูล 600 จุดที่ได้ เราจะใช้เทคนิคในการเขียน โปรแกรมเพื่อคัดเลือกข้อมูลที่จะให้รูปสัญญาณที่มีความสมบูรณ์ออกมา โดยการหาความแตกต่างของแต่ละข้อมูล จากรูป 4.17 ค่าที่จุด A เมื่อนำมาลบกับค่าที่จุด B จะให้ผลต่างที่เป็นลบมากที่สุด จึงให้จุด B เป็นจุดเริ่มต้นของรูปสัญญาณ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อไปจนถึงจุด C และ D ก็จะทำให้ค่าผลต่างมีค่ามากที่สุดอีกจุดหนึ่ง แต่ค่าที่ได้เป็นบวก จึงยังไม่ใช่จุดสิ้นสุดของรูปสัญญาณ ทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณต่อไปจนถึงจุด E และ F ก็จะได้ค่าผลต่างที่เป็นลบมากที่สุดอีกครั้งหนึ่ง จึงให้จุด E เป็นจุดสิ้นสุดของรูปสัญญาณ เมื่อนำรูปสัญญาณที่สมบูรณ์มาเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

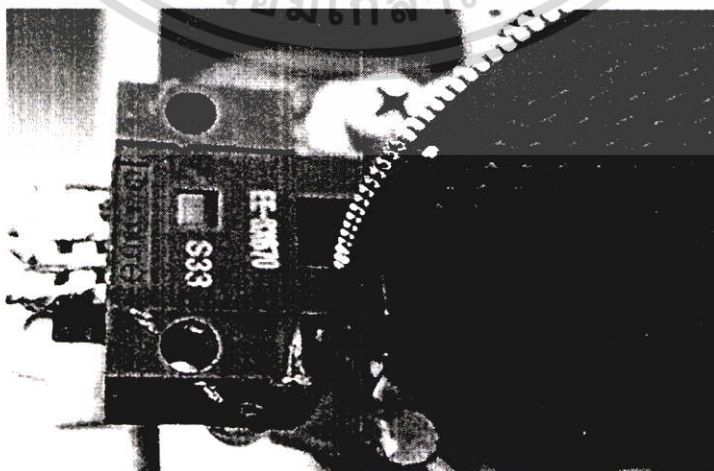


รูปที่ 4.18 ข้อมูลค่ากระแสที่ทำการคัดเลือกแล้ว

สัญญาณกระแสนี้ยังไม่ใช่ตัวแทนของสัญญาณที่ส่งให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะต้องทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณก่อน โดยการเก็บสัญญาณค่ากระแสอย่างต่อเนื่อง 10 สัญญาณ แล้วหาค่าเฉลี่ยของรูปสัญญาณทั้งหมดเพื่อใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณค่ากระแสที่ส่งให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

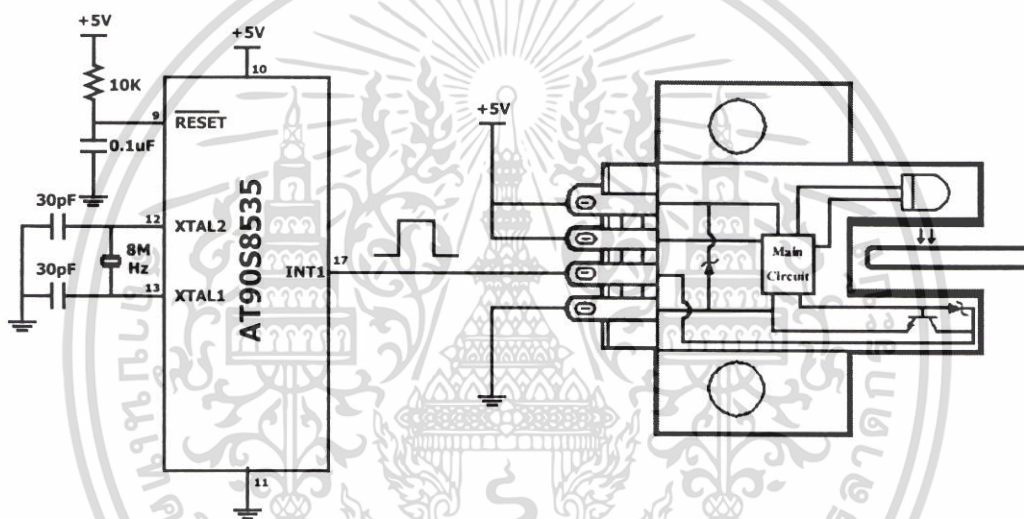
#### 4.3.3 การวัดค่าพลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ จะถูกส่งผ่านมาตรวัดกำลังไฟฟ้าย้อนกลับเข้าไปในสายส่งไฟฟ้า ทำให้งานหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้าหมุนถอยหลังกลับ การที่เราจะทราบถึงค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ทำได้โดยการวัดจำนวนรอบการหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้า ว่ามีจำนวนรอบมากน้อยเท่าไรในแต่ละวัน แล้วนำจำนวนรอบนี้มาคำนวณกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันนั้นๆ



เอกสารรูปที่ 4.19 รูปนงานหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดจำนวนรอบการหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้านั้นทำได้โดยการเจาะรูเล็กๆ บนจานหมุนของมาตรวัดกำลังไฟฟ้า แล้วใช้อุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง (Photo Detector) เป็นตัวตรวจวัดจำนวนรอบการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงจะมีด้านบนเป็นตัวส่งแสง และด้านล่างเป็นตัวรับแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ติดตั้งอุปกรณ์นี้โดยให้จานหมุนของมิเตอร์อยู่ระหว่างกลางของตัวส่งและตัวรับ จานหมุนของมิเตอร์จะไปบังไม่ให้แสงจากตัวส่งไปถึงตัวรับได้จนกว่าจานหมุนจะหมุนไปจนถึงตำแหน่งที่เจาะรูเอาไว้ แสงจากตัวส่งก็จะส่องไปถึงตัวรับได้เกิดเป็นสัญญาณส่งไปให้กับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ ครั้งเมื่อครบรอบการหมุน ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่นับจำนวนสัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งหมดเก็บเป็นข้อมูล เพื่อเตรียมส่งให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ต่อไป



รูปที่ 4.20 วงจรสำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้า

ข้อมูลทั้งหมดที่ไมโครวัดสัญญาณ I-V วัดได้ จะนำมาพร้อมกับข้อมูลที่ได้จากโมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง รวมข้อมูลทั้งหมดจะมี

**V(300) , I(300) , Tcell , Tamb , Irradiance , kWh**

ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งต่อไปให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ผ่านทางพอร์ตขนานของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลและบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูลต่อไป

## 4.4 การรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลวัดสัญญาณ I-V กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

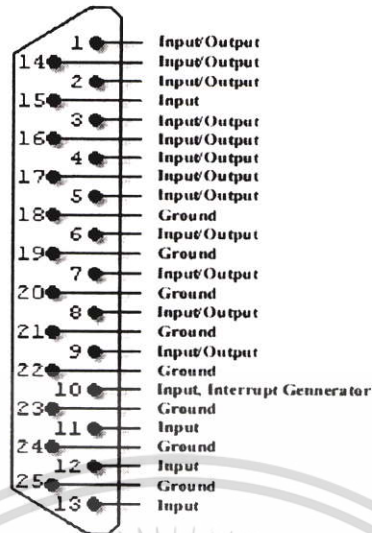
### 4.4.1 พอร์ตขนาน

พอร์ตขนานที่ติดตั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์จะประกอบไปด้วยขาสัญญาณจำนวน 25 ขา ภายใต้วงที่มีชื่อว่า DB-25 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ขาสัญญาณเหล่านี้สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ด้วยสัญญาณแบบ TTL logic โดยแต่ละขาจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป บางขาจะทำหน้าที่รับสัญญาณได้อย่างเดียว หรือบางขาอาจจะทำหน้าที่ได้ทั้งรับและส่งสัญญาณ โดยกำหนดจากการเขียนโปรแกรมสั่งงาน ซึ่งรายละเอียดของขาสัญญาณจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของพอร์ตขนาน

ขาสัญญาณ	คุณสมบัติ
1	Input / Output
2-9	Input / Output
10	Input, Interrupt Generator
11	Input
12	Input
13	Input
14	Input / Output
15	Input
16	Input / Output
17	Input / Output
18-25	Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ขั้วต่อแบบDB-25

ขาสัญญาณที่ 2-9 เรียกว่าขาข้อมูล (Data Pins) สามารถกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นขารับหรือส่งสัญญาณก็ได้ แต่จะต้องมีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งหมด 8 ขา ไม่สามารถแยกกำหนดแต่ละขาได้ เมื่อกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นขาส่งสัญญาณจะให้ค่าสัญญาณในระดับสูง มีค่าอยู่ในช่วง +2.4 V ถึง +5.0 V และค่าสัญญาณในระดับต่ำ มีค่าอยู่ในช่วง 0 V ถึง +0.8 V ขาสัญญาณจะไม่สามารถจ่ายกระแส (source current) ได้มาก แต่เมื่อกำหนดให้ขาสัญญาณมีคุณสมบัติเป็นขารับสัญญาณจะสามารถรับกระแส (sink current) ได้มากกว่า 20 mA

#### 4.4.2 การกำหนดคุณสมบัติของขาสัญญาณพอร์ตขนาน

การกำหนดคุณสมบัติของขาสัญญาณพอร์ตขนาน สามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมภาษาซี ซึ่งจะต้องทำการอ้างอิงไฟล์ “parapin.h” ไว้ที่ต้นโปรแกรม การเรียกชื่อขาสัญญาณแต่ละขาจะใช้คำว่า “LP\_PINnn” โดย nn จะแทนด้วยตัวเลขที่บอกถึงลำดับของขาเริ่มตั้งแต่ 01 จนถึง 17 วิธีการกำหนดให้ขาสัญญาณทำหน้าที่เป็นขารับสัญญาณทำได้โดยการอ้างคำสั่ง

```
“pin_input_mode(LP_PINnn);”
```

วิธีการกำหนดให้ขาสัญญาณทำหน้าที่เป็นขาส่งสัญญาณทำได้โดยการอ้างคำสั่ง

```
“pin_output_mode(LP_PINnn);”
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

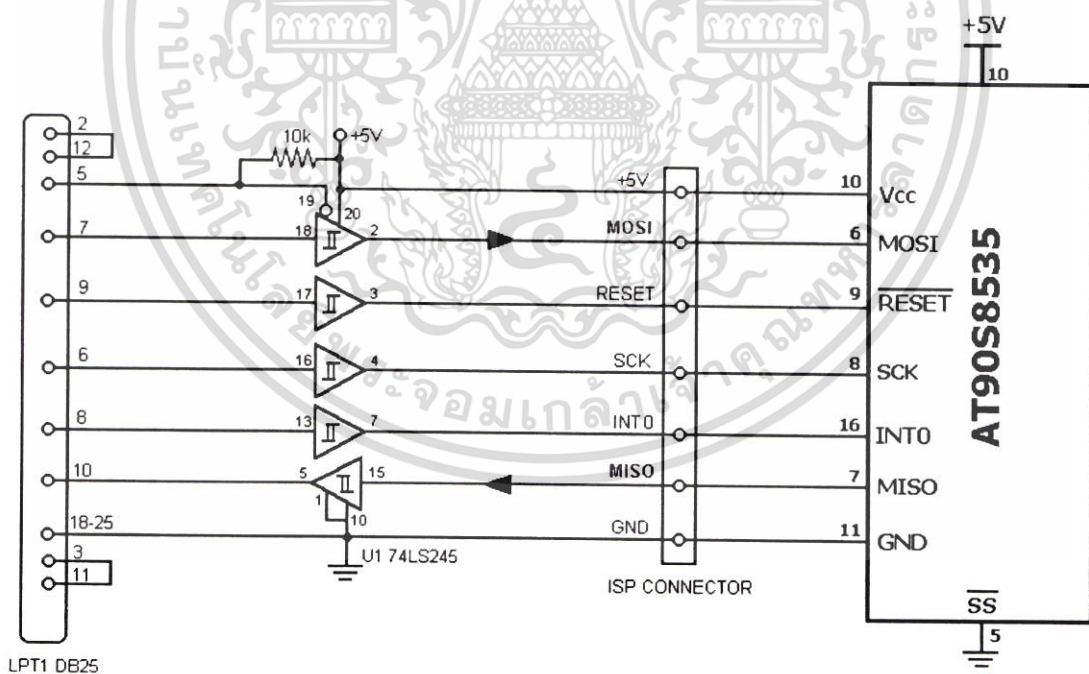
และเมื่อขาสัญญาณทำหน้าที่เป็นขาส่งสัญญาณแล้ว จะสามารถกำหนดสถานะของขาสัญญาณว่าจะให้มีสถานะเป็น “0” หรือเป็น “1” ได้ด้วยคำสั่ง

```
“clear_pin(LP_PINnn);”
```

```
“set_pin(LP_PINnn);”
```

#### 4.4.3 Serial Peripheral Interface (SPI)

Serial Peripheral Interface เป็นการรับส่งข้อมูลความเร็วสูงแบบเข้าจังหวะ (High-Speed Synchronous) ระหว่าง AT90S8535 กับอุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อ โดยใช้สายสัญญาณในการรับส่งข้อมูลสามเส้น การรับและส่งข้อมูลสามารถทำได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน (Full-duplex) สามารถกำหนดได้ว่าตัวใดจะทำหน้าที่เป็นตัวแม่ (Master) และตัวลูก (Slave) โดยตัวแม่จะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) เพื่อกำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูล



รูปที่ 4.22 วงจรที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลวัดสัญญาณ I-V กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 เป็นวงจรที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครวัดสัญญาณ I-V กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน โดยกำหนดให้ลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์เป็นตัวแม่ และ ไมโครวัดสัญญาณ I-V เป็นตัวลูก โดยการต่อขา Slave port select input ( $\overline{SS}$ ) ของ AT90S8535 ลงกราวด์ จะทำให้ไมโครวัดสัญญาณ I-V นั้นทำหน้าที่เป็นตัวลูก โดยขาสัญญาณแต่ละขาจะทำหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

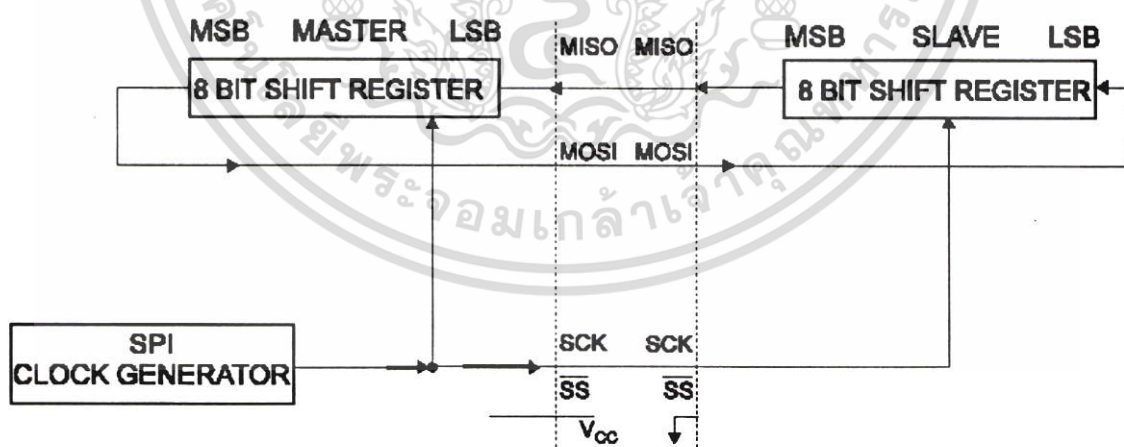
ขา LP\_PIN07 ของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะเชื่อมต่อกับขา Master data output, slave data input (MOSI) ของ AT90S8535 เพื่อทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ไปยังไมโครวัดสัญญาณ I-V

ขา LP\_PIN10 ของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะเชื่อมต่อกับขา Master data input, slave data output (MISO) ของ AT90S8535 เพื่อทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากไมโครวัดสัญญาณ I-V ไปยังตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์

ขา LP\_PIN06 ของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะเชื่อมต่อกับขา Slave clock input (SCK) ของ AT90S8535 เพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณ Clock จากตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ไปยังไมโครวัดสัญญาณ I-V

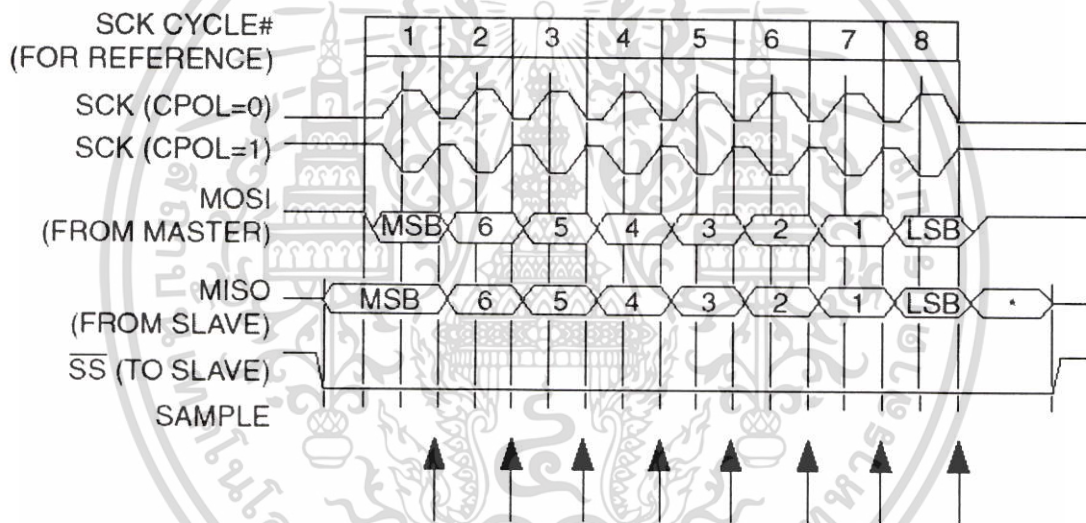
ขา LP\_PIN08 ของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะเชื่อมต่อกับขา External Interrupt source 0 (INT0) ของ AT90S8535 เพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณ Interrupt จากตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ไปยังไมโครวัดสัญญาณ I-V เพื่อใช้เป็นสัญญาณในการขอข้อมูล

ขา LP\_PIN09 ของลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์จะเชื่อมต่อกับขา RESET ของ AT90S8535 เพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณรีเซ็ตจากตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ไปยังไมโครวัดสัญญาณ I-V



รูปที่ 4.23 แผนภาพบล็อกแสดงการติดต่อกันระหว่างตัวแม่และตัวลูก

จากรูปที่ 4.23 การรับส่งข้อมูลระหว่างตัวแม่และตัวลูกเริ่มต้นจากตัวแม่ส่งสัญญาณขัดจังหวะ (Interrupt) ไปยังขา INT0 ของตัวลูก เพื่อเป็นสัญญาณเริ่มต้นในการรับส่งข้อมูล จากนั้นตัวแม่และตัวลูกจะนำข้อมูลที่ต้องการส่งไปเก็บไว้ในวงจรเลื่อนข้อมูล (Shift Register) ของแต่ละฝ่ายแล้วให้ตัวแม่กำเนิดสัญญาณนาฬิกา ก็จะทำให้เกิดการเลื่อนข้อมูลจำนวนหนึ่งบิตจากตัวแม่ไปยังตัวลูกผ่านทางขา MOSI และข้อมูลหนึ่งบิตจากตัวลูกไปยังตัวแม่ผ่านทางขา MISO ซึ่งจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน โดยกำหนดให้บิตที่มีหลักสูงสุด (MSB) ของทั้งสองฝั่งเลื่อนออกไปก่อน ทำการส่งสัญญาณนาฬิกาไปอีกเจ็ดลูกจนถึงบิตที่มีหลักต่ำสุด (LSB) ข้อมูลทั้งหมดจากวงจรเลื่อนข้อมูลของตัวลูกก็จะไปอยู่ในวงจรเลื่อนข้อมูลของตัวแม่ และข้อมูลทั้งหมดในวงจรเลื่อนข้อมูลของตัวแม่ก็จะไปอยู่ในวงจรเลื่อนข้อมูลของตัวลูก เป็นการเสร็จสิ้นการรับส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งไบต์ ซึ่งไทม์มิงไดอะแกรม (Timing Diagram) ของการรับส่งข้อมูลดูได้จากรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ไทม์มิงไดอะแกรมแสดงการส่งข้อมูลระหว่างตัวแม่และตัวลูก

ข้อมูลทั้งหมดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ I-V จะส่งต่อไปให้กับลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ นั้นจะประกอบไปด้วยตัวเริ่มต้นข้อมูลซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น “1111H” จากนั้นจะตามด้วยสัญญาณค่าแรงดันจำนวน 300 ค่า สัญญาณกระแสจำนวน 300 ค่า ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิของอากาศ ค่าความเข้มแสงแดด และค่ากำลังไฟฟ้าตามลำดับ โดยมีตัวสิ้นสุดของข้อมูลซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น “F0F0H”

**1111H, V(300) , I(300) , Tcell , Tamb , Irradiance , kWh , F0F0H**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

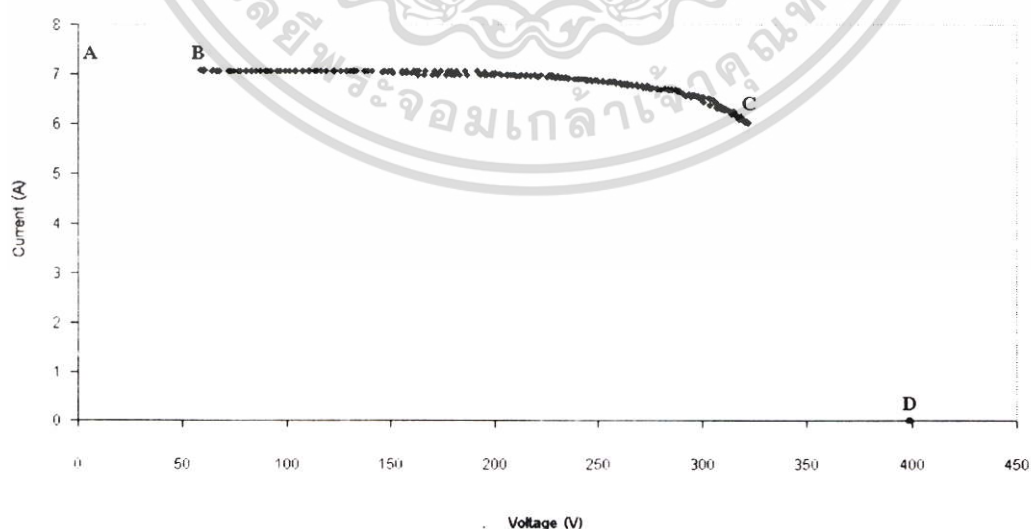
## 4.5 ลีทูกซ์เซิร์ฟเวอร์

ลีทูกซ์เซิร์ฟเวอร์ คือคอมพิวเตอร์ที่ลงระบบปฏิบัติการลินุกซ์ มีหน้าที่ในการคำนวณและบันทึกผลที่ได้ลงในหน่วยความจำ เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก โดยทำการเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จึงสามารถที่จะดูข้อมูลได้จากกระยะไกล

เมื่อลีทูกซ์เซิร์ฟเวอร์ได้รับข้อมูลดิบจากโมดูลวัดสัญญาณ I-V แล้ว จะยังไม่นำข้อมูลเหล่านี้บันทึกลงในหน่วยความจำ เนื่องจากข้อมูลที่ได้นั้นมีปริมาณมาก และเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลดิบเหล่านี้มาผ่านกระบวนการลดปริมาณข้อมูล (Data Reduction) เพื่อดึงเอาข้อมูลสำคัญที่เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ออกมา แล้วทำการบันทึกเฉพาะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นี้ลงในหน่วยความจำ เป็นการลดปริมาณข้อมูลที่จะถูกบันทึกให้เหลือเพียงข้อมูลที่สำคัญเพียงไม่กี่ตัว ส่วนข้อมูลดิบที่ถูกคำนวณแล้วก็จะถูกทิ้งไป

### 4.5.1 การหาสมการตัวแทนของกราฟ I-V

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์หาได้จากกราฟ I-V โดยการนำข้อมูลดิบของสัญญาณกระแส และแรงดันมาเขียนกราฟ โดยให้แกนตั้งเป็นสัญญาณแรงดัน และแกนนอนเป็นสัญญาณกระแส จะได้กราฟดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟ I-V ของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ได้จากข้อมูลดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ได้จะเป็นกราฟ I-V ที่ไม่สมบูรณ์ จะมีข้อมูลบางช่วงที่ขาดหายไปจากจุด A จนถึงจุด B เป็นช่วงที่อินเวอร์เตอร์ตัดชุดเซลล์แสงอาทิตย์ออก โดยการสั่งให้ IGBT ทั้งสี่ตัวไม่ทำงาน เพื่อป้องกันการช็อตกันในขณะที่ไฟฟ้ากระแสสลับกำลังเปลี่ยนเฟส ทำให้ข้อมูลในช่วง A ถึง B หายไป ส่วนข้อมูลที่หายไปในช่วงจุด C ถึงจุด D เกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าแรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_p$ ) กับค่าแรงดันวงจรเปิด ( $V_{\infty}$ ) โดยที่จุด C จะเป็นค่าของแรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าประมาณ 310 V ส่วนที่จุด D จะเป็นค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่าประมาณ 400 V

จากความไม่สมบูรณ์ของรูปกราฟนี้ จึงต้องใช้ลีนูซ์เซิร์ฟเวอร์ทำการคำนวณเพื่อสร้างสมการตัวแทนของเส้นกราฟ I-V นี้ โดยใช้การคำนวณประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด หาสมาการให้อยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียลกำลังหก

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 \quad (4.1)$$

การหาค่าสมการที่สมบูรณ์จะทำโดยการหาค่าของสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $a_6$  จากการแก้สมการ

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \\ \sum x^3 y \\ \sum x^4 y \\ \sum x^5 y \\ \sum x^6 y \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

เมื่อ ค่า n คือจำนวนข้อมูลที่นำมาคำนวณ

ค่า x คือค่าแรงดันไฟฟ้า

ค่า y คือค่ากระแสไฟฟ้า

วิธีการแก้สมการจะให้กฎของครเมอร์ (Cramer's Rule) ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งจะได้ค่า  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $a_6$  มีค่าเป็น

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum y & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum xy & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 y & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{vmatrix}} \quad (4.3)$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum y & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum xy & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^2 y & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^3 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^4 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^5 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^6 y & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{vmatrix}} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_2 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} n & \sum x & \sum y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^2 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^3 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^4 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^5 y & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^6 y & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \\ \hline \begin{array}{ccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \end{array} \tag{4.5}$$

$$a_3 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} n & \sum x & \sum y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^2 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^3 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^4 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^5 y & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^6 y & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \\ \hline \begin{array}{ccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \end{array} \tag{4.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_4 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum y & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum xy & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^2 y & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^3 y & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^4 y & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^5 y & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^6 y & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \\ \hline \begin{array}{cccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \end{array} \quad (4.7)$$

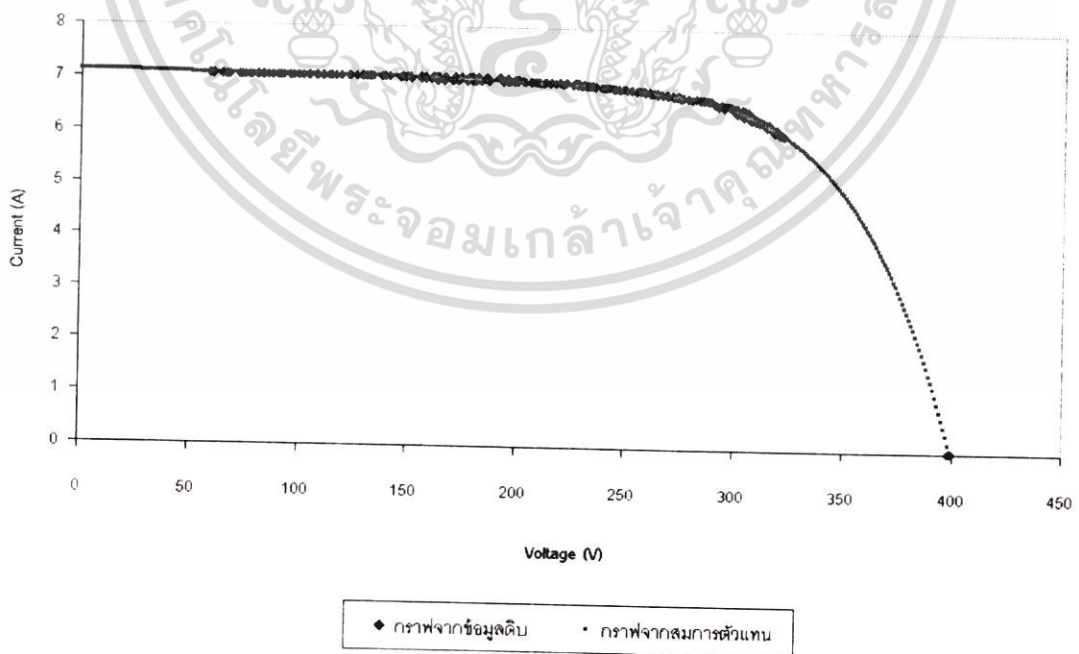
$$a_5 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum y & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum xy & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^2 y & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^3 y & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^4 y & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^5 y & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^6 y & \sum x^{12} \end{array} \\ \hline \begin{array}{cccccccc} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{array} \end{array} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_6 = \frac{\begin{matrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum xy \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^2 y \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^3 y \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^4 y \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^5 y \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^6 y \end{matrix}}{\begin{matrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{matrix}}$$

(4.9)

เมื่อได้สมการที่เป็นตัวแทนของข้อมูลดิบแล้ว ทดลองนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากข้อมูลดิบเดิมโดยการแทนค่า x ในสมการตั้งแต่ค่าศูนย์จนถึงค่าแรงดันวงจรเปิด จะได้กราฟดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟ I-V จากสมการตัวแทน เปรียบเทียบกับกราฟ I-V ที่ได้จากข้อมูลดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการแข่งขันเอกสารวิชาการของนักเรียนโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นตัวบ่งชี้ที่มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 จะบ่งบอกว่าค่าสมการตัวแทนที่คำนวณได้นั้นมีความใกล้เคียงกับข้อมูลดิบมากน้อยเพียงใด โดยสมการตัวแทนจะน่าเชื่อถือมากที่สุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับหนึ่ง

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคำนวณได้จาก

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.10)$$

โดยที่

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (4.11)$$

และ

$$SST = \left( \sum Y_i^2 \right) - \frac{\left( \sum Y_i \right)^2}{n} \quad (4.12)$$

เมื่อ

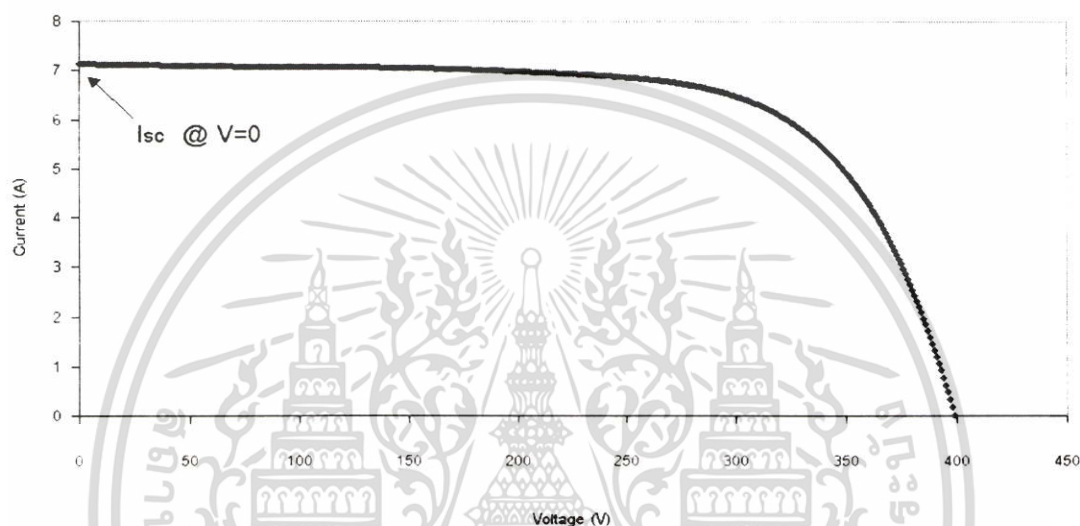
$Y_i$  คือ ค่ากระแสที่ได้จากข้อมูลดิบลำดับที่  $n$

$\hat{Y}_i$  คือค่ากระแสที่ได้จากสมการตัวแทน เมื่อแทนค่า  $V$  ลำดับที่  $n$  ในสมการ

ในการตัดสินใจจะนำค่าสมการตัวแทนของข้อมูลดิบมาทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากกว่าเท่ากับ 0.97 ก็จะถือว่าสมการตัวแทนที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับค่าของข้อมูลดิบ และจะใช้สมการตัวแทนนี้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าน้อยกว่า 0.97 ก็จะถือว่าสมการตัวแทนนั้นไม่ใกล้เคียงกับค่าของข้อมูลดิบ และจะไม่ใช้ในการคำนวณต่อไป

### 4.5.3 การหาค่ากระแสลัดวงจร

เมื่อได้สมการตัวแทนของข้อมูลดิบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจมากกว่าหรือเท่ากับ 0.97 มาแล้ว ก็จะนำสมการดังกล่าวมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าแรกที่คำนวณหาได้ง่ายก็คือค่ากระแสลัดวงจร



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ากระแสลัดวงจรที่จุดตัดแกน y

จากรูปที่ 4.27 ค่ากระแสลัดวงจร ก็คือจุดตัดบนแกน y ของเส้นกราฟ I-V ซึ่งหาจุดตัดนี้ได้ โดยการแทนค่า  $V = 0$  ลงในสมการตัวแทน

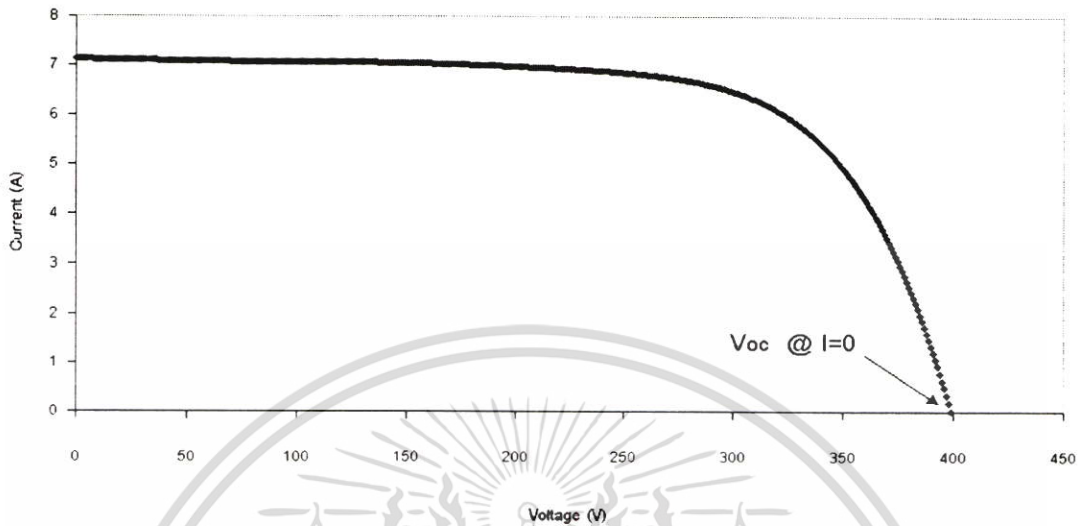
$$I = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + a_4 v^4 + a_5 v^5 + a_6 v^6 \quad (4.13)$$

จะได้ว่าค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์  $a_0$  จากสมการตัวแทนของข้อมูลดิบนั่นเอง

$$I_{sc} = a_0 \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.4 การหาค่าแรงดันวงจรเปิด



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าแรงดันวงจรเปิดที่จุดตัดแกน x

จากรูปที่ 4.28 ค่าแรงดันวงจรเปิดหาได้จากจุดตัดบนแกน x ของเส้นกราฟ I-V ซึ่งจะหาจุดตัดนี้ได้โดยการหาค่าแรงดันที่แทนลงในสมการตัวแทนแล้วได้ค่ากระแสมีค่าเป็นศูนย์ วิธีการหาค่าแรงดันนี้เรียกว่า Incremental Search Method

$$x = x_i - \frac{h \cdot f(x_i)}{f(x_i) - f(x_i - h)} \quad (4.15)$$

เมื่อ  $x_i$  คือค่าแรงดันที่แทนลงในสมการตัวแทนแล้วทำให้ค่ากระแสเริ่มติดลบเป็นค่าแรก

$f(x_i)$  คือค่ากระแสที่ติดลบค่าแรก

$h$  คือผลต่างของค่าแรงดันที่แทนลงในสมการแต่ละขั้น

$f(x_i - h)$  คือค่ากระแสที่เป็นบวกค่าสุดท้าย

วิธีการคำนวณหาค่าแรงดันวงจรเปิด เริ่มจากการแทนค่าแรงดันลงในสมการตัวแทนตั้งแต่ศูนย์จนถึง ค่าแรงดันที่ทำให้ค่ากระแสเริ่มมีค่าติดลบ ความละเอียดของค่าแรงดันวงจรเปิดที่คำนวณได้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดในการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันที่แทนลงในสมการในแต่ละขั้น หรือก็คือค่า  $h$  นั้นเอง

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างการหาค่าแรงดันวงจรเปิด

	V	I	
	0	7.12711	
	1	7.12737	
	...	...	
	...	...	
$h = 1$ {	398	0.16920	
	399	0.00993	$\rightarrow f(x_i - h)$
$x_i \leftarrow$	400	-0.15251	$\rightarrow f(x_i)$

แทนค่าลงในสมการ (4.15)

$$X = 400 - \frac{(1)(-0.15251)}{(-0.15251) - (0.00993)}$$

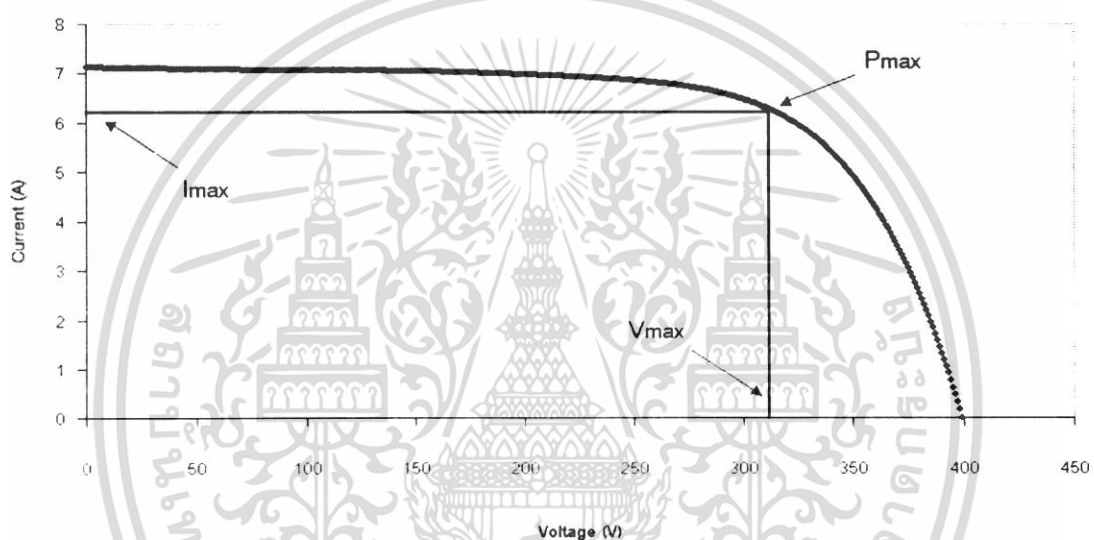
$$X = 399.06113$$

จากตัวอย่างจะได้ค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 399.06 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.5 การหาค่ากระแสสูงสุด แรงดันสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การหาค่ากระแสสูงสุด แรงดันสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะทำไปพร้อมๆ กัน โดยการแทนค่าแรงดันลงในสมการตัวแทนจากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าแรงดันวงจรเปิด แล้วนำค่ากระแสที่คำนวณได้มาคูณกับค่าแรงดันที่กวาดไปตามแกน x หากจุดบนเส้นกราฟที่ค่าของผลคูณมีค่าสูงสุด ก็จะได้ค่ากระแสสูงสุดที่จุดตัดแกน x และค่าแรงดันสูงสุดที่จุดตัดแกน y ส่วนค่าของผลคูณก็คือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่ากระแสสูงสุด ค่าแรงดันสูงสุด และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 4.29 ค่ากระแสสูงสุด ค่าแรงดันสูงสุด และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีความถูกต้องมากขึ้นเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับความละเอียดของการกวาดค่าแรงดันแต่ละขั้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ความละเอียดที่ 10 mV ต่อการกวาดค่าแต่ละขั้น

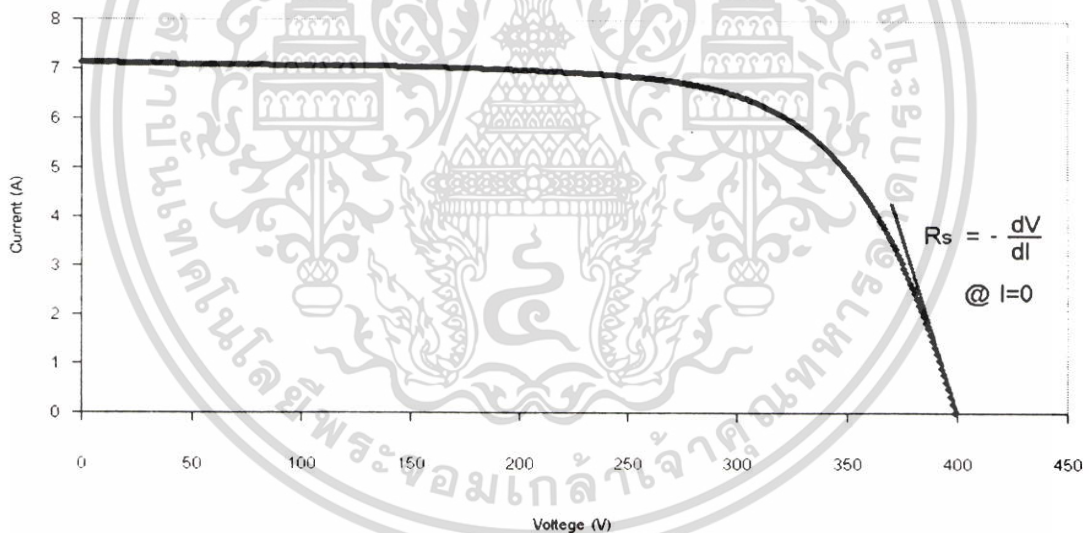
#### 4.5.6 การหาค่าฟิลแฟคเตอร์

เมื่อกำหนดหาค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากระแสสูงสุด และค่าแรงดันสูงสุดได้แล้วก็สามารถคำนวณค่าฟิลแฟคเตอร์ได้จากสมการ

$$FF = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (4.16)$$

#### 4.5.7 การหาค่าความต้านทานอนุกรม (Series Resistance)

ค่าความต้านทานอนุกรมหาได้จากความชันของเส้นกราฟ I-V ที่บริเวณจุดตัดแกน x ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรม

คำนวณได้โดยการหาค่า  $-dV/dI$  ที่  $I=0$  โดยการแทนค่าแรงดันวงจรเปิดลงในสมการตัวแทนเพื่อหาค่ากระแสค่าแรก จากนั้นกำหนดค่า  $dV=0.5V$  แล้วนำค่าแรงดันวงจรเปิดลบด้วย  $0.5V$  แล้วแทนลงไปนสมการตัวแทน ก็จะได้ค่ากระแสที่สอง ค่าผลต่างของแรงดันหารด้วยค่าผลต่างของกระแสจะได้ออกมาเป็นค่าความต้านทานอนุกรม จากนั้นทำการกวาดค่าแรงดันลดลงไปอีก  $10$  ค่า เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานอนุกรมอีก  $10$  ค่า แล้วจึงนำค่าทั้งหมดเอกลำค่าเฉลี่ยที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างการหาค่าความต้านทานอนุกรม

V	I	$\Delta I$	$R_s$
399.06113	0.00	-	-
398.56113	0.080223172	-0.0801244	6.240296
398.06113	0.159556554	-0.0793334	6.302517
397.56113	0.238105215	-0.0785487	6.365481
397.06113	0.315875417	-0.0777702	6.429198
396.56113	0.392873385	-0.076998	6.493678
396.06113	0.469105307	-0.0762319	6.558932
395.56113	0.544577335	-0.075472	6.624971
395.06113	0.619295582	-0.0747182	6.691806
394.56113	0.693266128	-0.0739705	6.759447
394.06113	0.766495014	-0.0732289	6.827907
ค่าเฉลี่ย $R_s$			6.529423

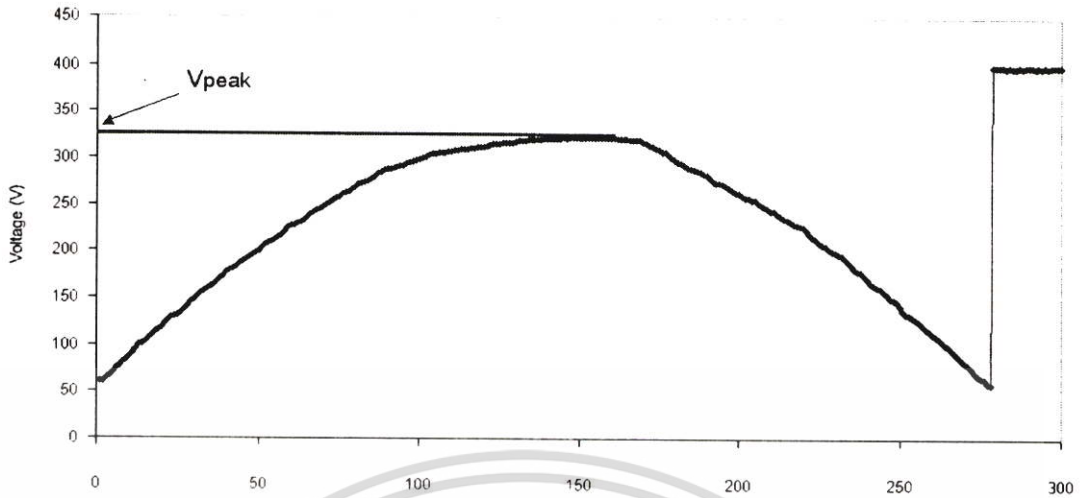
จากตัวอย่างการหาค่าความต้านทานอนุกรม จะได้ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานอนุกรม มีค่าเท่ากับ 6.53 โอห์ม

#### 4.5.8 การหาค่ากระแสRMS ค่าแรงดันRMS และค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

การหาค่าแรงดัน RMS ทำได้โดยการหาแรงดันค่ายอด ( $V_{peak}$ ) จากข้อมูลดิบของสัญญาณแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 แล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วยค่า  $\sqrt{2}$  จากสูตร

$$V_{RMS} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (4.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงตำแหน่งของแรงดันค่ายอด

การหาค่ากระแส rms ทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลดิบของสัญญาณกระแสลงในสูตร

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} \quad (4.18)$$

ค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ( $P_{\text{ac}}$ ) ที่ผลิตได้สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{\text{ac}} = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.9 การหาค่าปริมาณแสงแดดรวม

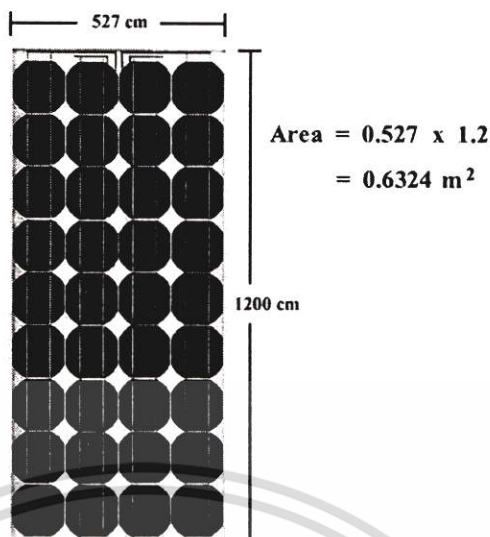
ค่าปริมาณแสงแดดรวม (Insolation) หมายถึงค่าปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนผิวโลกตลอดทั้งวัน มีหน่วยเป็น  $\text{Wh/m}^2/\text{day}$  โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-8  $\text{kWh/m}^2/\text{day}$  การหาค่าปริมาณแสงแดดรวมทำได้โดยการรวมค่าความเข้มแสง ที่วัดได้จากไพราโนมิเตอร์ทุกๆ 5 นาทีตลอดทั้งวัน แต่ก่อนที่จะรวมค่าความเข้มแสงที่วัดได้นั้นจะต้องทำการแปลงหน่วยของค่าความเข้มแสงจาก  $\text{W/m}^2/5\text{min}$  ให้อยู่ในรูป  $\text{Wh/m}^2$  เสียก่อน โดยการนำค่าความเข้มแสงมาหารด้วย 12

$$\begin{aligned} \text{จากหน่วย } & \frac{(\text{W}/\text{m}^2)}{5\text{min}} \quad \text{หรือ} \quad \text{W}(5\text{min})/\text{m}^2 \\ \text{หารด้วย 12} & \frac{\text{W}(5\text{min})/\text{m}^2}{12} = \text{W}(60\text{min})/\text{m}^2 = \text{Wh}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

ค่าปริมาณแสงแดดรวมที่คำนวณได้จะถูกนำมาบวกกันขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง ทุกๆ 5 นาทีตลอดทั้งวัน เมื่อสิ้นสุดวันจะได้ค่าปริมาณแสงแดดรวมที่ตกกระทบบนพื้นโลกมีหน่วยเป็น  $\text{Wh/m}^2/\text{day}$

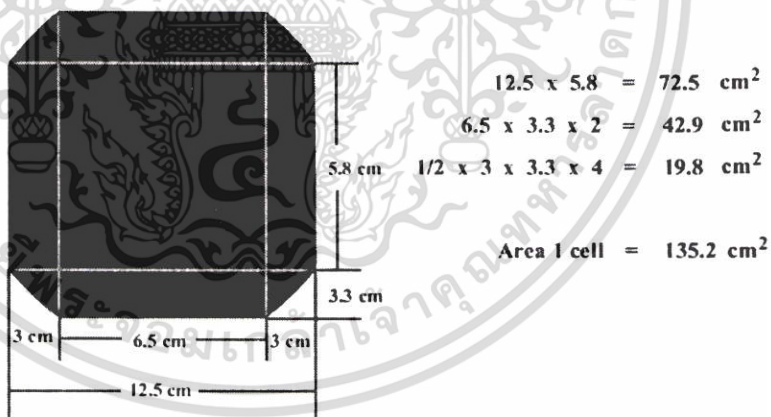
#### 4.5.10 การหาค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์

การหาค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ทำได้โดยการนำเอาค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนพื้นโลก มีหน่วยเป็น  $\text{W/m}^2$  มาคูณกับพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ใช้ในการรับแสง ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาเป็นค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น W



รูปที่ 4.32 แสดงการคำนวณพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแผง

จากรูปที่ 4.32 พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่คำนวณได้ 0.6324 m<sup>2</sup> นั้นจะมีขนาดมากกว่าพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์จริงๆ เนื่องจากได้คำนวณพื้นที่ที่เป็นกรอบเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาพื้นที่เฉพาะส่วนที่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แสดงการคำนวณพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์

$$\text{พท. 1 เซลล์} = 135.2 \text{ cm}^2$$

$$\text{พท. 1 แผง 36 เซลล์} = 4867.2 \text{ cm}^2 = 0.48672 \text{ m}^2$$

$$\therefore 40 \text{ แผง} = 19.4688 \text{ m}^2$$

ดังนั้นการหาค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด จะทำได้โดยการนำ  
เอกสารค่าความเข้มแสง ( $\text{W/m}^2$ ) x 19.4688 ( $\text{m}^2$ ) จะได้หน่วยเป็น  $\text{W}$  มื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.11 การหาค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าพลังงานไฟฟ้ารวม

ข้อมูลดิบของมาตรวัดกำลังไฟฟ้าที่ส่งให้กับสีกซ์เซิร์ฟเวอร์นั้นคือจำนวนรอบการหมุนของจานหมุนในช่วงเวลา 5 นาที ดังนั้นจะต้องนำค่าดังกล่าวมาทำการคำนวณเพื่อเปลี่ยนให้เป็นค่าพลังงานเสียก่อน โดยมาตรวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้นั้นมีจำนวนรอบการหมุน 600 รอบ ต่อ 1 kWh ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยสมการ

$$\text{Watthour} = \frac{\text{จำนวนรอบการหมุน}}{600} \text{ (kWh)} \quad (4.20)$$

ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้ารวมหาได้จากการนำค่าพลังงานไฟฟ้าทุกๆ 5 นาที มาบวกกันไปอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ก็จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในแต่ละวัน

#### 4.5.12 การหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าของพลังงานแสงแดดที่เซลล์อาทิตย์ได้รับ กับค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ โดยจะแบ่งการคำนวณเป็นสองกรณี คือ การหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบทุกๆ 5 นาที และการหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบตลอดทั้งวัน

การหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบทุกๆ 5 นาที ทำได้โดยการนำค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ มาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่คำนวณได้ทุกๆ 5 นาที

$$\text{Efficiency (5 min)} = \frac{P_{ac} \text{ (W)}}{\text{Irradiance} (\text{W}/\text{m}^2) \times 19.4688 (\text{m}^2)} \times 100 \quad (4.21)$$

การหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบตลอดทั้งวันจะทำการคำนวณเมื่อเครื่องเลิกบันทึกข้อมูลแล้ว หรือหลังจาก 18.00 น. โดยการนำค่าปริมาณแสงแดดรวมมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

$$\text{Efficiency (day)} = \frac{\text{Total Watthour (kWh)} \times 1000}{\text{Insolation} (\text{Wh}/\text{m}^2/\text{day}) \times 19.4688 (\text{m}^2)} \times 100 \quad (4.22)$$

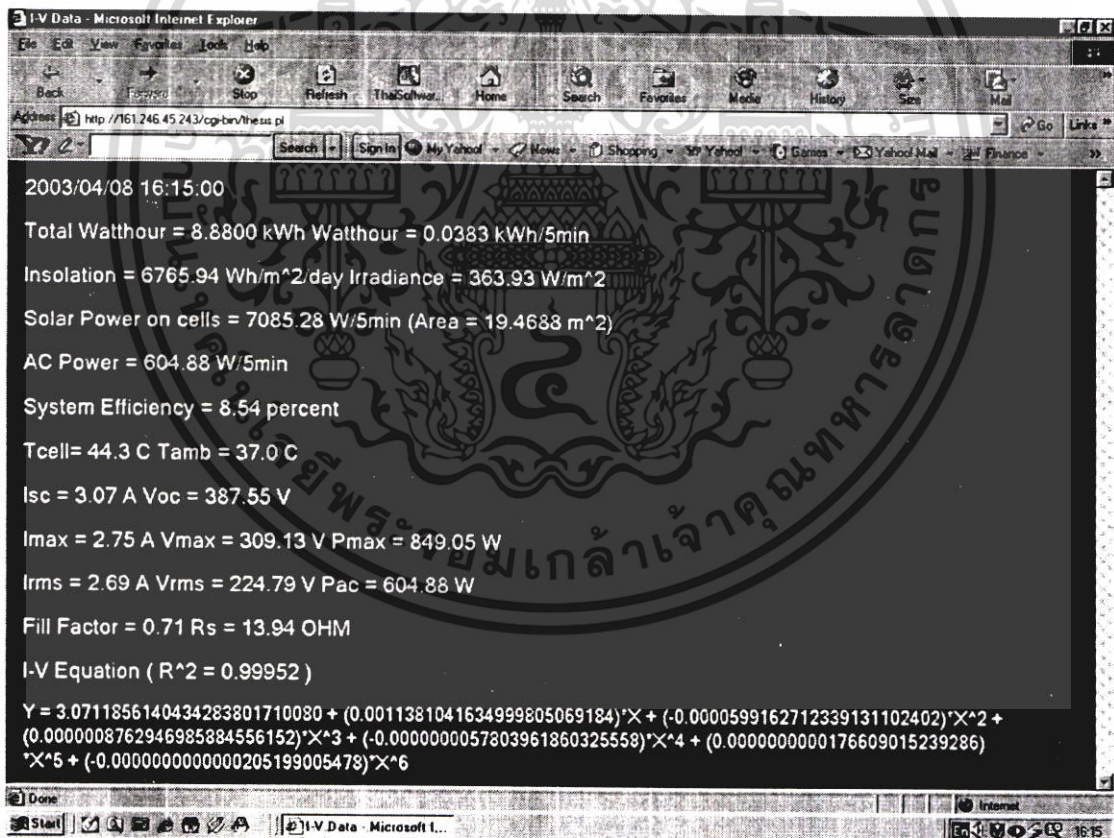
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดลองจะทำโดยการให้โมดูล I-V ทำการวัดและบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของแผงโฟโตโวลตาอิกทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 6.00 น. จนถึง 18.00 น. ของทุกวัน โดยมีการรายงานผลทางจอมอนิเตอร์ของตัวลิ้นุกซ์เซิร์ฟเวอร์ทุกๆ 5 นาที และเนื่องจากลิ้นุกซ์เซิร์ฟเวอร์นั้นเชื่อมต่ออยู่กับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จึงสามารถที่จะดูข้อมูลนี้ได้จากทุกที่ โดยเข้าไปที่ <http://161.246.45.243> ตัวอย่างการแสดงผลแสดงในรูปที่ 5.1

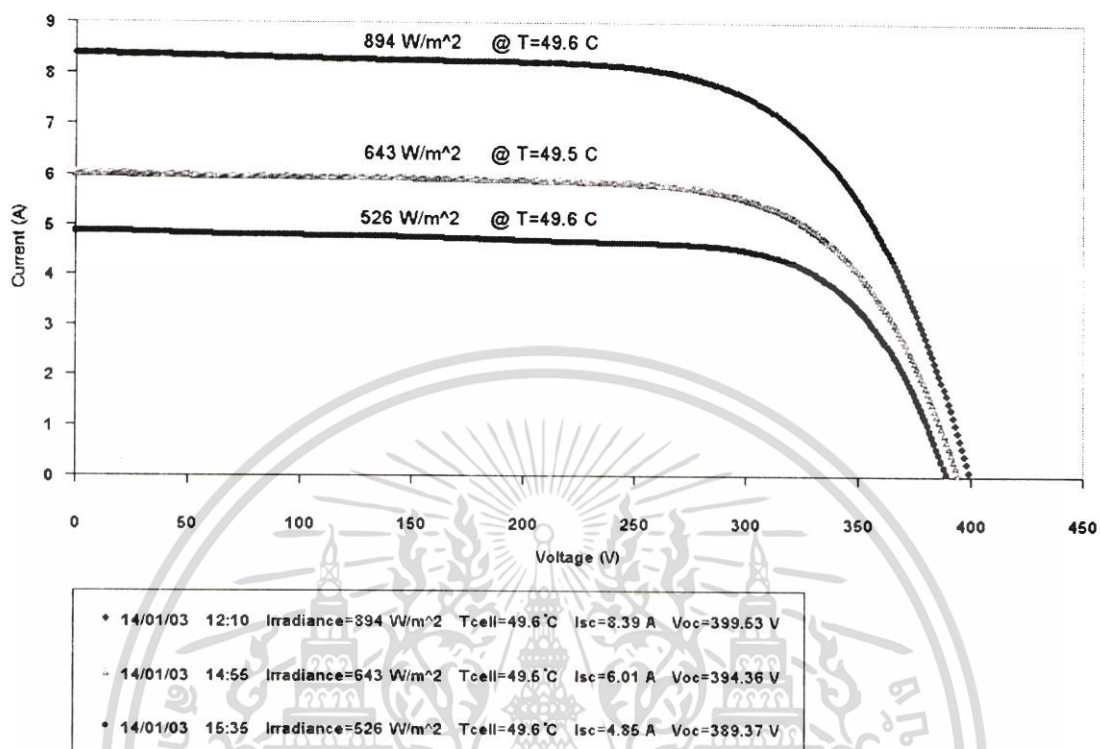
ค่าข้อมูลที่เก็บได้ตลอดทั้งวันจะถูกเก็บเป็นเท็กซ์ไฟล์ (\*.txt) โดยชื่อของไฟล์ข้อมูลจะถูกตั้งให้เป็นชื่อเดียวกับวันที่ของวันนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ข้อมูลของวันที่ 14 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2546 จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ 2003-01-14.txt ซึ่งตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถดูได้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.1 การรายงานข้อมูลผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1 กราฟความสัมพันธ์ I-V ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน

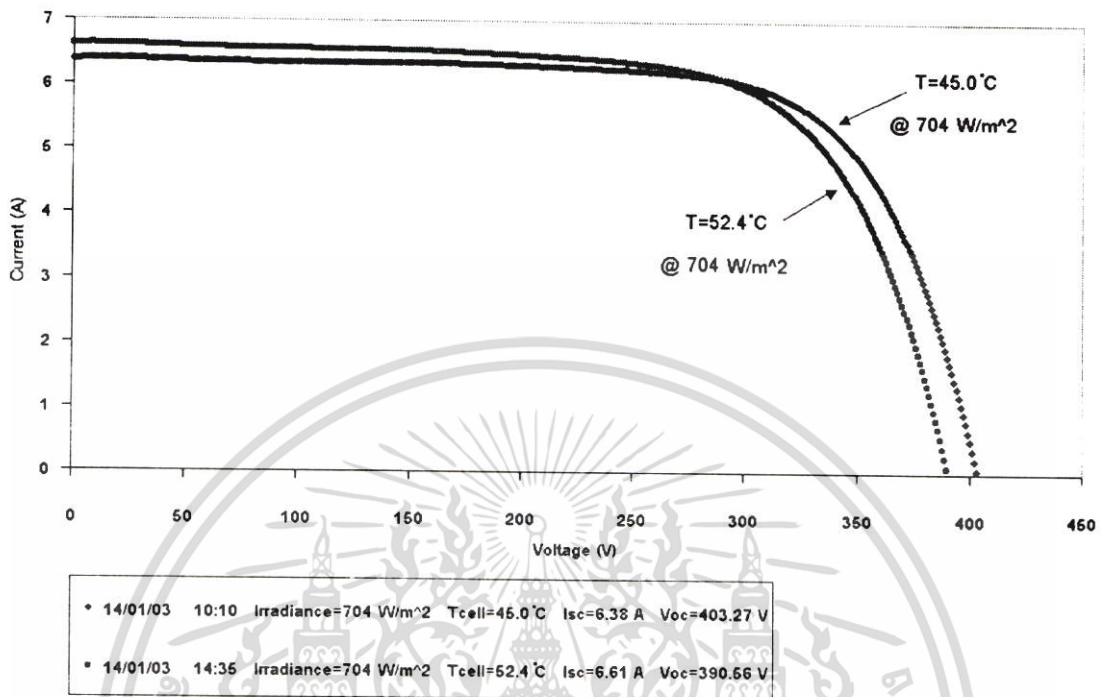
ทำการทดลองเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน โดยมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกัน จากการอ้างอิงข้อมูลที่บ้านที่กได้ในวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2546 ได้เลือกข้อมูลที่มีระดับความเข้มแสงต่างๆ กันตามค่าดังนี้ ข้อมูลค่าแรกในเวลา 12:10 น. มีค่าความเข้มแสงที่  $894 \text{ W/m}^2$  ข้อมูลที่สองในเวลา 14:55 น. มีค่าความเข้มแสงที่  $643 \text{ W/m}^2$  และข้อมูลที่สามในเวลา 15:35 น. มีค่าความเข้มแสงที่  $526 \text{ W/m}^2$  โดยทั้งสาม ข้อมูลมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันอยู่ที่ 49.6 องศาเซลเซียส นำสมการตัวแทนของข้อมูลทั้งสามมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะสังเกตเห็นว่า

1) ที่ระดับความเข้มแสง  $894 \text{ W/m}^2$ ,  $643 \text{ W/m}^2$  และ  $526 \text{ W/m}^2$  จะให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่า 8.39A, 6.01A และ 4.85A ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับความเข้มแสง สอดคล้องกับทฤษฎีคิงที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.5

2) ค่าแรงดันวงจรเปิด มีการตอบสนองกับระดับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากระดับความเข้มแสงที่  $894 \text{ W/m}^2$ ,  $643 \text{ W/m}^2$  และ  $526 \text{ W/m}^2$  จะให้ค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่าเป็น 399.53 V, 394.36 V และ 389.37 V ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 กราฟความสัมพันธ์ I-V ที่ระดับอุณหภูมิต่างกัน



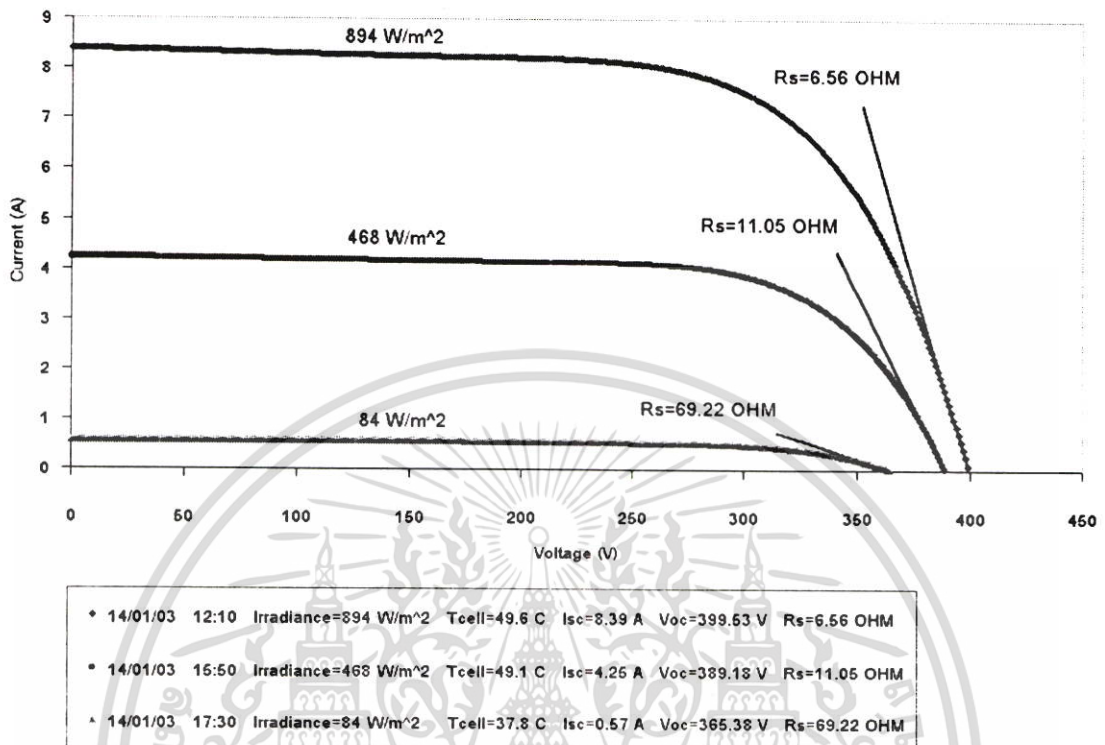
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับอุณหภูมิต่างกัน

ทำการทดลองเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยมีระดับความเข้มแสงเท่ากัน จากการอ้างอิงข้อมูลที่บันทึกได้ในวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2546 ได้เลือกข้อมูลที่มีระดับอุณหภูมิต่างกันสองค่าดังนี้ ข้อมูลแรกในเวลา 10:10 น. มีค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 45.0 °C และข้อมูลที่สองในเวลา 14:35 น. มีค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 52.4 °C โดยทั้งสองข้อมูลมีระดับความเข้มแสงเท่ากันที่ 704 W/m<sup>2</sup> นำสมการตัวแทนของข้อมูลทั้งสองมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.3 จะสังเกตเห็นว่า

1) ที่ระดับอุณหภูมิ 45.0 °C และ 52.4 °C จะให้แรงดันวงจรเปิดมีค่า 403.27 V และ 390.56 V ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงดันวงจรเปิดนี้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับทฤษฎีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.6

2) ค่ากระแสลัดวงจรมีการตอบสนองต่อระดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากที่ระดับอุณหภูมิ 45.0 °C และ 52.4 °C จะให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเป็น 6.38 A และ 6.61 A ตามลำดับ

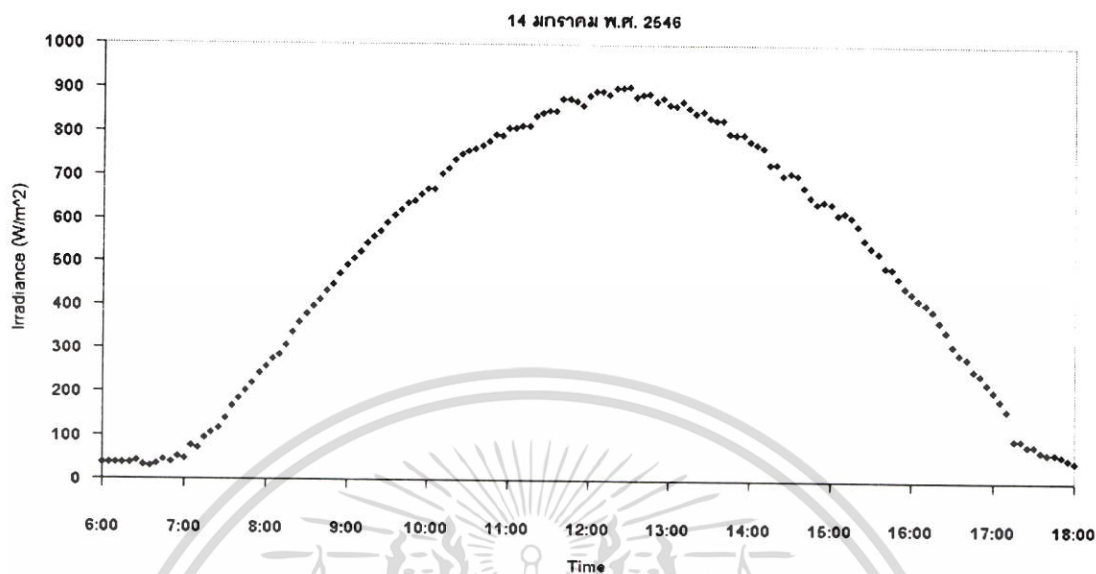
### 5.3 ค่าความต้านทานอนุกรมที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรมที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ กัน

การทดลองเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมต่างกัน โดยมีระดับความเข้มแสงเท่ากันนั้น ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อระดับความเข้มแสงมีค่าเท่ากัน แต่จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อระดับความเข้มแสงมีค่าไม่เท่ากัน จากการอ้างอิงข้อมูลที่บ้านทีกได้ในวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2546 ได้เลือกข้อมูลที่มีระดับความเข้มแสงต่างๆ กันสามค่า ดังนี้ ข้อมูลแรกในเวลา 12:10 น. มีค่าความเข้มแสงที่ 894 W/m<sup>2</sup> ข้อมูลที่สองในเวลา 15:50 น. มีค่าความเข้มแสงที่ 468 W/m<sup>2</sup> และข้อมูลที่สามในเวลา 17:30 น. มีค่าความเข้มแสงที่ 84 W/m<sup>2</sup> นำสมการตัวแทนของข้อมูลทั้งสามมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.4 จะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อระดับความเข้มแสงมีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าน้อยเมื่อระดับความเข้มแสงมีค่ามาก และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับความเข้มแสงลดลง ดังจะเห็นได้จากระดับความเข้มแสงที่ 894 W/m<sup>2</sup>, 468 W/m<sup>2</sup> และ 84 W/m<sup>2</sup> จะให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเป็น 6.56 โอห์ม, 11.05 โอห์ม และ 69.22 โอห์มตามลำดับ

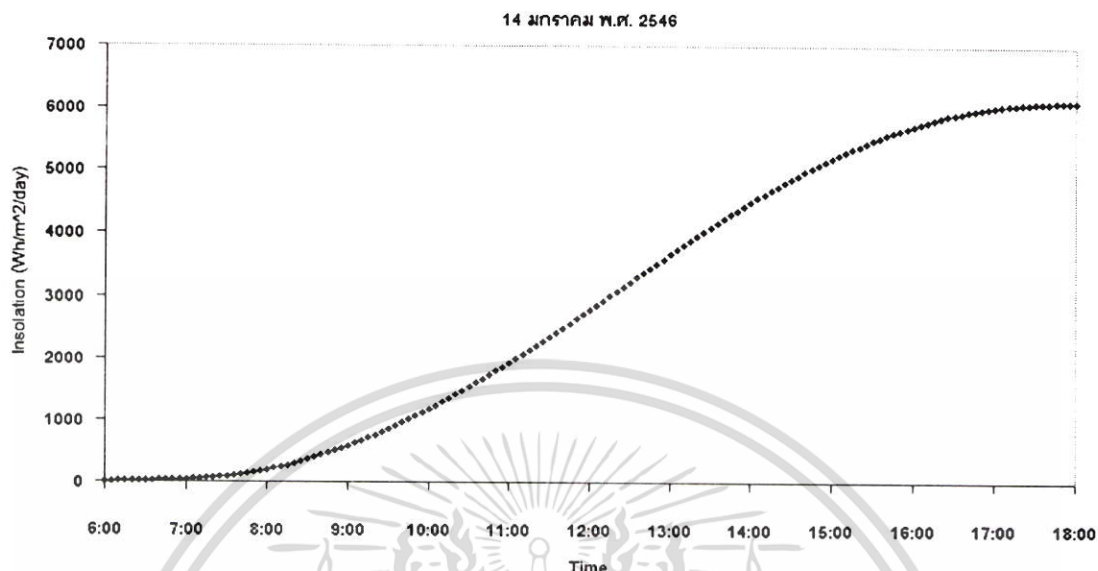
## 5.4 ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.5 กราฟความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าความเข้มแสงในช่วงระหว่างเวลา 6:00 น. ถึง 18:00 น. และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.5 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้เป็นรูปประฆังคว่ำ โดยที่ค่าความเข้มแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ช่วงเวลา 6:00 น. จนถึง 12:00 น. และจะมีค่าความเข้มแสงสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 12:00 น. ถึง 13:00 น. มีค่าประมาณ  $900 \text{ W/m}^2$  หลังจากนั้นค่าความเข้มแสงจะเริ่มมีค่าลดลงในช่วงเวลา 13:00 น. จนถึง 18:00 น. ทั้งนี้เนื่องจากแนวรังสีตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของโลก โดยจะให้ค่าความเข้มแสงสูงสุดเมื่อแนวรังสีตกกระทบบนพื้นผิวตั้งฉากกับผิวโลก

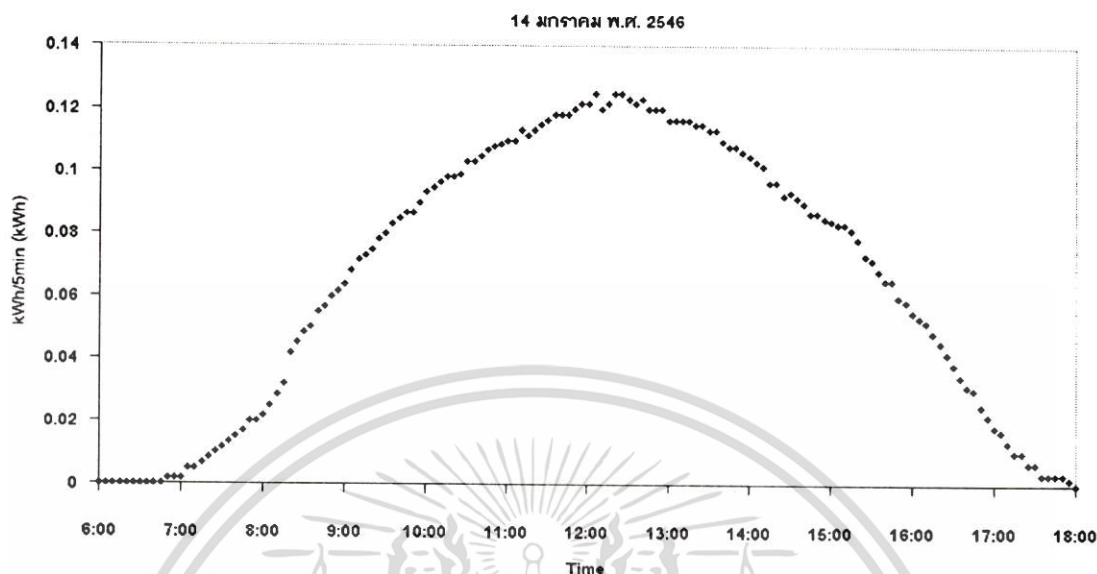
## 5.5 ปริมาณแสงแดดรวมที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าปริมาณแสงแดดรวมที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลค่าปริมาณแสงแดดรวมที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณแสงแดดกับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.6 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดทั้งวัน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่ 6:00 น. จนถึง 8:00 น. ปริมาณแสงแดดรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อย เนื่องจากค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนยังมีค่าน้อย แต่ค่าปริมาณแสงแดดรวมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบบนมีค่าเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากกราฟในช่วงเวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. ลักษณะของกราฟจะมีความชันเพิ่มมากขึ้น จนถึงช่วงเวลา 16:00 น. ถึง 18:00 น. ความเข้มแสงที่ตกกระทบบนมีค่าน้อยลง ทำให้ปริมาณแสงแดดรวมมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อย ความชันของกราฟจึงลดลง ค่าปริมาณแสงแดดรวมที่เวลา 18:00 น. คือค่าปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน จากกราฟอ่านค่าได้ประมาณ 6,000 Wh/m<sup>2</sup>/day ซึ่งถือว่าเป็นวันที่มีปริมาณแสงแดดค่อนข้างมาก

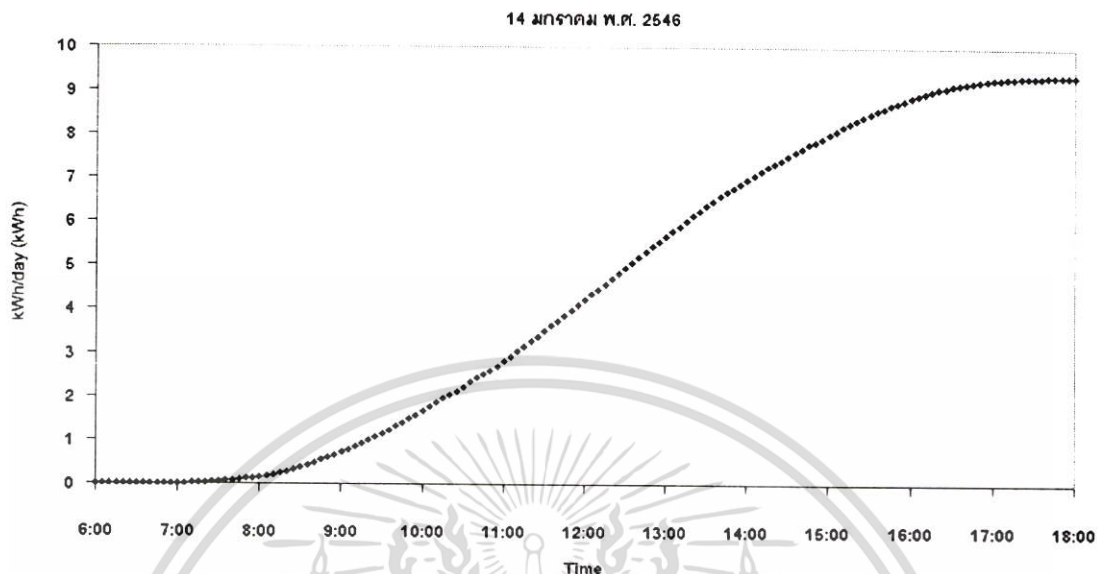
## 5.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาทีในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้ากับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.7 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้เป็นรูประฆังคว่ำ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.5 โดยที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลา 6:00 น. จนถึง 12:00 น. และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุดในช่วงเวลา 12:00 น. ถึง 13:00 น. โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 0.12 kWh ในช่วงเวลา 5 นาที หลังจากนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าลดลงในช่วงเวลา 13:00 น. จนถึง 18:00 น. ทั้งนี้เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันตามความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์

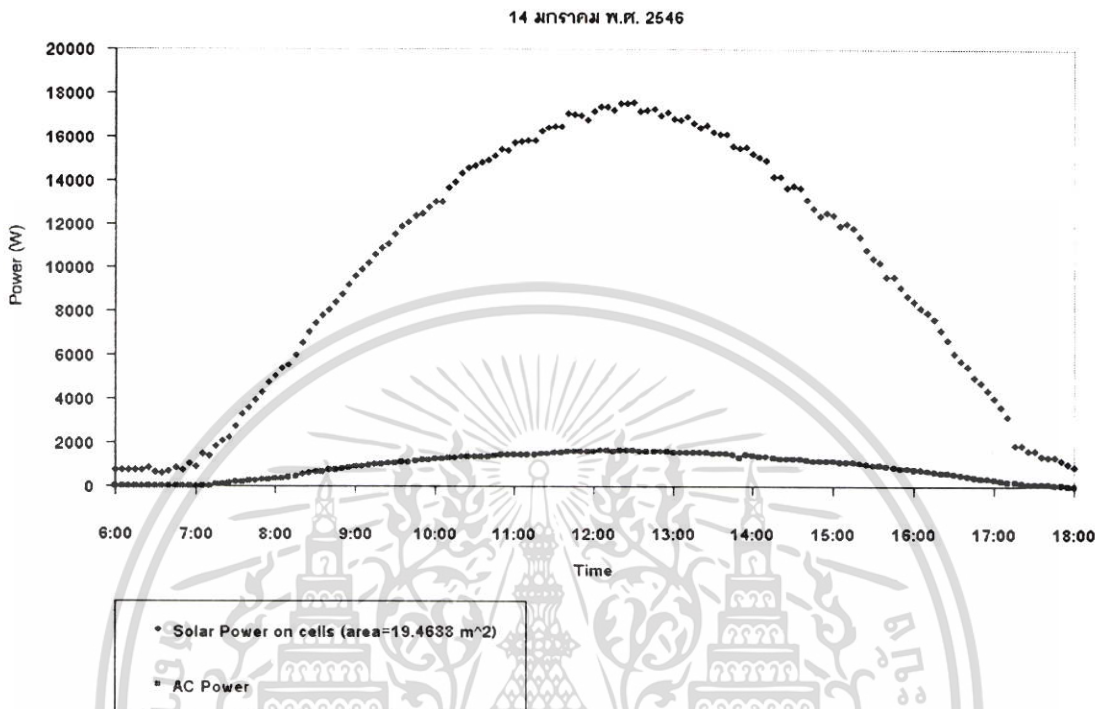
## 5.7 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้กับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.8 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่า ลักษณะของรูปกราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟแสดงค่าปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวันดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ในหนึ่งวันจะแปรผันตรงกับค่าปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน ดังนั้นลักษณะของรูปกราฟจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดทั้งวัน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่ 6:00 น. จนถึง 8:00 น. ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจากค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบยังมีค่าน้อย แต่ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากกราฟในช่วงเวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. ลักษณะของกราฟจะมีความชันเพิ่มมากขึ้น จนถึงช่วงเวลา 16:00 น. ถึง 18:00 น. ความเข้มแสงที่ตกกระทบมีค่าน้อยลง ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นที่ละน้อย ความชันของกราฟจึงลดลง ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่เวลา 18:00 น. คือค่าพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดทั้งวัน จากกราฟอ่านค่าได้ประมาณ 9.4 kWh ซึ่งถือว่าเป็นวันที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ค่อนข้างมาก

## 5.8 ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน

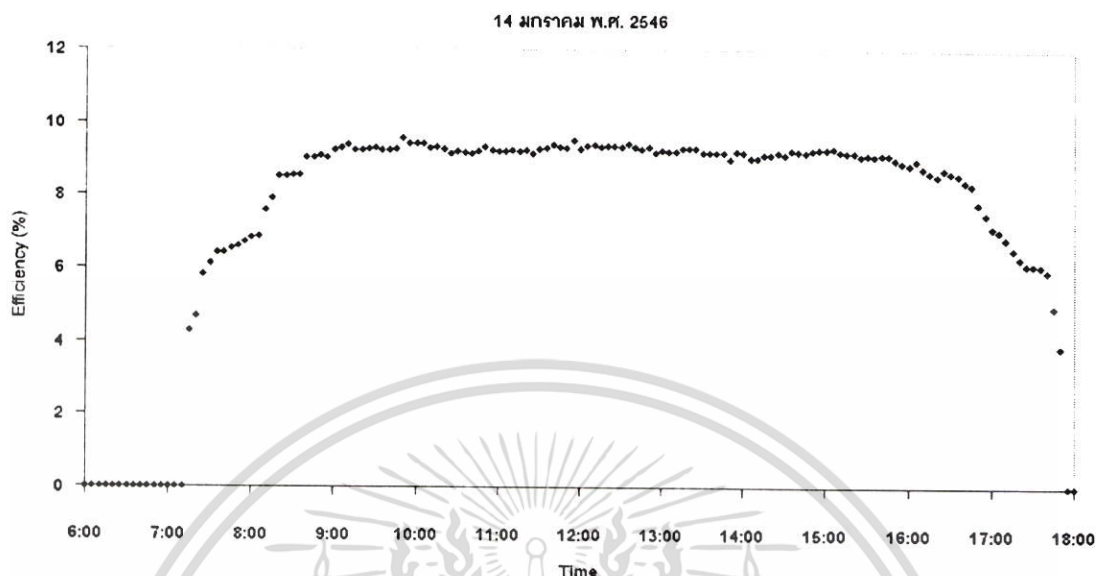


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดพื้นที่  $19.4688 \text{ m}^2$  และค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.9 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้เป็นรูปประฆังคว่ำทั้งสองเส้น เส้นบนคือกราฟของค่าพลังงานแสงที่ได้รับ และเส้นล่างคือกราฟของค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ จะเห็นว่ากราฟของค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับ จะมีค่าสูงกว่ากราฟของค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ค่อนข้างมากในทุกช่วงเวลา โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ  $18,000 \text{ W}$  ในช่วงเวลา 12:00 น. ถึง 13:00 น. ขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ผลิตได้ในช่วงเวลาเดียวกันมีค่าประมาณ  $1,700 \text{ W}$  เท่านั้น หมายความว่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากมานั้น ระบบสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับได้เพียงเล็กน้อย คิดโดยเฉลี่ยไม่ถึง 10% ของพลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวัน

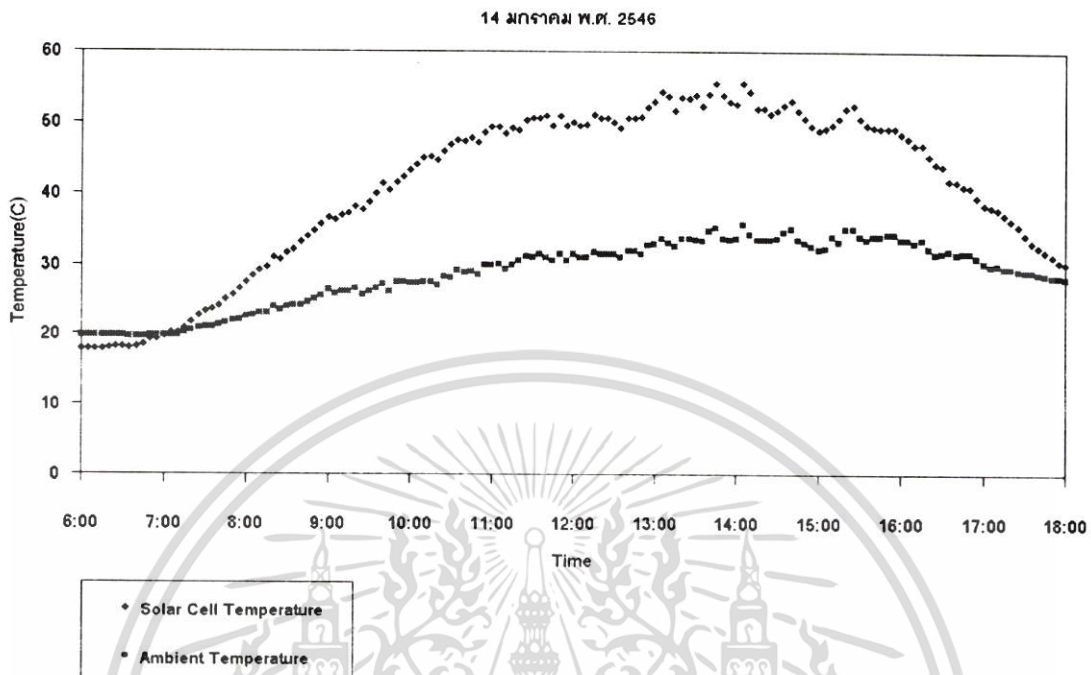


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวัน

จากข้อมูลในกราฟที่ 5.9 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบกับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.10 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าประมาณ 9.3 % ในช่วงเวลาตั้งแต่ 9:00 น. ถึง 16:00 น. แต่จะไม่คงที่ตลอดทั้งวัน ค่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยลง คือในช่วงเวลา 7:00 น. ถึง 9:00 น. และ เวลา 16:00 น. ถึง 18:00 น

ส่วนในช่วงเวลา 6:00 น. ถึง 7:00 น. ที่ค่าประสิทธิภาพเป็นศูนย์ เนื่องจากค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยมาก ทำให้เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาสมการตัวแทนแล้วจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าไม่ถึง 0.97 ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ จึงไม่นำข้อมูลมาคำนวณต่อ และแทนข้อมูลในช่วงนี้ด้วยค่าศูนย์

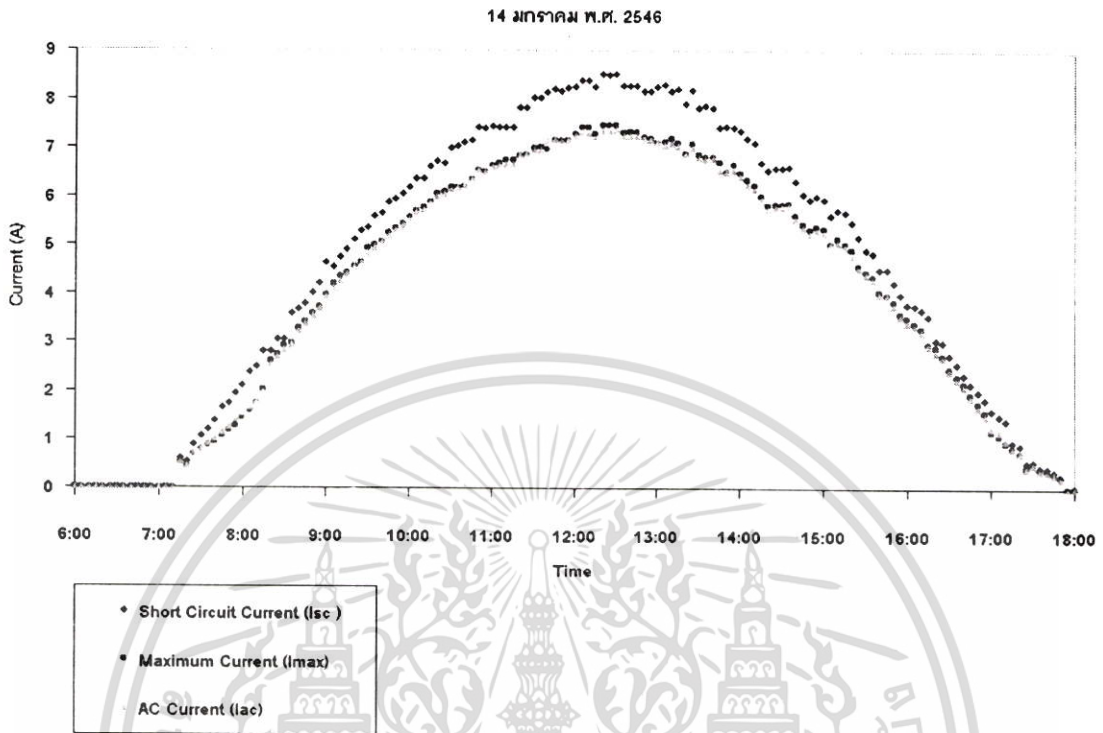
## 5.10 ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศ



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศ

จากการทดลองเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศ ในช่วงเวลา ระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงใน กราฟรูปที่ 5.11 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้จะมีการ เพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิที่สอดคล้องกันตลอดทั้งวัน โดยกราฟเส้นบนคือกราฟค่าอุณหภูมิ ของเซลล์แสงอาทิตย์ และกราฟเส้นล่างคือกราฟค่าอุณหภูมิของอากาศ ในช่วงเวลา 6:00 น. ถึง 7:00 น. ที่ค่าความเข้มแสงมีค่าน้อย ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศจะมีค่า ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ  $20^{\circ}\text{C}$  โดยที่ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่ามากขึ้นในช่วงเวลา 7:00 น. จนถึง 18:00 น. ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสง อาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มากกว่าค่าอุณหภูมิของอากาศ โดยจะมีค่าความแตกต่างของ อุณหภูมิมากขึ้นเมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดวัดได้  $55.5^{\circ}\text{C}$  และค่าอุณหภูมิของอากาศสูงสุดวัดได้  $35.7^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิถึง  $20^{\circ}\text{C}$

## 5.11 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน

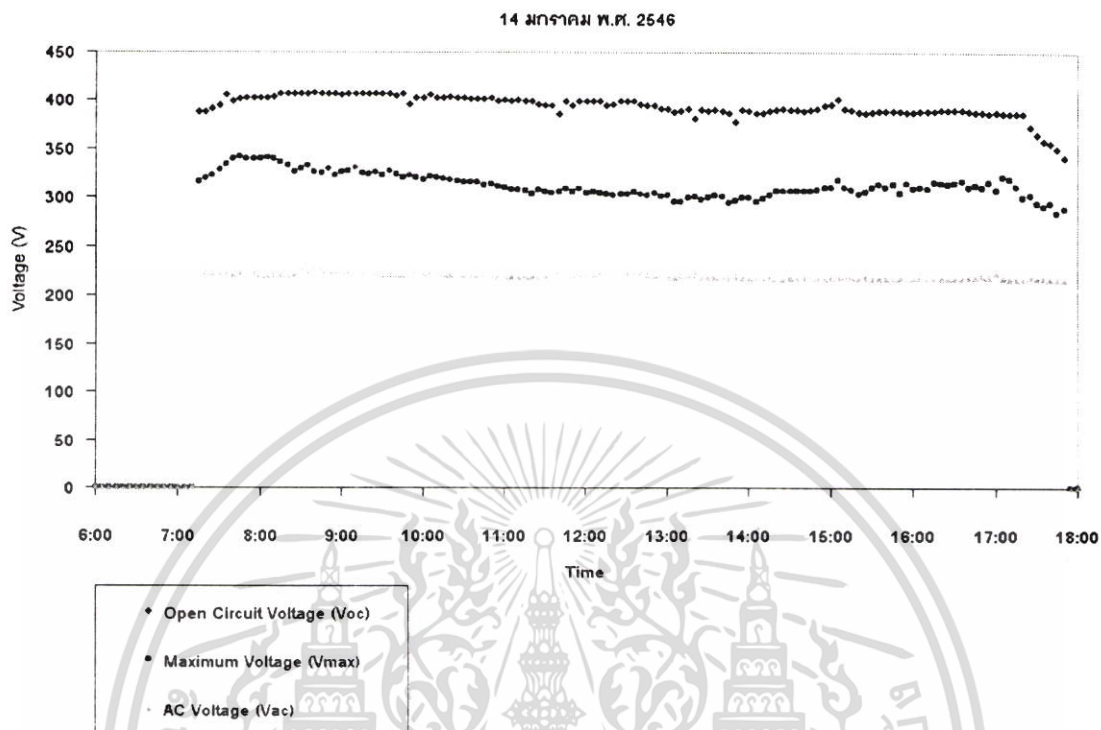


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสสูงสุด และค่ากระแสของไฟกระแสสลับ

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสสูงสุด และค่ากระแสของไฟกระแสสลับที่ผลิตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกันได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.12 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้เป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.5 โดยกราฟเส้นบนสุดคือกราฟของค่ากระแสลัดวงจร (สี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด) และกราฟสองเส้นล่างคือกราฟของค่ากระแสสูงสุด (วงกลม) และค่ากระแสของไฟกระแสสลับ (สามเหลี่ยม) จะเห็นว่ากราฟของค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงกว่ากราฟของค่ากระแสสูงสุด และค่ากระแสของไฟกระแสสลับในทุกช่วงเวลา โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 8.5 A ในขณะที่ค่ากระแสสูงสุด และค่ากระแสของไฟกระแสสลับมีค่าเกือบจะเท่ากันในทุกช่วงเวลา โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 7.4 A

ส่วนในช่วงเวลา 6:00 น. ถึง 7:00 น. ที่ค่าประสิทธิภาพเป็นศูนย์นั้น เป็นเหตุผลเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.9

## 5.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกับระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าแรงดันสูงสุด และค่าแรงดันของไฟกระแสสลับ

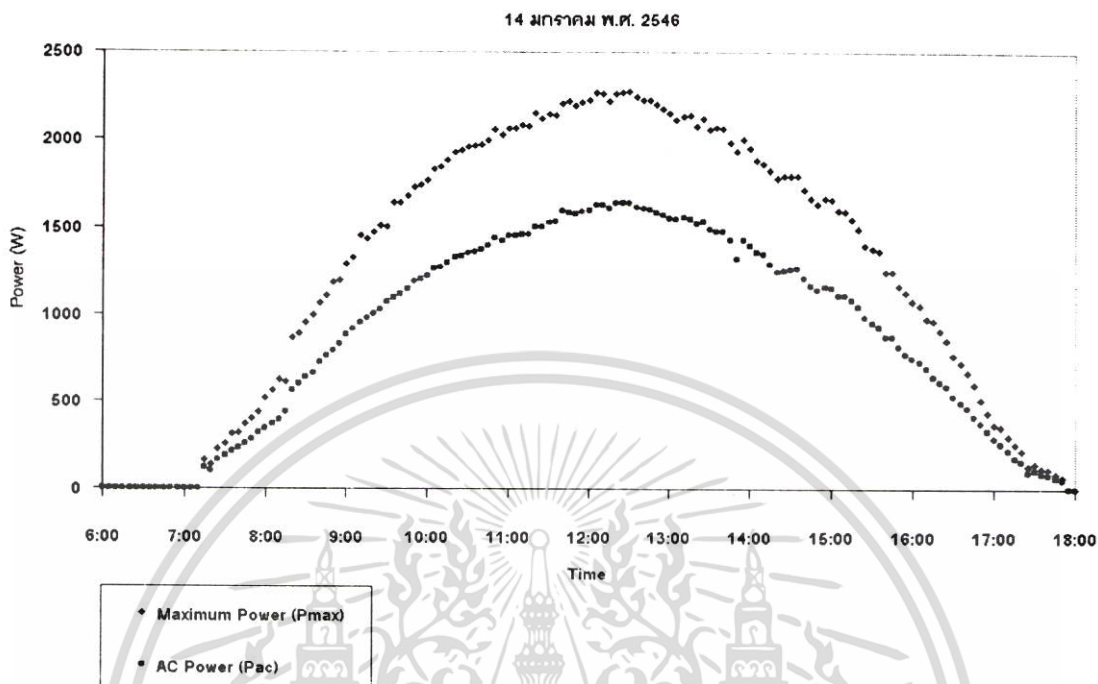
จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าแรงดันสูงสุด และค่าแรงดันของไฟกระแสสลับที่ผลิตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.13 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่า

1) กราฟเส้นบนสุดคือกราฟของค่าแรงดันวงจรเปิด มีค่าประมาณ 400 V ลักษณะของกราฟจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงบ่ายอันเนื่องมาจากค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่าลดลง

2) กราฟเส้นกลางคือกราฟของค่าแรงดันสูงสุด มีค่าอยู่ในช่วง 300 V ถึง 340 V ลักษณะของกราฟจะมีค่าสูงในช่วงเช้าและเย็นที่ค่าความเข้มแสง และค่ากระแสมีค่าน้อย แต่จะมีค่าลดลงในช่วงกลางวันที่มีความเข้มแสง และค่ากระแสมีค่ามาก

3) กราฟเส้นล่างสุดคือกราฟของค่าแรงดันRMS ของไฟกระแสสลับ มีค่าประมาณ 220V ลักษณะของกราฟจะมีค่าคงที่ตลอดทั้งวัน

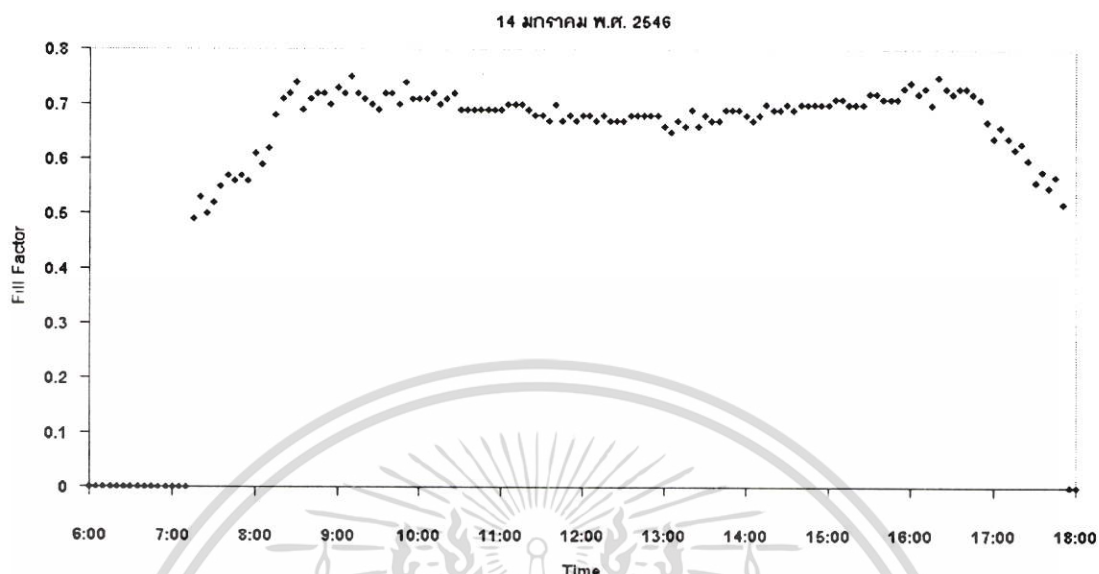
### 5.13 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ กับค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับ

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับที่ผลิตได้ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.14 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟที่ได้เป็นรูปประฆังคว่ำทั้งสองเส้น เส้นบนคือกราฟของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และเส้นล่างคือกราฟของค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับ จะเห็นว่ากราฟค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงกว่ากราฟของค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับในทุกช่วงเวลา โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 2,400 W ในช่วงเวลา 12:00 น. ถึง 13:00 น. ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าของไฟกระแสสลับที่ผลิตได้ในช่วงเวลาเดียวกันมีค่าประมาณ 1,700 W เท่านั้น หมายความว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ เมื่อนำมาแปลงให้เป็นไฟกระแสสลับแล้วค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นไฟกระแสสลับจะมีค่าลดลงประมาณ 30%

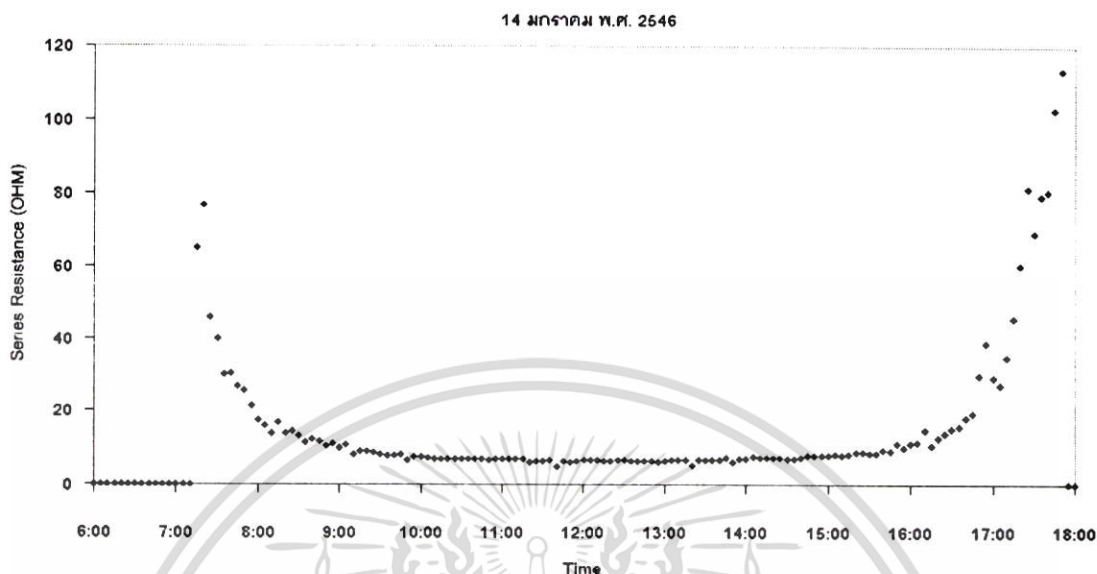
## 5.14 ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงเวลาระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟิลแฟคเตอร์กับเวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.15 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปกราฟมีความคล้ายคลึงกับกราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปที่ 5.9 โดยในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงค่อนข้างมากตั้งแต่ 9:00 น. ถึง 16:00 น. ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.7 แต่ในช่วงเวลา 11:00 น. ถึง 14:00 น. ลักษณะของกราฟจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นช่วงที่มีค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูง ส่วนในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงค่อนข้างน้อย คือในช่วงเวลา 7:00 น. ถึง 9:00 น. และ เวลา 16:00 น. ถึง 18:00 น. ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดต่ำลงเมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยลง

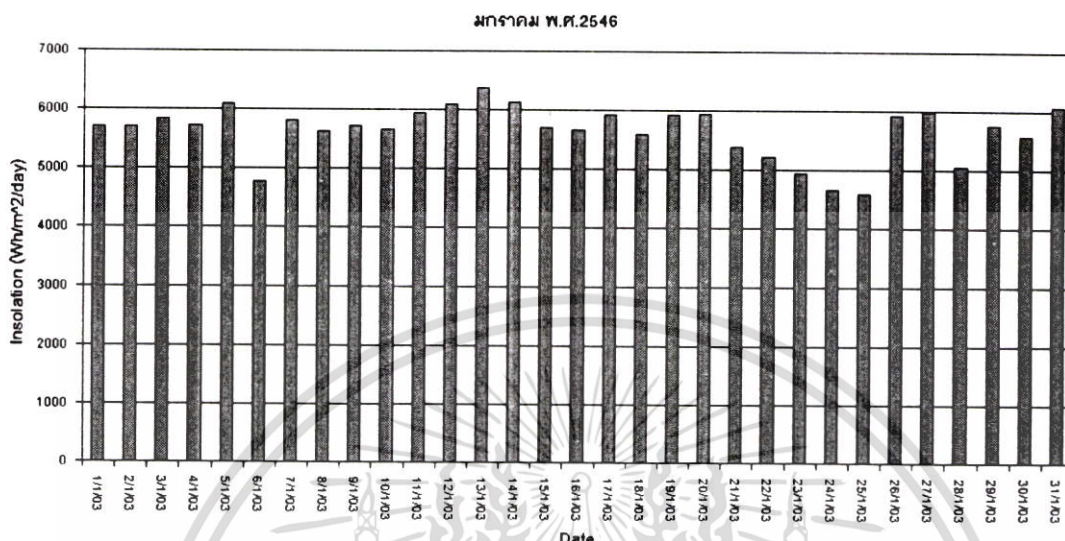
### 5.15 ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ทุกๆ 5 นาที ในหนึ่งวัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงเวลา ระหว่าง 6:00 น. ถึง 18:00 น. นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานอนุกรมกับ เวลา ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.16 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าลักษณะของ รูปกราฟในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงค่อนข้างน้อยตั้งแต่ 7:00 น. ถึง 9:00 น. และเวลา 16:00 น. ถึง 18:00 น. จะมีค่าความต้านทานอนุกรมสูง โดยจะมีค่าสูงมากเมื่อความเข้มแสงมีค่าน้อย และจะมีค่า ลดต่ำลงเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้น ส่วนในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงค่อนข้างมาก คือในช่วง เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. จะมีค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างคงที่ประมาณ 6.5 โอห์ม

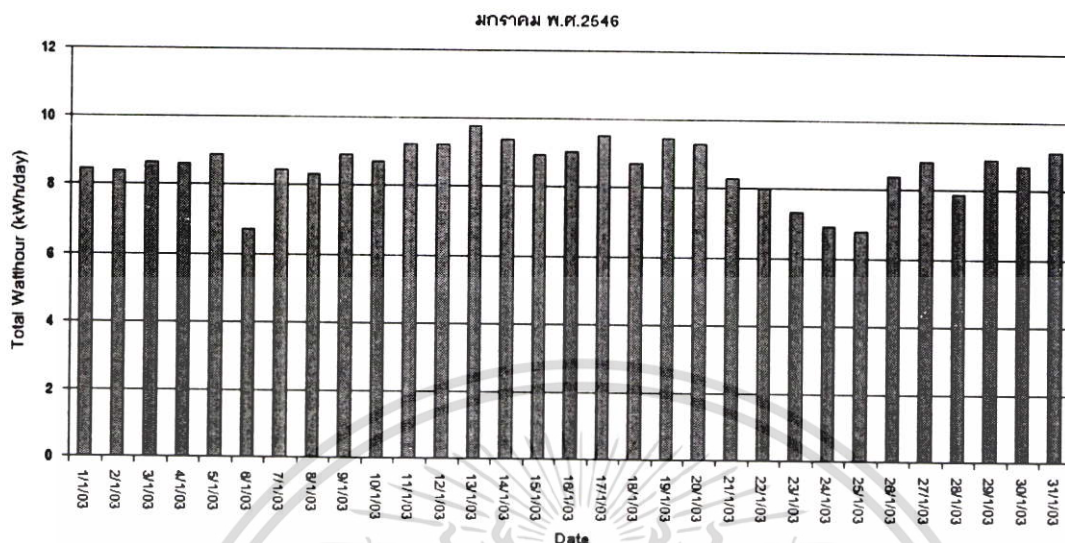
## 5.16 ปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน

จากการทดลองเก็บข้อมูลค่าปริมาณแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันตลอดระยะเวลาหนึ่งเดือน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.17 จากกราฟความสัมพันธ์จะแสดงด้วยกราฟแท่งเพื่อให้ง่ายในการเปรียบเทียบ จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีค่าไม่คงที่ในแต่ละวัน จะมีค่ามากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับปริมาณเมฆที่มีในแต่ละวัน ถ้าวันใดมีปริมาณเมฆน้อยก็จะทำให้ค่าปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามาก ดังตัวอย่างในวันที่ 12 ถึงวันที่ 14 ซึ่งเป็นช่วงที่ท้องฟ้าไม่มีเมฆ ทำให้ปริมาณแสงแดดที่วัดได้มีค่ามากกว่า 6,000 Wh/m<sup>2</sup>/day ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างมาก แต่ถ้าวันใดมีปริมาณเมฆมากก็จะทำให้ค่าปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย ดังตัวอย่างในวันที่ 23 ถึงวันที่ 25 ซึ่งเป็นช่วงที่ท้องฟ้ามีเมฆมากทำให้ปริมาณแสงแดดที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า 5,000 Wh/m<sup>2</sup>/day ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างน้อย แต่เมื่อนำค่าปริมาณแสงแดดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยทั้งเดือนจะพบว่าค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยต่อวันของเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 จะมีค่า 5,516.46 Wh/m<sup>2</sup>/day

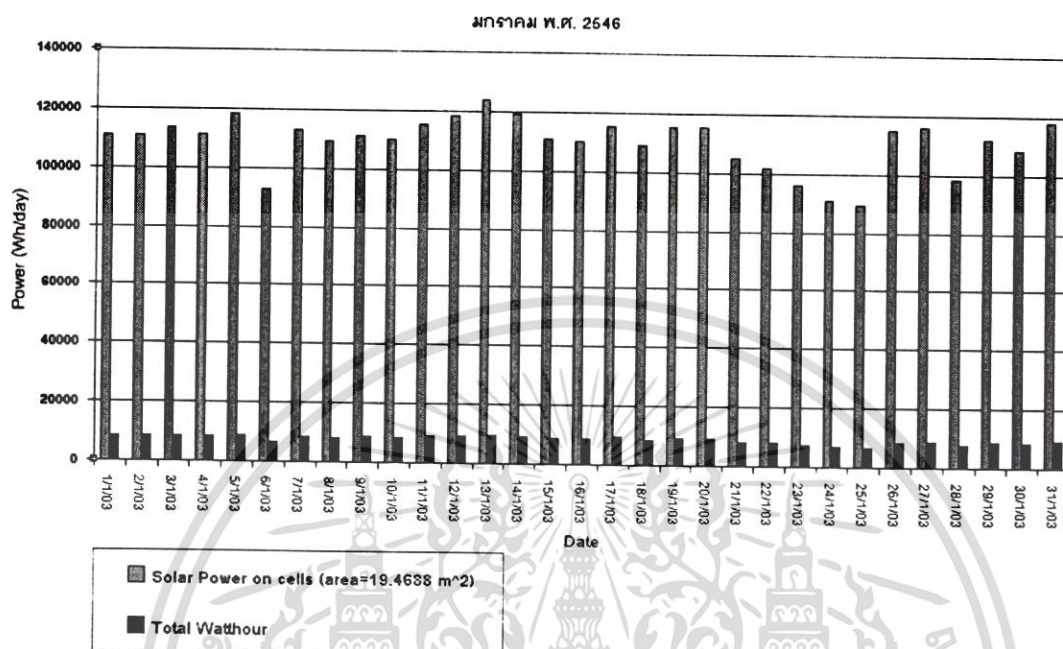
## 5.17 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน

จากการทดลองเก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.18 จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะมีค่ามากหรือน้อยสอดคล้องกับกราฟปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันในรูปที่ 5.17 เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตามปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ดังตัวอย่างในวันที่ 12 ถึง วันที่ 14 ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณแสงแดดมีค่ามากกว่า  $6,000 \text{ Wh/m}^2/\text{day}$  จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงถึง  $9 \text{ kWh/day}$  ส่วนในช่วงที่ปริมาณแสงแดดมีค่าน้อย ดังตัวอย่างในวันที่ 23 ถึงวันที่ 25 ที่มีปริมาณแสงแดดน้อยกว่า  $5,000 \text{ Wh/m}^2/\text{day}$  จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเพียง  $7 \text{ kWh/day}$  เมื่อนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยทั้งเดือนจะพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวันของเดือนมกราคม พ.ศ. 2566 จะมีค่าประมาณ  $8.35 \text{ kWh/day}$

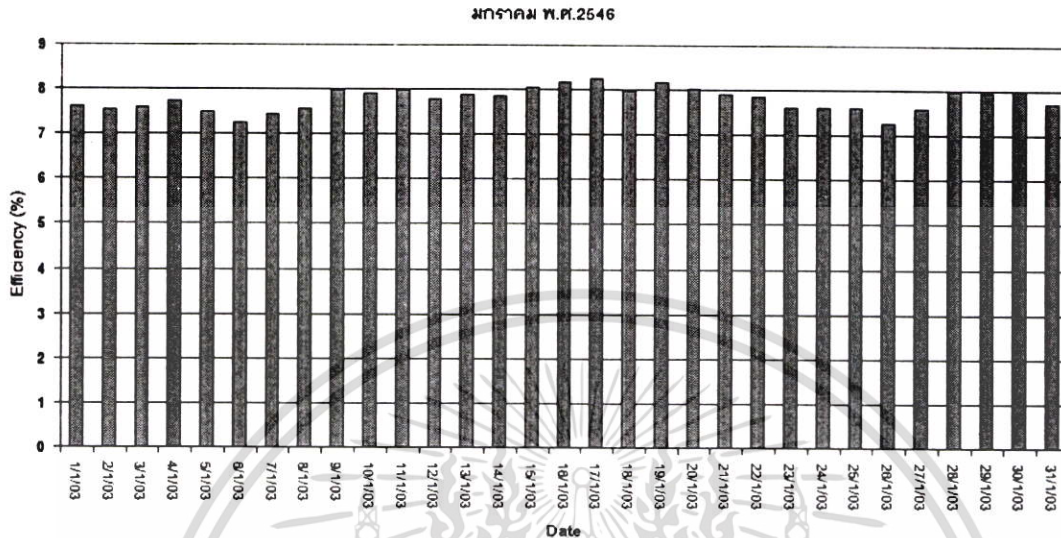
## 5.18 ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน

จากการทดลองเก็บข้อมูลของค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดพื้นที่  $19.4688 \text{ m}^2$  และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันตลอดหนึ่งเดือน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.19 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่ารูปกราฟของค่าพลังงานแสงจะมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ค่อนข้างมากในทุกๆวัน โดยค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงที่ได้รับจะมีค่าสูงกว่า  $100,000 \text{ Wh/day}$  ในขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าไม่ถึง  $10,000 \text{ Wh/day}$  หมายความว่าระบบสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อย คิดโดยเฉลี่ยไม่ถึง 10 % ของพลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมด

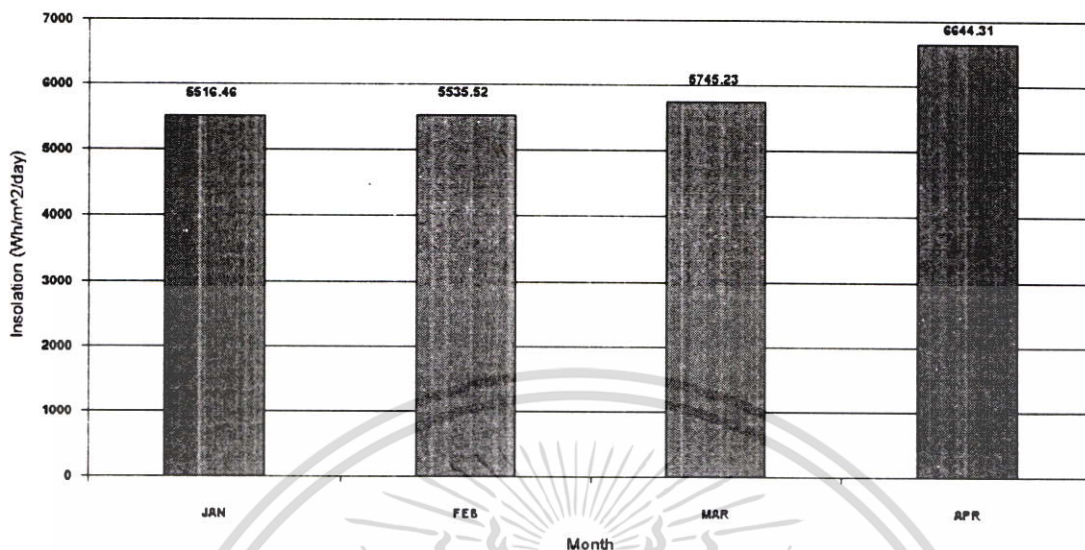
### 5.19 ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน ตลอดหนึ่งเดือน

จากข้อมูลในกราฟที่ 5.19 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.20 จากกราฟความสัมพันธ์สามารถสังเกตเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าไม่คงที่ในแต่ละวัน โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7 % ถึง 8 % เมื่อนำค่าประสิทธิภาพของระบบมาหาค่าเฉลี่ยทั้งเดือนจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยของเดือนมกราคม พ.ศ. 2546 จะมีค่าประมาณ 7.76 %

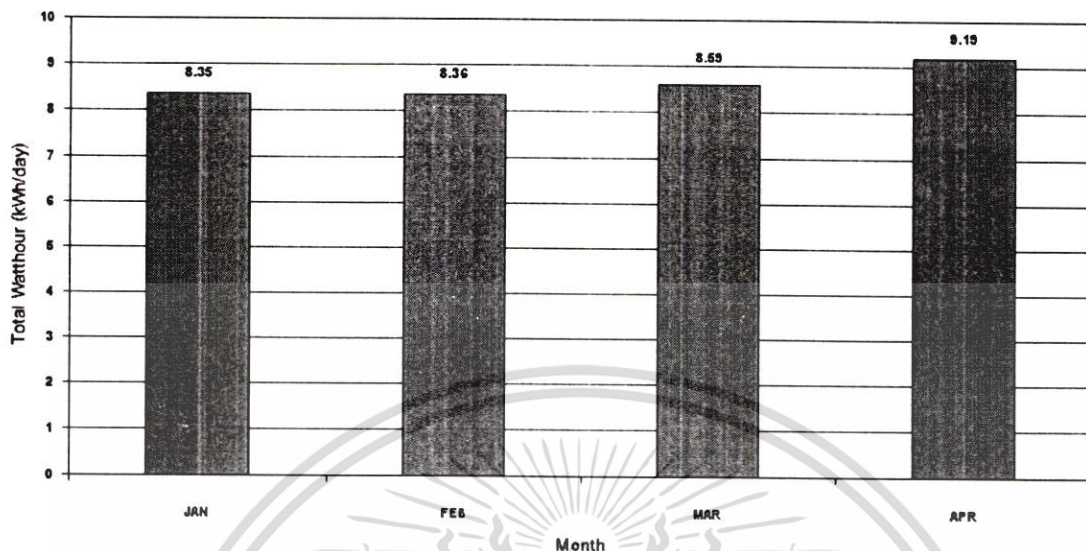
## 5.20 ค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าปริมาณแสงแดด โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลของปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.20 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าในเดือนมกราคมมีค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดวันละ 5,516.46 Wh/m<sup>2</sup>/day เดือนกุมภาพันธ์มีค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยเกือบจะเท่ากับเดือนมกราคม โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 5,535.52 Wh/m<sup>2</sup>/day เดือนมีนาคมค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยจะสูงขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 5,745.23 Wh/m<sup>2</sup>/day และเดือนเมษายนค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยจะสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 6,644.31 Wh/m<sup>2</sup>/day ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลจากฤดูหนาวที่มีช่วงกลางวันสั้นและกลางคืนยาว มาเป็นฤดูร้อนที่มีช่วงกลางวันยาวและกลางคืนสั้น ทำให้ค่าปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยที่ได้ในฤดูร้อนมีค่าสูงกว่าในฤดูหนาว

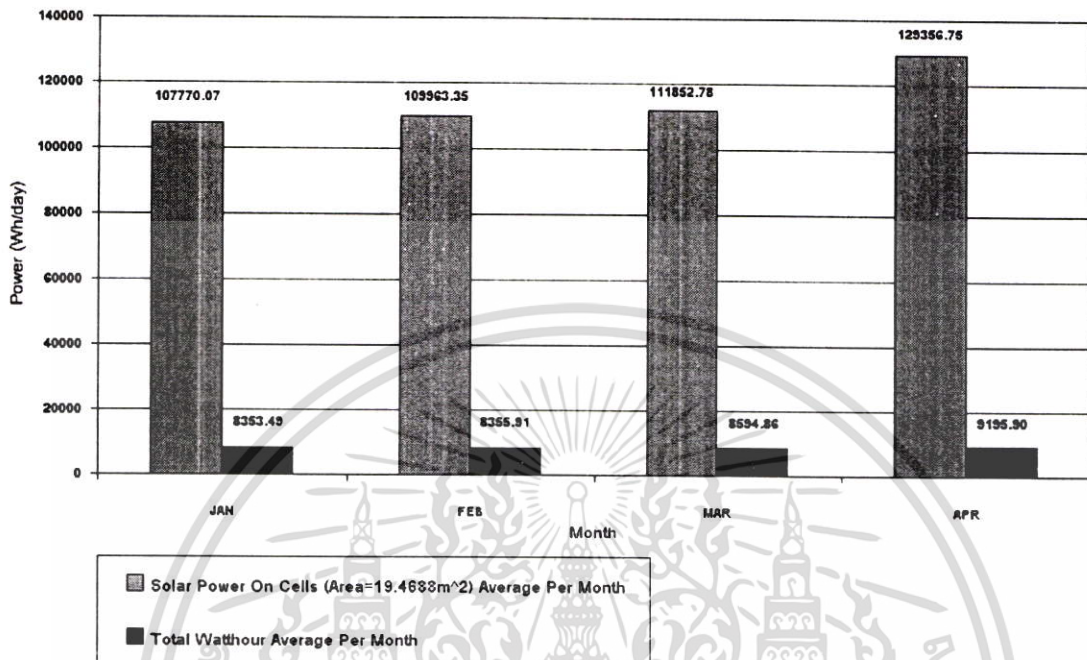
## 5.21 ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.22 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละเดือนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละเดือน ในเดือนมกราคม และกุมภาพันธ์ มีค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 8.35 kWh/day และ 8.36 kWh/day ตามลำดับ ในเดือนมีนาคมค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 8.59 kWh/day และเดือนเมษายนค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยวันละ 9.19 kWh/day ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแสงแดดโดยเฉลี่ยที่ได้ในฤดูร้อนมีค่าสูงกว่าในฤดูหนาว จึงทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยในฤดูร้อนมีค่ามากกว่าในฤดูหนาว เช่นกัน

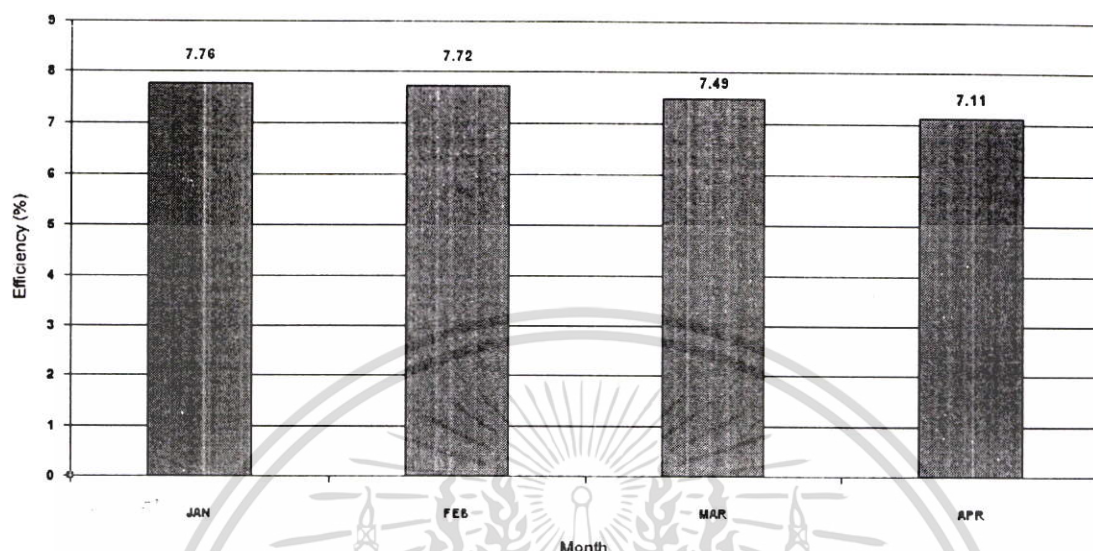
## 5.22 ค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับโดยเฉลี่ยต่อวัน เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่าพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ โดยเฉลี่ยต่อวัน เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยต่อวันในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลของค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดพื้นที่  $19.4688 \text{ m}^2$  และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวันนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.23 จากกราฟเมื่อนำค่าที่เพิ่มขึ้นของพลังงานแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละเดือน มาเปรียบเทียบกับค่าที่เพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละเดือน จะพบว่าพลังงานแสงและพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่เป็นสัดส่วนกัน กล่าวคือค่าพลังงานแสงโดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าลดลงในแต่ละเดือน ดังแสดงในหัวข้อ 5.23

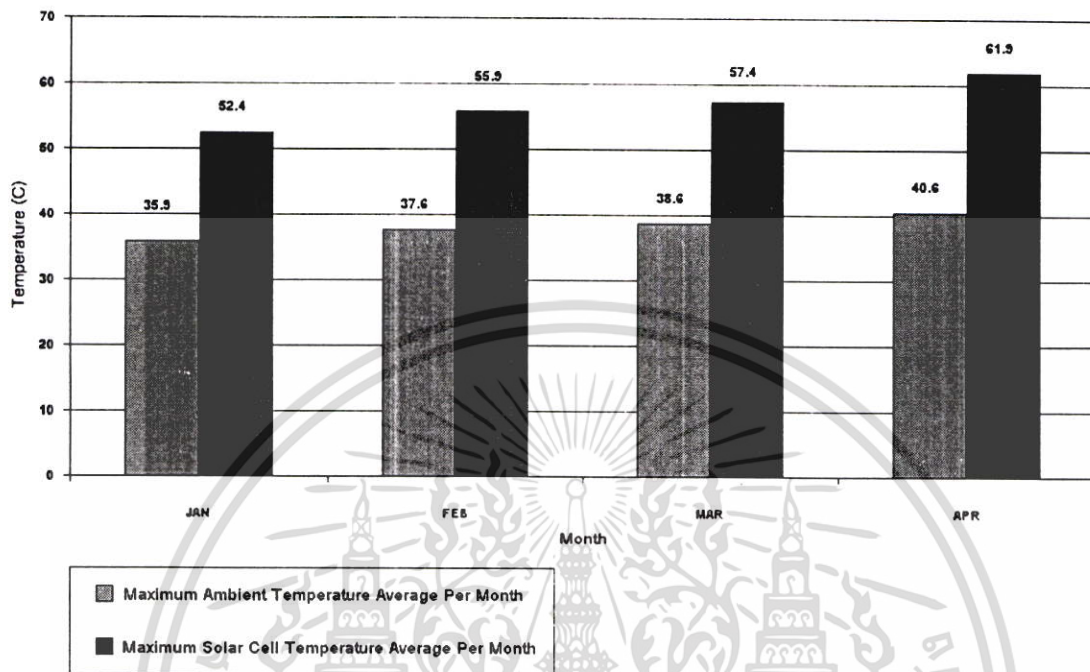
### 5.23 ค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลค่าประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.24 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนจะมีค่าลดน้อยลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแสงแดดเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละเดือน โดยในเดือนมกราคม และกุมภาพันธ์ มีค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกันมาก อยู่ที่วันละ 7.76 % และ 7.72 % ตามลำดับ ในเดือนมีนาคมค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยจะลดลงเล็กน้อย อยู่ที่วันละ 7.49 % และเดือนเมษายนค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำที่สุด อยู่ที่วันละ 7.11 % การที่ปริมาณแสงแดด และค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มมากขึ้นในฤดูร้อน แต่ค่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยกลับมีค่าลดน้อยลง เนื่องมาจากค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในหัวข้อ 5.24

## 5.24 ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศโดยเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลของค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศที่วัดได้ในแต่ละวันนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.25 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศโดยเฉลี่ยต่อวันในเดือนมกราคมจะมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 52.4 °C และ 35.9 °C ตามลำดับ ในเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม และเมษายน ค่าอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสูงสุดของอากาศโดยเฉลี่ยต่อวันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 55.9 °C และ 37.6 °C ในเดือนกุมภาพันธ์ มีค่าเฉลี่ยที่ 57.4 °C และ 38.6 °C ในเดือนมีนาคม และมีค่าเฉลี่ยที่ 61.9 °C และ 40.6 °C ในเดือนเมษายน ตามลำดับ จากค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลง

## บทที่ 6

### บทสรุปและแนวทางในการพัฒนา

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานการออกแบบ และพัฒนาโมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน รวมถึงผลการทดสอบโมดูลที่ได้พัฒนาขึ้น ในส่วนท้ายของบทนี้ได้เสนอข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนา เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต

#### 6.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาโมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก

1. หลักการในการหาค่าพารามิเตอร์ ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกทำได้โดยการวัดค่ากระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ ขนาดแอมป์ลิจูดของสัญญาณจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล 10 บิต และบันทึกลงในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นทำการคำนวณประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังหก เพื่อหาสมการตัวแทนของกราฟ I-V จากสมการตัวแทนที่ได้นี้สามารถหาค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าฟิลแฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรม ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้นี้จะถูกบันทึกพร้อมกับค่าอุณหภูมิ และความเข้มแสงลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 5 นาที เพื่อเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบโฟโตโวลตาอิกต่อไป

2. ในการหาสมการตัวแทนของกราฟ I-V ด้วยการคำนวณประมาณค่ากำลังสองต่ำสุดโดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังหก ทำได้โดยการแก้สมการ

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} \\ \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} & \sum x^{11} & \sum x^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \\ \sum x^3 y \\ \sum x^4 y \\ \sum x^5 y \\ \sum x^6 y \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า  $n$  ในสมการคือจำนวนข้อมูลที่นำมาคำนวณ ค่า  $x$  ในสมการคือค่าแรงดัน และค่า  $y$  ในสมการคือค่ากระแส

วิธีการแก้สมการจะใช้กฎของครเมอร์เพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $a_6$  จะได้สมการตัวแทนของกราฟ I-V อยู่ในรูป

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 \quad (6.2)$$

จากสมการตัวแทนที่ได้นี้จะต้องนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเสียก่อน เพื่อทดสอบว่าสมการตัวแทนที่ได้ี้มีความใกล้เคียงกับค่าของข้อมูลดิบมากน้อยเพียงใด ซึ่งถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากกว่าเท่ากับ 0.97 ก็จะถือว่าสมการตัวแทนที่ได้ี้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลดิบ และจะใช้สมการตัวแทนนี้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกต่อไป

3. ส่วนประกอบของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ (1) โมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงแดด (2) โมดูลวัดสัญญาณ I-V และ (3) สลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ แต่ละส่วนจะทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยโมดูลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงจะทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิของอากาศจากหัววัดอุณหภูมิ DS1820 และวัดค่าความเข้มแสงแดดจากไพราโนมิเตอร์ ข้อมูลทั้งหมดนี้จะถูกส่งต่อไปให้กับโมดูลวัดสัญญาณ I-V ผ่านทางบัส RS-485 ในส่วนของโมดูลวัดสัญญาณ I-V จะทำหน้าที่วัดค่ากระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ และยังทำหน้าที่วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากมาตรวัดกำลังไฟฟ้า แล้วส่งข้อมูลที่ได้ทั้งหมดให้กับสลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ผ่านทางพอร์ตขนานของเครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนของสลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์เมื่อได้รับข้อมูลแล้วจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิก และบันทึกลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์

4. ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิก ที่ถูกบันทึกลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆ 19 ข้อมูล อันได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้ารวม ค่าความเข้มแสงแดด ค่าปริมาณแสงแดดรวม ค่าพลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิของอากาศ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากระแสสูงสุด ค่าแรงดันสูงสุด ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสRMS ค่าแรงดันRMS ค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าฟิลแฟคเตอร์ ค่าความต้านทานอนุกรม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดลองจะทำได้โดยทำให้ระบบทำการวัด และบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิก ทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 6.00 น. จนถึง 18.00 น. ของทุกวัน โดยมีการรายงานผลทางจอมอนิเตอร์ของตัวลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์ ทุกๆ 5 นาที และเนื่องจากลินุกซ์เซิร์ฟเวอร์นั้นเชื่อมต่ออยู่กับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จึงสามารถที่จะดูข้อมูลนี้ได้จากทุกที่ โดยเข้าไปที่ <http://161.246.45.243> ค่าข้อมูลที่เก็บได้ตลอดทั้งวันจะถูกเก็บเป็นเท็กซ์ไฟล์ (\*.txt) โดยชื่อของไฟล์ข้อมูลจะถูกตั้งให้เป็นชื่อเดียวกับวันที่ของวันนั้นๆ จากการทดลองเบื้องต้นได้ทำการเก็บบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาสี่เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2546

6. จากการทดลองเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาสี่เดือน ได้นำข้อมูลของปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ข้อมูลของค่าประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวัน และข้อมูลของค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันมาหาค่าเฉลี่ยต่อวัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.24

จากข้อมูลที่ได้พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากเดือนมกราคม ( $5.516.46 \text{ Wh/m}^2/\text{day}$ ) ไปจนถึงเดือนเมษายน ( $6.644.31 \text{ Wh/m}^2/\text{day}$ ) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละเดือนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากเดือนมกราคม ( $8.35 \text{ kWh/day}$ ) ไปจนถึงเดือนเมษายน ( $9.19 \text{ kWh/day}$ ) เช่นเดียวกัน แต่เมื่อดูถึงค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยในแต่ละเดือนจะพบว่า ค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าลดลงจากเดือนมกราคม (7.76 %) ไปจนถึงเดือนเมษายน (7.11 %) สาเหตุเนื่องมาจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นจากเดือนมกราคม ( $52.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ไปจนถึงเดือนเมษายน ( $61.9 \text{ }^\circ\text{C}$ )

7. ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของระบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.3 จากการทดลองจะพบว่าเมื่อค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าลดลงประมาณ  $1.72 \text{ V}$  และเมื่อค่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าลดลงไปด้วยซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปถึงค่าประสิทธิภาพของระบบที่ลดลง

## 6.2 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไข

1. ปัญหาหลักที่พบในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาโมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิกก็คือการคำนวณเพื่อหาสมการตัวแทนของกราฟ I-V ซึ่งใช้สมการ (6.1) ในการคำนวณ เพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $a_6$  จากสมการจะเห็นว่าค่า  $x$  ในสมการ จะเป็นผลรวมของค่า  $x$  ยกกำลังค่าต่างๆ ซึ่งมีค่ามากที่สุดคือยกกำลัง 12 เมื่อแทนค่า  $x$  ในสมการด้วยค่าแรงดันที่ได้จากข้อมูลดิบซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-400 V จะได้ข้อมูลที่มีค่าตัวเลขจำนวนมาก ซึ่งเมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต มาทำการคำนวณจะทำให้ค่าที่ได้มีค่าไม่ถูกต้อง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์ วิธีการแก้ปัญหาก็คือการส่งข้อมูลดิบที่ต้องการคำนวณไปให้กับตัวสัญญาณซีพียูซึ่งใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 32 บิต ทำการคำนวณแทน จึงได้ค่าคำตอบที่มีความละเอียด และถูกต้อง

2. ปัญหาการระบายความร้อนให้กับฮีทซิงค์ของตัวอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากตัว IGBT ของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไหลผ่านในตอนกลางวันจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น เพื่อลดความร้อนของตัว IGBT ลง จึงติดตัว IGBT ไว้บนฮีทซิงค์ขนาดใหญ่ แล้วใช้พัดลมเป่าเพื่อระบายความร้อนอีกครั้งหนึ่ง ในการทดลองช่วงแรกๆ ได้ต่อสวิตช์ไฟสำหรับเปิดปิดพัดลมเพื่อเปิดระบายความร้อนในตอนกลางวัน และปิดในตอนกลางคืน แต่เกิดความไม่สะดวกขึ้นเนื่องจากการทดลองเก็บข้อมูลนั้นจะทำอย่างต่อเนื่องทุกวัน ซึ่งไม่เหมาะที่จะมาเปิดปิดพัดลมในทุกๆวัน จึงได้เปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟให้กับพัดลมเสียใหม่ โดยการต่อขานานมาจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผง ซึ่งจะได้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V มาต่อเข้ากับพัดลมที่ใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V ก็จะได้พัดลมระบายอากาศที่ทำงานเองเมื่อมีแสงแดดในตอนเช้า และจะหยุดทำงานเองเมื่อไม่มีแสงแดดในตอนเย็น

### 6.3 แนวทางวิจัยและพัฒนาในอนาคต

1. จากบทสรุปในหัวข้อ 6.1 ข้อที่ 6 และ 7 พบว่าค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ดังนั้นถ้าเราสามารถลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันลงได้ ก็น่าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งวิธีการลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์อาจทำได้โดยการทำระบบท่อน้ำวิ่งผ่านด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่วิ่งในท่อจะไปดึงเอาความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการช่วยลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลง ส่วนน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นไปจะถูกเก็บไว้ในถังพักเพื่อเก็บไว้ใช้ประโยชน์เป็นน้ำอุ่นต่อไป

แต่เนื่องจากการคั่นน้ำผ่านระบบท่อน้ำจำเป็นต้องใช้ปั๊มน้ำซึ่งต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงต้องทำการคำนวณว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นมานั้น สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากน้อยเพียงใด ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำก็ไม่คุ้มค่าที่จะติดตั้งระบบนี้ แต่ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ ก็มีความคุ้มค่าที่จะติดตั้งระบบนี้ เพราะนอกจากจะได้ใช้ประโยชน์จากน้ำอุ่นแล้ว การที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่อุณหภูมิต่ำน่าจะเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานมากยิ่งขึ้น ซึ่งในเรื่องนี้ควรจะได้มีการทำการทดลองต่อไป

2. จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.4 พบว่าค่าความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุดเมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเพื่อให้รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดตลอดทั้งวัน จึงต้องทำการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ จากทิศตะวันออก ไปยังทิศตะวันตกในแต่ละวัน ซึ่งน่าจะส่งผลให้ปริมาณแสงแดดที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับมีค่าเพิ่มมากขึ้น และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็น่าจะมีค่ามากขึ้นด้วยในแต่ละวัน

แต่เช่นเดียวกัน การที่จะหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้นั้นจำเป็นต้องใช้มอเตอร์ซึ่งต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้น จึงต้องทำการคำนวณว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นมานั้นมีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในเรื่องนี้ควรจะได้มีการทำการทดลองต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Sirichote, W. Tantraporn, and N. Saengkaew. **Apparatus and Method for Providing Supplemental Alternating Current from a Solar Cell Array.** US Patent no. 5898585, April 27, 1999.
- [2] R. J. Van Overstraeten and R. P. Mertens. 1986. **Physics, Technology and Use of Photovoltaics.** Bristol : Adam Hilger Ltd.
- [3] France Lasnier. and Tony Gan Ang. 1990. **Photovoltaic Engineering Handbook.** Bristol : Adam Hilger Ltd.
- [4] Dieter K. Schroder. 1990. **Semiconductor Material and Device Characterization.** Singapore : John Wiley & Sons.
- [5] Roger Messenger. and Jerry Ventre. 2000. **Photovoltaic systems engineering.** Boca Raton : CRC Press.
- [6] Rouschenbach, H.S. 1980. **Solar cell array design handbook.** New York : Van Nostrand Reinhold.
- [8] Chenming Hu. and Richard M. White. 1983. **Solar cells : from basics to advanced systems.** New York : McGraw-Hill.
- [9] Rufus P. Turner. 1977. **Solar cells and photocells.** Indianapolis : Howard W. Sams.
- [10] Larry D. Partain. 1995. **Solar cells and their applications.** New York : John Wiley & Sons.
- [11] Terrence J. Akai. 1994. **Applied Numerical Methods for Engineers.** Singapore : John Wiley & Sons.
- [12] ยุทธ อัครมาศ. 2530. **ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์. 2536. **แคลคูลัส และเรขาคณิตวิเคราะห์ 2.** กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [14] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2540. **ศัพท์เทคนิควิศวกรรม-อิเล็กทรอนิกส์.** พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] W. Tantraporn. 1996. "Production of AC Electricity from Solar-Photovoltaic Negative Conductance." **TDO Quarterly.** Vol.5 No2. : 34-37.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] W. Tantraporn. 1997. "Photo-Voltaic Negative Conductance in AC City Grid." **TDO Quarterly**. Vol.6 No1. : 37-39.
- [17] Band Diagram for an Illuminated PN Junction, "<http://www.cooper.edu/engineering/projects/gateway/ee/solar/solar.html>".
- [18] I-V Characteristic, "<http://aurora.crest.org/pv/cells/operation/>".



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



US005898585A

# United States Patent [19]

Sirichote et al.

[11] Patent Number: 5,898,585

[45] Date of Patent: Apr. 27, 1999

[54] APPARATUS AND METHOD FOR PROVIDING SUPPLEMENTAL ALTERNATING CURRENT FROM A SOLAR CELL ARRAY

5,719,758 2/1998 Nakata et al. .... 363/132

### FOREIGN PATENT DOCUMENTS

4126353C1 1/1993 Germany ..... H02M 7/515  
63-124771 5/1988 Japan ..... H02M 7/48

[75] Inventors: Wichit Sirichote; Wirojana Tantraporn; Narong Saengkaew, all of Bangkok, Thailand

Primary Examiner—Jeffrey Sterrett  
Attorney, Agent, or Firm—Blakely, Sokoloff, Taylor & Zafman

[73] Assignee: Premier Global Corporation, Ltd., Bangkok, Thailand

### [57] ABSTRACT

[21] Appl. No.: 08/865,228

[22] Filed: May 29, 1997

[51] Int. Cl.<sup>6</sup> ..... H02M 7/48

[52] U.S. Cl. .... 363/132; 363/95; 363/136

[58] Field of Search ..... 363/17, 35, 132, 363/136, 95, 96, 98

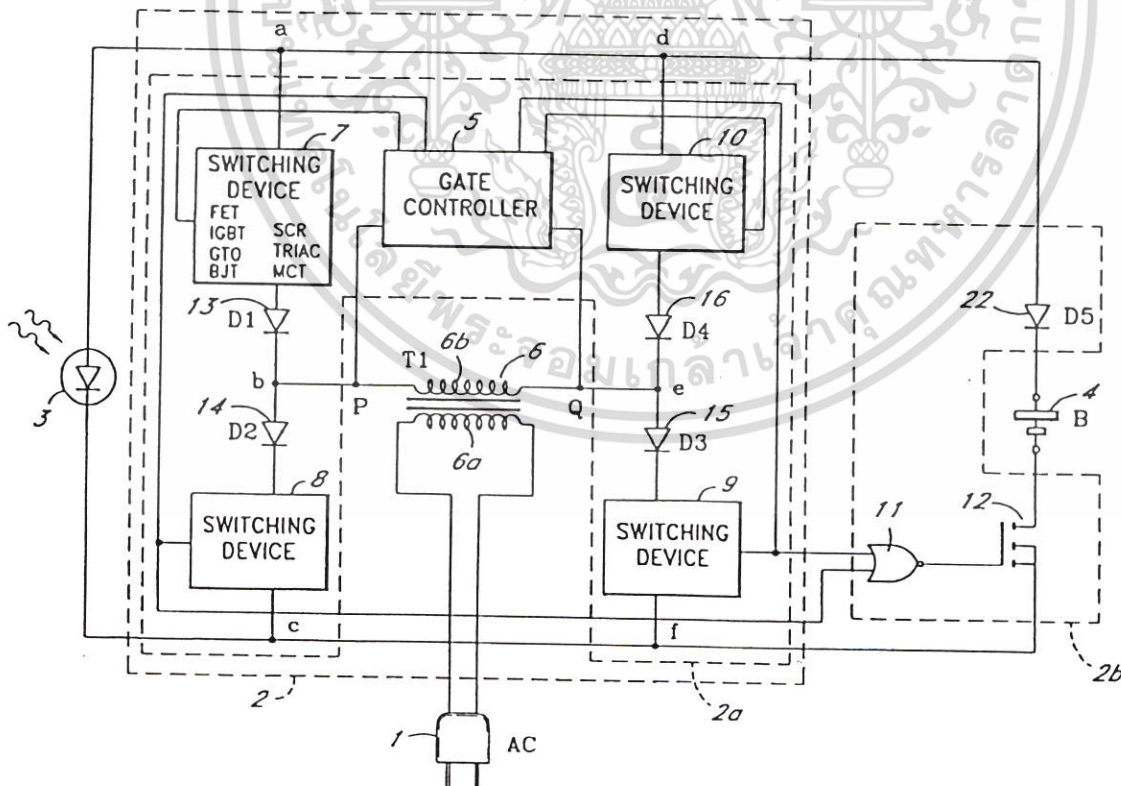
A novel solar inverter circuit is used to connect a solar photovoltaic (PV) array with an alternating current (AC) voltage source to convert direct current (DC) power from the PV array to AC power. The solar inverter circuit employs the current-voltage (I-V) characteristic of the PV or solar cell, and an H-Bridge circuit with gate controller. The gate controller synchronizes the H-bridge with the AC voltage source. The PV array and the solar inverter circuit can plug directly into a residential AC plug and provides electrical power as a supplementary AC supply. Electrical energy required by the home appliances is supplied by the municipal AC line and solar energy concurrently. Advantages of the solar inverter circuit of the present invention include the flexibility of using the solar inverter circuit with any number of solar cell panels through the implementation of an impedance transformer, and the implementation of an additional, optional output for DC battery charging.

### [56] References Cited

#### U.S. PATENT DOCUMENTS

3,946,242	3/1976	Wilkerson	363/136
4,445,049	4/1984	Steigerwald	363/136
4,680,690	7/1987	Dickerson	363/97
5,268,832	12/1993	Kandatsu	363/95
5,493,485	2/1996	Okado	363/56
5,625,539	4/1997	Nakata et al.	363/17
5,668,713	9/1997	Eguchi et al.	363/95
5,677,833	10/1997	Bingley	363/132

33 Claims, 6 Drawing Sheets



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

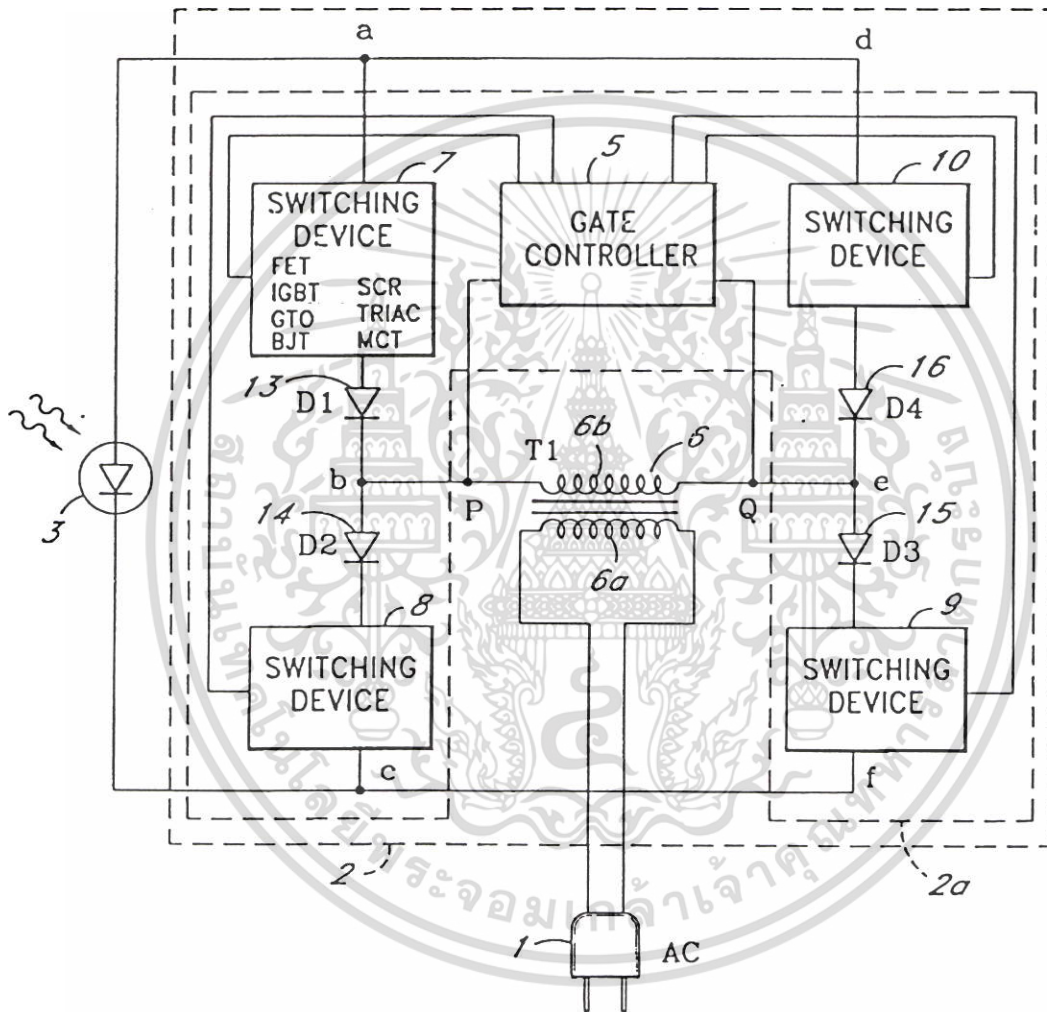
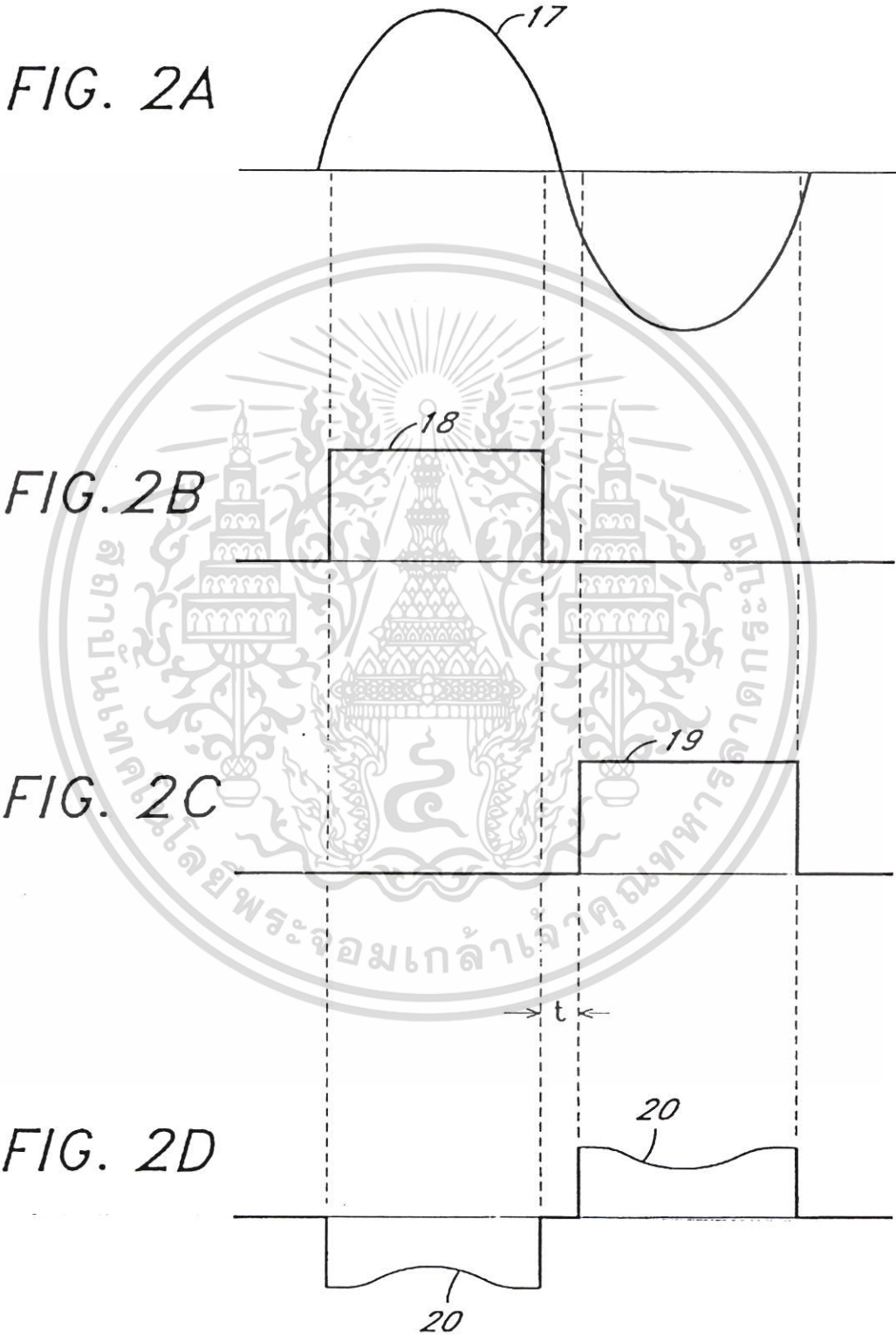


FIG. 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

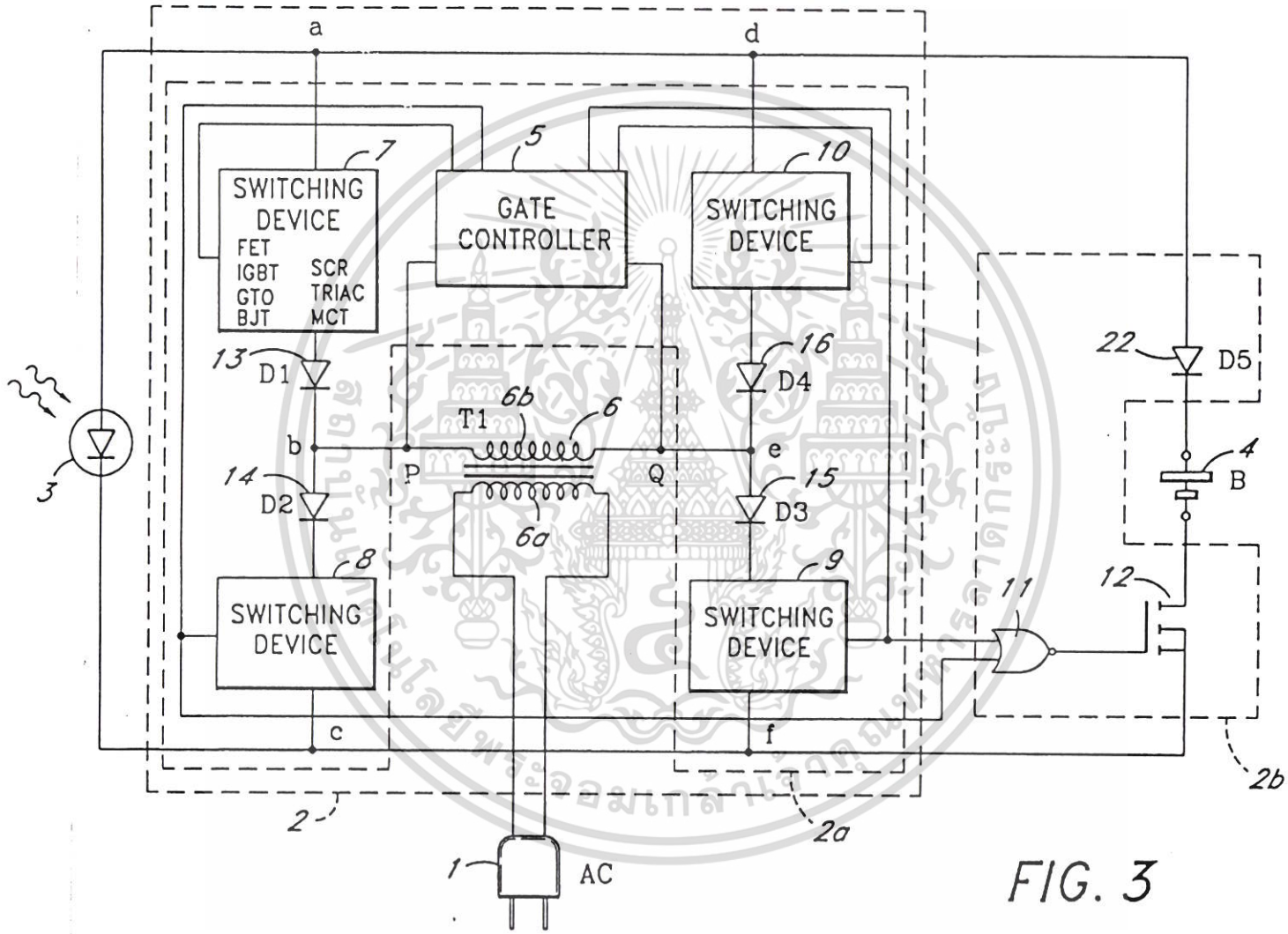
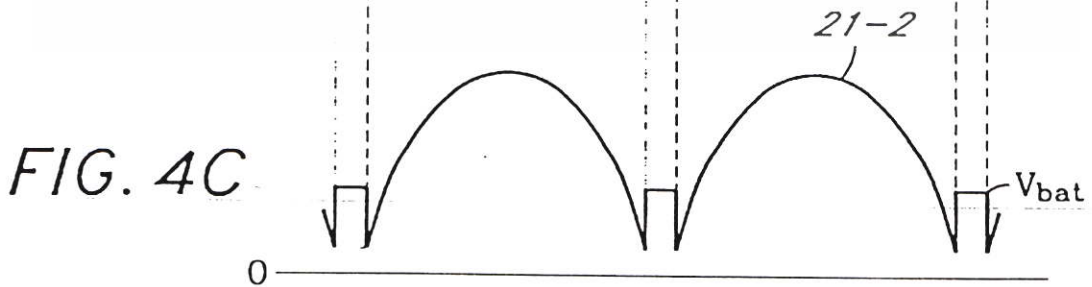
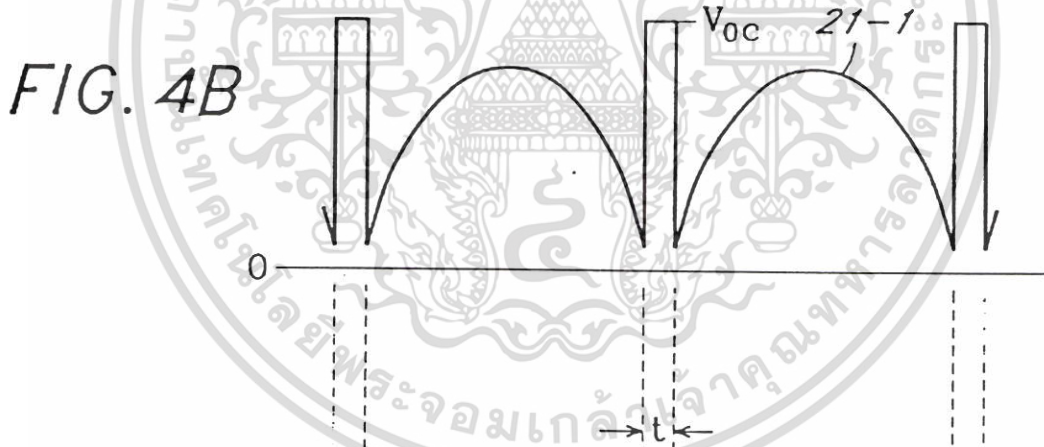
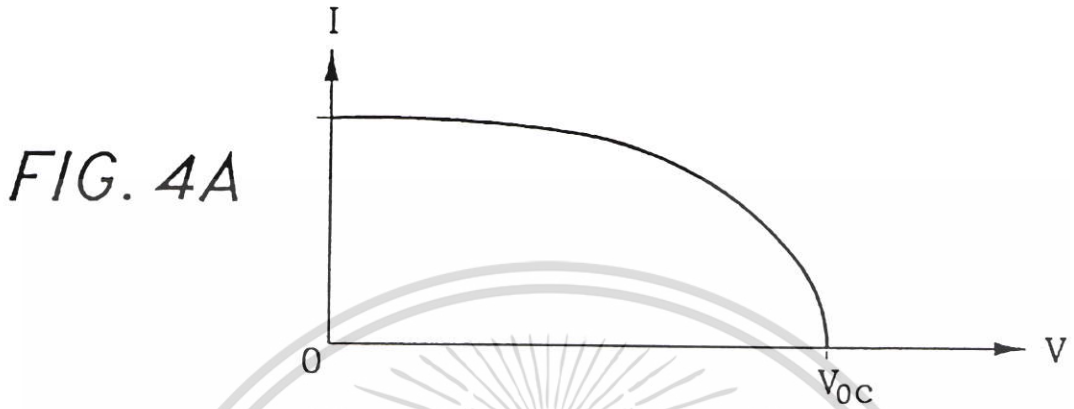
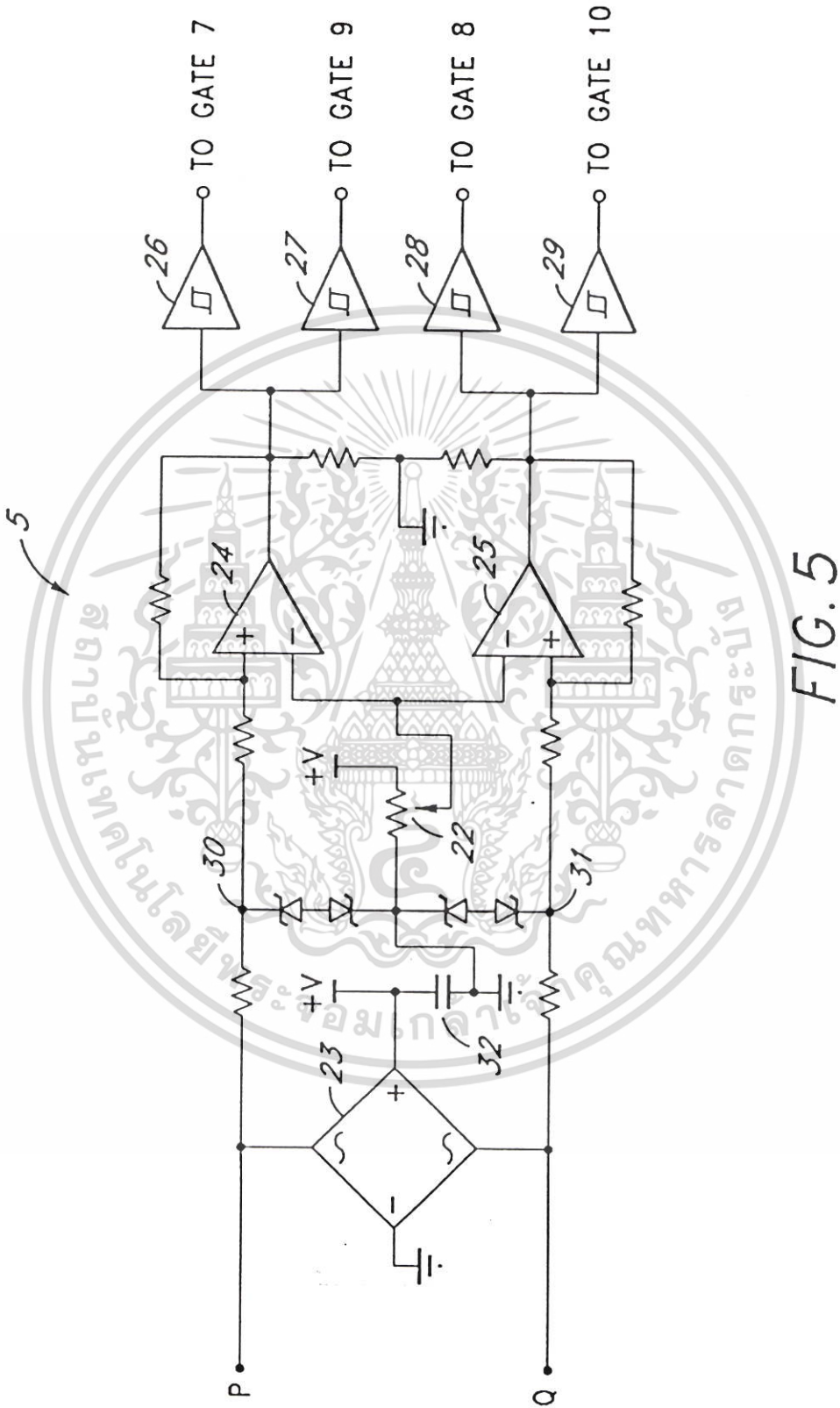


FIG. 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

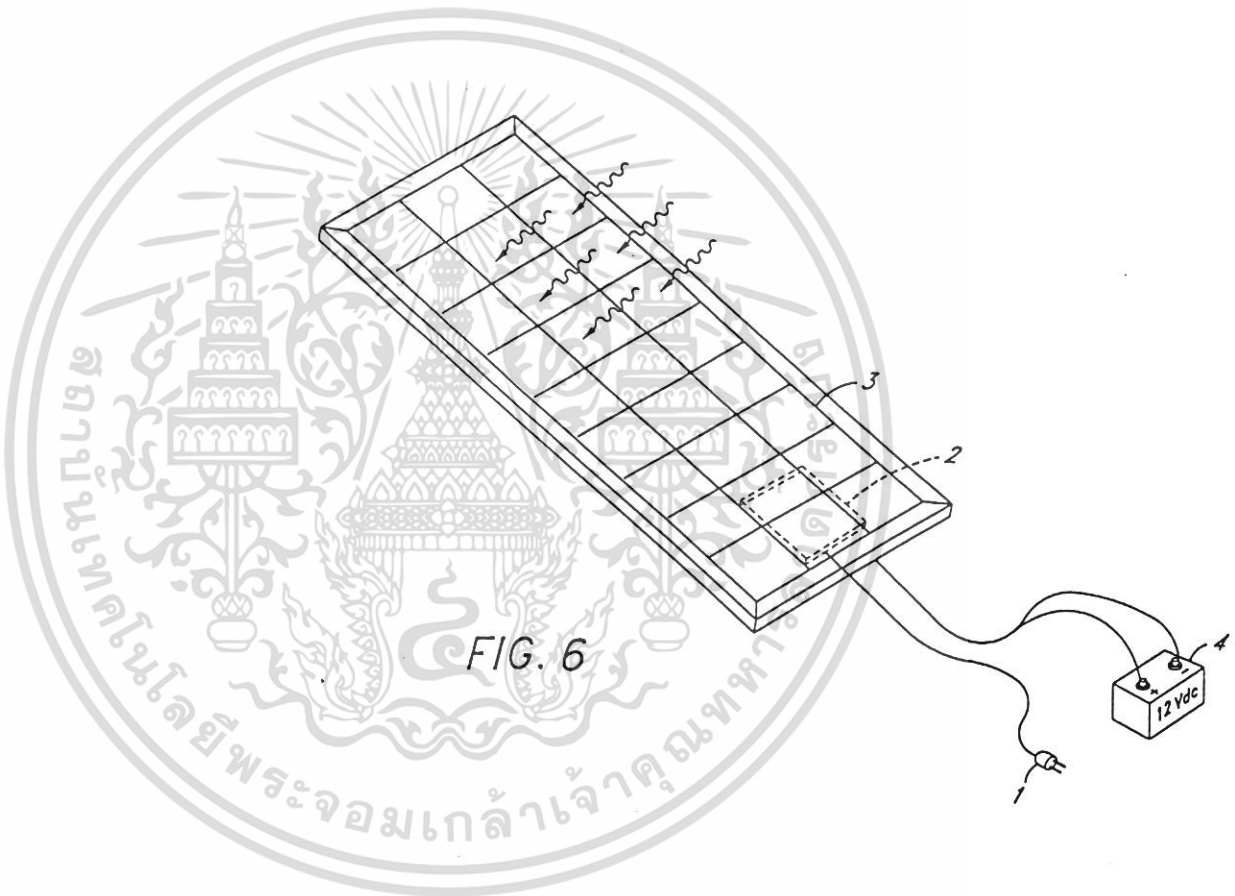


FIG. 6

5,898,585

1  
**APPARATUS AND METHOD FOR  
 PROVIDING SUPPLEMENTAL  
 ALTERNATING CURRENT FROM A SOLAR  
 CELL ARRAY**

BACKGROUND OF THE INVENTION

1. Field of the Invention

The present invention relates in general to power converters and more particularly, to a solar inverter circuit that: (i) converts direct current (DC) power from a solar photovoltaic array to a counterflowing alternating current (AC) power in response to a reference AC power source, and (ii) generates additional AC power to supplement the reference AC power source.

2. Background of the Related Art

Conversion of direct current (DC) power from solar cells to alternating current (AC) power required in residential AC lines usually employs a large number of batteries for storing DC electrical energy from solar cells during day-time. The batteries serve as a DC voltage source. The DC voltage source is then converted to simulate sinusoidal ac voltage by a number of methods. One such method uses an asynchronous sine-wave generator or a digital technique to mimic an AC voltage having a plurality of DC levels. To couple such converted AC voltage to the residential AC line, the phase, frequency and amplitude of the converted AC voltage must be the same as that in the residential AC line. If these parameters are not synchronized, serious problems to the municipal electrical supply, and/or to the converted solar source would result.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Description of the various embodiments of the invention is now given, with reference to the numbers in the figures as follows:

FIG. 1 is a schematic diagram of a first embodiment of the solar inverter circuit 2 of the present invention.

FIG. 2A illustrates the voltage waveform 17 measured across the terminals PQ of the secondary coil 6b of the transformer 6 of FIG. 1, when the primary coil 6a is energized by an AC voltage at the plug 1.

FIG. 2B illustrates the gate voltage on devices 7 and 9 provided by the gate controller circuit 5 during the positive cycle of the voltage waveform 17 of FIG. 2A.

FIG. 2C illustrates the gate voltage on devices 8 and 10 provided by the gate controller circuit 5 during the negative cycle of the voltage waveform 17 of FIG. 2A.

FIG. 2D illustrates the output current waveform  $I_{PQ}$  20 resulting from the inverter operation

FIG. 3 is a schematic diagram of a second embodiment of the solar inverter circuit 2 of the present invention.

FIG. 4A illustrates the current-voltage relationship at the terminals of the solar cell array 3, having an open-circuit voltage value  $V_{OC}$ .

FIG. 4B illustrates the voltage waveform 21-1 developed across the terminals a and c of the solar cell array of FIG. 1.

FIG. 4C illustrates the voltage waveform 21-2 developed across the terminals a-c of the solar cell array 3 of FIG. 3 depicting the effect of discharging a DC current into the battery 4 and during the time interval t.

FIG. 5 illustrates one embodiment of the gate controller circuit 5 of FIGS. 1 and 3.

FIG. 6 illustrates an exemplary solar cell array which implements the solar inverter circuit 2 of the present invention.

2  
**SUMMARY OF THE INVENTION**

A novel solar inverter circuit is used to connect a solar photovoltaic (PV) array with an alternating current (AC) voltage source to convert direct current (DC) power from the PV array to AC power. The solar inverter circuit employs the current-voltage (I-V) characteristic of the PV or solar cell, and an H-Bridge circuit with gate controller. The gate controller synchronizes the H-bridge with the AC voltage source. The PV array and the solar inverter circuit can plug directly into a residential AC plug and provides electrical power as a supplementary AC supply. Electrical energy required by the home appliances is supplied by the municipal AC line and solar energy concurrently. Advantages of the solar inverter circuit of the present invention include the flexibility of using the solar inverter circuit with any number of solar cell panels through the implementation of an impedance transformer, and the implementation of an additional, optional output for DC battery charging.

DETAILED DESCRIPTION OF THE PRESENT  
 INVENTION

FIG. 1 is a schematic diagram of a first embodiment of the solar inverter circuit of the present invention. An alternating current (AC) source provided via plug 1, provides an AC waveform to the solar inverter circuit 2. Solar energy is received by a solar photovoltaic array or a solar cell array 3, which in turn generates direct current (DC) power that is provided to the solar inverter circuit 2.

As shown in FIG. 1, the solar inverter circuit 2 comprises an H-bridge circuit 2a and a transformer 6. The H-bridge circuit 2a comprises a gate controller circuit 5 and four switching devices 7, 8, 9 and 10. In one embodiment, each switching device 7, 8, 9 and 10 is a Field Effect Transistor (FET). In alternate embodiments, each switching device may be an Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), a Gate-Turn-Off thyristor (GTO), a Bipolar Junction Transistor (BJT), a Silicon-Controlled Rectifier (SCR), a bidirectional triode thyristor (TRIAC), a MOS-Controlled Thyristor (MCT), or any other switching devices in which switching can be electronically controlled by applying appropriate signal to the gate terminal of the device. The chosen device is of sufficient current and voltage rating to be safely operating in the circuit. In one embodiment, the H-bridge circuit 2a also comprises four diodes D1, D2, D3 and D4.

The transformer 6 has a primary coil 6a and a secondary coil 6b. In one preferred embodiment, the transformer 6 is an isolation transformer, in which the primary coil 6a and the secondary coil 6b are not DC-coupled, and is a well-known type of transformer. An example of the gate controller circuit 5, which provides the signals shown in FIGS. 2B and 2C, is shown in FIG. 5. The signals can be generated by other equivalent circuits known to one skilled in the art.

Operation of the solar inverter circuit 2 of FIG. 1 will now be described. In the H-bridge circuit 2a, the gates of the four switching devices 7, 8, 9 and 10 are controlled by the gate controller circuit 5. The input to the gate controller circuit 5 is the voltage  $V_{PQ}$  from the secondary coil of the isolation transformer 6. This voltage  $V_{PQ}$  is derived from an AC source provided via plug 1. A detailed description of the gate controller circuit 5 and the transformer 6 is provided in the following sections.

During the positive cycle of the AC voltage  $V_{PQ}$ , (i.e., P is positive with respect to Q) shown as waveform 17 in FIG. 2A, the gate controller circuit 5 issues a pulse such as the voltage waveform 18 shown in FIG. 2B to turn the switching

5,898,585

3

devices 7 and 9 on and the switching devices 8 and 10 off. When the switching devices 7 and 9 are turned on, the signal path segments ab and ef act as short circuits, while the signal path segments bc and de act as open circuits. In response, the DC current generated by the solar cell array 3 takes the signal path segment ab through the secondary coil of the transformer 6 from node P to node Q, and thence through to the signal path segment ef.

The solar cell array may consist of a number of individual cells connected in series and parallel such that the current-voltage relationship at the array's terminals is shown in FIG. 4A. The magnitude of the open-circuit voltage of the array,  $V_{OC}$  in FIG. 4A, also is shown in FIG. 4B. The voltage in FIG. 4A is actually in the opposing direction with respect to the direction of the current flow I. In operation, the voltage  $V_{PQ}$  is the opposing voltage provided through the signal path segments, and the current at each instantaneous value of  $V_{PQ}$  which is shown as 17 in FIG. 2A, is then shown as the current waveform 20 in FIG. 2D. It is important to note that the H-bridge circuit 2a in FIG. 1 acts in the similar manner during the negative half of the cycle of the voltage  $V_{PQ}$  in providing the gate signal 19 in FIG. 2C to turn on the switching devices 8 and 10, and to turn off the switching devices 7 and 9, so that the signal path segments ab and ef are now open circuits while the signal path segments bc and de act as short circuits. In this way, the current flows in a direction opposite to that in the positive cycle, i.e., from Q to P.

In essence, the negative conductance characteristic of the solar cell array (i.e. the direction of the current I is opposite to that of the voltage V mentioned earlier in conjunction with FIG. 4A) yields an AC negative conductance shown in FIG. 2D in comparison with FIG. 2A. It is very important to assert that the current waveform 20 results from the voltage waveform 17 which is  $V_{PQ}$ , without influencing the  $V_{PQ}$  waveform. This is in contrast with a normal conductance operation where the current waveform is in-phase with the voltage waveform.

Referring to FIG. 1 and FIG. 3, because the current in the coil 6b flows in the opposite direction to  $V_{PQ}$ , the current in the coil 6a also flows in the opposite direction to the plug (city plug) voltage, and thus AC power is delivered from the circuit 2a into the city AC power line, without influencing the city AC voltage.

The diodes D1, D2, D3 and D4 are implemented for safety reasons, such as to guard against short-circuiting if current from the solar cell array 3 flows in the wrong direction when the H-bridge circuit 2a malfunctions.

FIG. 3 illustrates a second embodiment of the solar inverter circuit of the present invention. In this second embodiment, the solar inverter circuit 2 also provides a DC battery charging circuit. To ensure proper triggering of the switching devices in the H-bridge circuit 2a configuration, it is necessary to provide a small period of time, t, during which all switching devices 7, 8, 9 and 10 in the H-bridge circuit 2a are in the off-state, so as to prevent mistripping. Consequently, during this time interval, t, (as shown in FIG. 4B) the DC current from solar cell array 3 is not converted to AC current because there is no current flowing through PQ during t. FIG. 4B illustrates the voltage waveform 21-1 provided across the terminals a and c of the solar cell array 3 without the battery charging circuit 2b.

In this second embodiment, the solar inverter circuit 2 further comprises a battery charging circuit 2b. The battery charging circuit 2b comprises a NOR gate 11, a switching device 12 and a diode D5. The output of the NOR gate 11

4

goes high only when both the voltage waveforms 18 and 19 are off, i.e., during the time interval t, and is used to cause the switching device 12 to conduct during the time interval t. DC current from solar cell array 3 then passes through the diode D5 and into the battery 4 and the DC current harnessed may be stored in the battery 4 through trickle charging. The voltage waveform developed across the terminals a-c of the solar cell array 3 then becomes the waveform 21-2 as shown in FIG. 4C. It is apparent to one of ordinary skill in the art that the battery 4 may comprise a plurality of batteries that are coupled in series and/or parallel, to have a voltage value  $V_{bat}$  such that on the I-V curve of FIG. 4A the product I-V is maximum when  $V=V_{bat}$ .

FIG. 5 illustrates one embodiment of the gate controller circuit 5 as shown in FIGS. 1 and 3. The input of the gate controller circuit 5 is connected to the secondary turn of the isolation transformer 6, which provides  $V_{PQ}$ , the voltage waveform 17 as shown in FIG. 2A. The bridge diode 23 and capacitor 32 provide a DC supply for the circuit 5. The operational amplifiers 24 and 25 are configured as voltage comparators, and each generate a square pulse in response to the input voltage waveform 17. In particular, the non-inverting terminal of operational amplifier 24 is coupled to node P, while the non-inverting terminal of operational amplifier 25 is coupled to node Q. The inverting terminals of each operational amplifier 24 and 25 are coupled to a variable resistor 22, which allows the user to set the time interval t, as shown in FIGS. 2D, 4B and 4C. The output of operational amplifier 24 is provided as an input to buffers 26 and 27, which in turn drive the gates of switching devices 7 and 9, respectively. Similarly, the output of operational amplifier 25 is provided as an input to buffers 28 and 29, which in turn generate outputs which drive the gates of switching devices 8 and 10, respectively. The buffers 26, 27, 28 and 29 are used to increase driving current to the switching devices 7, 8, 9 and 10. In one embodiment, the buffers 26, 27, 28 and 29 are Schmitt triggers.

During the positive cycle of the waveform 17, the operational amplifier 24 generates a square pulse, which in turn drives the gates of switching devices 7 and 9, turning on the switching devices 7 and 9. During this cycle, the operational amplifier 25 does not generate any output, and thus, the switching devices 8 and 10 are not turned on. Thus, during the positive cycle, the switching devices 7 and 9 conduct, while the switching devices 8 and 10 do not conduct.

During the negative cycle of the waveform 17, the operational amplifier 25 generates a square pulse, which in turn drives the gates of switching devices 8 and 10, turning on the switching devices 8 and 10. During this negative cycle, the operational amplifier 24 does not generate any output, and thus, the switching devices 7 and 9 are not turned on. Thus, during the negative cycle, the switching devices 8 and 10 conduct and the switching devices 7 and 9 do not conduct.

Simple integrated circuits and operational amplifiers widely available in the market and as known by one of ordinary skill in the art, are used in the gate controller circuit 5 to provide the waveforms 18 and 19 (FIGS. 2B and 2C) from the waveform 17 (FIG. 2A). As described earlier, the width of the pulses 18 and 19 are adjustable, and hence the time interval, t, between the pulses 18 and 19 is also adjustable, affecting the waveform 20 (FIG. 2D) and waveforms 21-1 and 21-2 (FIGS. 4B and 4C, respectively). The time duration t during which a battery is charged can thus be varied, say from 1% to 99%, with concurrent AC power production from 99% to 1% correspondingly. This feature allows the solar inverter circuit 2 to be readily adaptable to the local power consumption needs for immediate AC application as opposed to DC storage for immediate or later use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5,898,585

5

One preferred embodiment of the isolation transformer 6 will now be described. In order to optimize the AC power from the solar cell array 3, the "open-circuit voltage" of the solar cell array 3 must be 5%–20% higher than the amplitude of  $V_{PQ}$ . Because a single solar cell's open-circuit voltage  $V_{PQ}$  is less than 1 volt and the "short-circuit current"  $I_{SC}$  is only several milliamps, the solar cell array 3 may be commercially available (with series and parallel connected cells) with a specified set of  $V_{OC}$  and  $I_{SC}$ . In order to couple the power generated from the solar cell array 3 to the city grid, for example, 220 Volts (AC), the isolation transformer 6 can be chosen with the transformer-turn-ratio to match the 220 V(AC) with the  $V_{PQ}$  needed for the optimal operation of the solar cell array 3. This allows the solar inverter circuit 2 of the present invention to provide 220 V(AC) from any available solar cell array 3, with an arbitrary combination of  $V_{OC}$  and  $I_{SC}$ .

It is apparent to one skilled in the art that an appropriate transformer 6 can be chosen not only to efficiently match the operation of an arbitrary solar cell array 3 to the city grid but also to match operation of the transformer 6 and the solar cell array 3 to any other AC generator, typically a diesel driven one or to an uninterrupted power supply (UPS). It is apparent to one skilled in the art that the consumer can purchase more solar cells to add on to the solar cell array 3 to harness and to generate more AC power from the sun at the user's own convenience and with minor adjustments to the transformer 6. Hence, the solar inverter circuit 2 of the present invention is both versatile and widely applicable.

FIG. 6 illustrates an exemplary solar cell array which implements the solar inverter circuit of the present invention. As shown, the solar inverter circuit 2 may be mounted to the back of a solar cell array 3 panel. An AC source provided via plug 1 provides an AC voltage waveform to the solar inverter circuit 2. Solar energy is received by the solar cell array 3, which in turn generates DC power that is provided to the solar inverter circuit 2. The solar inverter circuit 2 in turn converts the DC power to AC power, which is returned to the AC source at plug 1. In addition, the solar inverter circuit 2 may also comprise a battery charging circuit 2b which enables the solar inverter circuit 2 to also generate DC power for immediate DC applications or for storage in a battery 4.

Implementation of the solar inverter circuit of the present invention provides: (i) conversion of DC solar power to AC power through reference to an AC voltage source, and (ii) generation of additional DC power. Once harnessed, both the AC and DC powers may be utilized immediately, or the DC portion may be stored for later use. The features of immediate applicability and/or storage of the power, along with the versatility of matching the solar power with any AC voltage reference source, enables the solar inverter circuit of the present invention to be used in many applications.

Modifications and variations of the embodiments described above may be made by those skilled in the art while remaining within the true scope and spirit of this invention. Thus, although the present invention has been described in terms of certain preferred embodiments, other embodiments that will be apparent to those of ordinary skill in the art are also within the scope of this invention. Accordingly, the scope of the invention is intended to be defined only by the claims which follow.

What is claimed is:

1. A circuit for converting direct current (DC) power to alternating current (AC) power based on a reference AC voltage signal, comprising:

a first circuit coupled to receive DC power;

6

a transformer having a first side and a second side, said first side being coupled to receive the reference AC voltage signal; and

a second circuit coupled to the second side of said transformer and said first circuit, said second circuit generating a pulse based on the reference AC voltage signal, said second circuit controlling a conversion of the DC power to AC power, wherein an AC current of said converted AC power is opposite in phase with respect to the reference AC voltage signal.

2. The circuit as recited in claim 1, wherein said first circuit comprises a first and a second pair of switching devices, said first pair of switching devices being complementary of said second pair of switching devices.

3. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are field effect transistors.

4. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are insulated gate bipolar transistor (IGBTs).

5. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are gate-turn-off thyristors (GTOs).

6. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are bipolar junction transistors (BJTs).

7. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are silicon-controlled-rectifiers (SCRs).

8. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are TRIACs.

9. The circuit as recited in claim 2, wherein said switching devices are MOS-controlled thyristors (MCTs).

10. The circuit as recited in claim 1, further comprising an array of solar cells that generates the DC power from solar energy.

11. The circuit as recited in claim 1, wherein said converted AC power is supplementary to an existing AC power.

12. The circuit as recited in claim 1, wherein said transformer is an isolation transformer.

13. The circuit as recited in claim 12, further comprising an array of solar cells that generates the DC power from solar energy; and

wherein said transformer has a turn ratio that provides an AC voltage on said second side such that an open-circuit voltage of said array of solar cells is 5%–20% larger than an amplitude of the AC voltage on said second side.

14. The circuit as recited in claim 1, wherein said second circuit is a gate controller that generates a first pulse during a first half cycle of the reference AC voltage signal, and a second pulse during a second half cycle of the reference AC voltage signal.

15. The circuit as recited in claim 14, wherein said gate controller circuit includes a control circuit that controls a predetermined time interval between said first pulse and said second pulse.

16. The circuit as recited in claim 15, wherein said predetermined time interval is between 1% to 99% of a period of said reference AC voltage signal.

17. The circuit as recited in claim 15, wherein during said predetermined time interval, said switching devices are non-conducting.

18. The circuit as recited in claim 15, further comprising a connecting circuit and a storage cell, said connecting circuit being coupled to receive said DC power, said connecting circuit providing said DC power to said storage cell for storage during said predetermined time interval.

19. The circuit as recited in claim 15, wherein said storage cell is a battery.

20. The circuit as recited in claim 18, further comprising an array of solar cells that generates the DC power from

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5,898,585

7

solar energy, wherein said storage cell comprises a plurality of batteries having a total charged voltage that is less than an open-circuit voltage of the array of solar cells.

21. A method for converting DC power to alternating current (AC) power based on an reference AC voltage signal, comprising the steps of:

(a) providing a first circuit coupled to receive DC power;  
 (b) providing a transformer having a first side and a second side, said first side being coupled to receive the reference AC voltage signal; and

(c) providing a second circuit coupled to the second side of said transformer and said first circuit, said second circuit generating a pulse based on the reference AC voltage signal, said second circuit controlling a conversion of the DC power to AC power, wherein a converted AC current is opposite in phase with respect to the reference AC voltage signal.

22. The method as recited in claim 21, wherein in step (a), said first circuit comprises a first and a second pair of switching devices, said first pair of switching devices being complementary of said second pair of switching devices.

23. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are insulated gate bipolar transistor (IGBTs).

24. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are gate-turn-off thyristors (GTOs).

25. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are bipolar junction transistors (BJTs).

8

26. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are silicon-controlled-rectifiers (SCRs).

27. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are TRIACs.

28. The method as recited in claim 22, wherein in step (a), said switching devices are MOS-controlled thyristors (MCTs).

29. The method as recited in claim 21, further comprising the step of generating DC power from solar energy.

30. The method as recited in claim 21, wherein in step (c), said second circuit is a gate controller that generates a first pulse during a first half cycle of the reference AC voltage signal, and a second pulse during a second-half cycle of the reference AC voltage signal.

31. The method as recited in claim 30, further comprising the step of controlling a predetermined time interval between said first pulse and said second pulse.

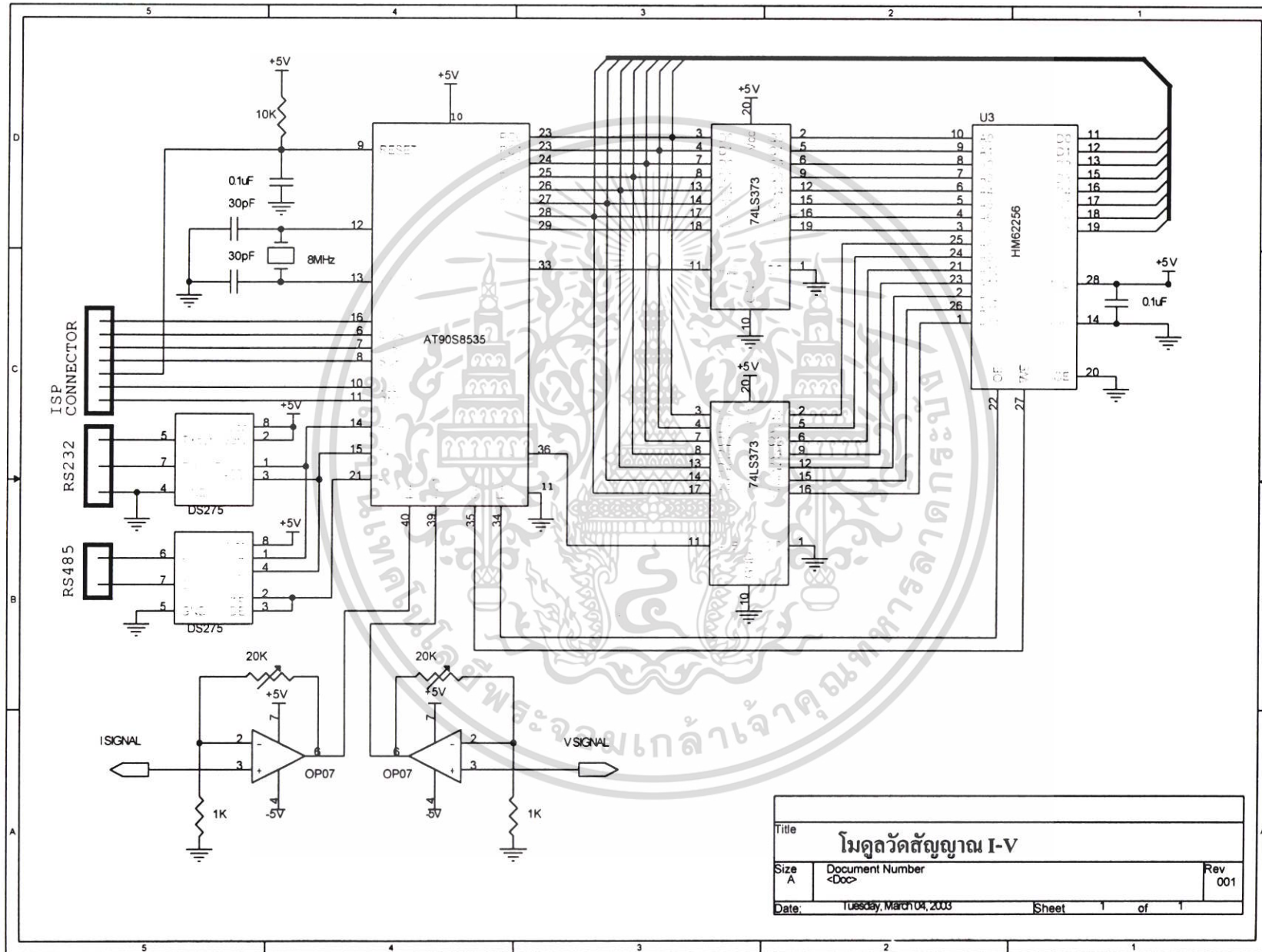
32. The method as recited in claim 31, wherein in the step of controlling said predetermined time interval is between 1% to 99% of a period of said reference AC voltage signal.

33. The method as recited in claim 30, further comprising the step of providing a connecting circuit and a storage cell, said connecting circuit providing said direct current power to said storage cell for storage during said predetermined time interval.

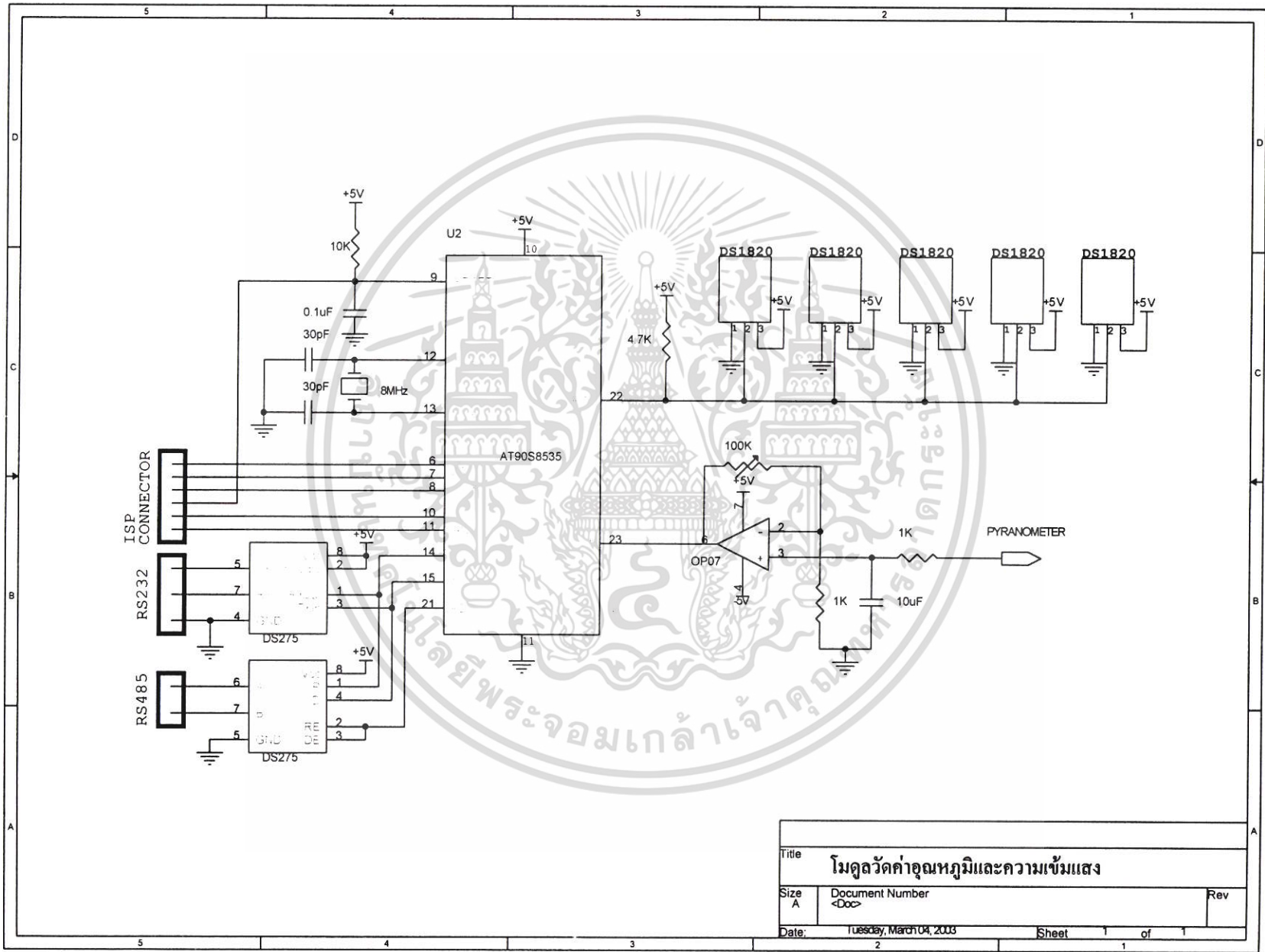
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title		
โมดูลวัดสัญญาณ I-V		
Size A	Document Number <Doc>	Rev 001
Date:	Tuesday, March 04, 2003	Sheet 1 of 1



Title		
โมดูลวัดค่าอุณหภูมิและความเข้มแสง		
Size A	Document Number	Rev
	<Doc>	
Date:	Tuesday, March 04, 2003	Sheet 1 of 1
	2	1



ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างข้อมูลวันที่ 14 มกราคม 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	I <sub>ac</sub>	V <sub>ac</sub>	P <sub>ac</sub>	FF	R <sub>s</sub>	R <sup>2</sup>
14/1/03	6:00:00	0	0	3.11	37.32	726.66	0	0	17.9	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:05:00	0	0	6.3	38.32	745.98	0	0	17.9	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:10:00	0	0	9.41	37.32	726.66	0	0	17.9	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:15:00	0	0	12.52	37.32	726.66	0	0	17.9	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:20:00	0	0	15.63	37.32	726.66	0	0	18	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:25:00	0	0	19.24	43.28	842.62	0	0	18.1	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:30:00	0	0	22.02	33.35	649.35	0	0	18.1	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:35:00	0	0	24.55	30.38	591.37	0	0	18	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:40:00	0	0	27.5	35.34	688	0	0	18.1	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:45:00	0	0	31.19	44.27	861.95	0	0	18.5	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:50:00	0.0017	0.0017	34.46	39.31	765.31	0	0	19.2	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/03	6:55:00	0.0033	0.0017	38.9	53.21	1035.89	0	0	19.3	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79299
14/1/03	7:00:00	0.005	0.0017	42.83	47.25	919.93	0	0	19.7	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.77505
14/1/03	7:05:00	0.01	0.005	49.25	77.03	1499.74	0	0	20.2	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.96512
14/1/03	7:10:00	0.015	0.005	55.34	73.06	1422.43	0	0	20.2	19.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95949
14/1/03	7:15:00	0.0217	0.0067	63.33	95.89	1866.96	117.62	4.3	20.8	20.2	0.61	387.58	0.52	315.86	162.7	0.53	223.35	117.62	0.49	64.98	0.99472
14/1/03	7:20:00	0.03	0.0083	72.23	106.81	2079.56	97.58	4.69	21.7	20.5	0.53	388.03	0.42	318.94	134.68	0.44	224.32	97.58	0.53	76.82	0.99332
14/1/03	7:25:00	0.04	0.01	81.96	116.74	2272.83	163.13	5.81	22.7	20.7	0.9	391.05	0.69	322.98	223.99	0.73	223.21	163.13	0.5	45.84	0.99608
14/1/03	7:30:00	0.0517	0.0117	93.68	140.57	2736.68	186.3	6.11	23.3	21	1.08	394.94	0.78	328.93	255.79	0.84	223.09	186.3	0.52	39.93	0.99593
14/1/03	7:35:00	0.065	0.0133	107.71	168.36	3277.84	210.62	6.43	23.5	21	1.22	405.98	0.88	333.68	311	0.95	222.73	210.62	0.55	30.15	0.98259
14/1/03	7:40:00	0.08	0.015	123.14	185.24	3606.4	231.14	6.41	24.1	21.3	1.4	399.55	0.95	339.8	321.26	1.04	222.06	231.14	0.57	30.32	0.99688

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	I <sub>ac</sub>	V <sub>ac</sub>	P <sub>ac</sub>	FF	Rs	R <sup>^2</sup>
14/1/03	7:45:00	0.0967	0.0167	140.07	203.11	3954.29	258.93	6.55	24.9	21.5	1.65	401.42	1.08	342.37	368.83	1.17	222.2	258.93	0.56	26.67	0.99636
14/1/03	7:50:00	0.1167	0.02	158.4	219.99	4282.85	282.65	6.6	25.6	21.8	1.76	402.32	1.18	340.05	401.11	1.27	222.37	282.65	0.57	25.49	0.99644
14/1/03	7:55:00	0.1367	0.02	178.72	243.81	4746.7	318.48	6.71	26.5	22	1.96	403.07	1.27	340.09	440.24	1.43	222.66	318.48	0.56	21.34	0.99623
14/1/03	8:00:00	0.1583	0.0217	200.28	258.7	5036.61	345.24	6.85	27.4	22.5	2.12	403.06	1.47	339.95	518.42	1.56	221.09	345.24	0.61	17.27	0.99529
14/1/03	8:05:00	0.1833	0.025	223.32	276.57	5384.5	369.66	6.87	28.3	22.7	2.37	403.05	1.59	340.8	562.59	1.68	220.6	369.66	0.59	15.79	0.99534
14/1/03	8:10:00	0.2117	0.0283	245.46	285.11	5550.75	393.18	7.6	29.1	23	2.5	403.96	1.76	339.54	626.62	1.78	221	393.18	0.62	13.74	0.99173
14/1/03	8:15:00	0.2433	0.0317	271.07	307.34	5983.64	437.75	7.92	29.6	23	2.81	407.05	2.02	336.09	609.64	1.97	221.86	437.75	0.68	16.67	0.99597
14/1/03	8:20:00	0.285	0.0417	299.17	337.13	6563.45	560.03	8.53	31	23.9	2.81	407.07	2.6	333.55	867.58	2.53	221.01	560.03	0.71	13.69	0.99963
14/1/03	8:25:00	0.33	0.045	329.25	360.95	7027.3	599.7	8.53	30.7	23.4	3.05	407.09	2.74	326.04	893.14	2.7	221.75	599.7	0.72	14.44	0.99942
14/1/03	8:30:00	0.3783	0.0483	361.06	381.8	7433.17	636.02	8.56	31.7	23.9	3.06	407.07	2.91	329.25	957.24	2.83	224.69	636.02	0.74	13.09	0.99994
14/1/03	8:35:00	0.4283	0.05	394.37	399.67	7781.06	664.13	8.54	32.1	24	3.58	407.77	2.96	333.56	1001.44	2.95	225.05	664.13	0.69	11.37	0.99579
14/1/03	8:40:00	0.4833	0.055	428.83	413.57	8051.64	728.1	9.04	33.2	24	3.69	408.44	3.27	326.67	1068.63	3.24	224.93	728.1	0.71	12.28	0.99839
14/1/03	8:45:00	0.54	0.0567	464.87	432.43	8418.86	760.33	9.03	34	24.5	3.8	407.1	3.42	325.67	1112.45	3.38	224.62	760.33	0.72	11.63	0.99964
14/1/03	8:50:00	0.6	0.06	502.23	448.31	8728.09	794.16	9.1	34.8	25	4.02	407.09	3.6	329.99	1187.18	3.54	224.55	794.16	0.72	10.48	0.99957
14/1/03	8:55:00	0.6617	0.0617	541.66	473.13	9211.27	832.75	9.04	36.5	25.5	4.23	407.02	3.72	322.84	1200.94	3.71	224.21	832.75	0.7	11.09	0.99957
14/1/03	9:00:00	0.7133	0.0638	582.82	493.98	9617.14	888.41	9.24	36.6	26.3	4.65	406.55	3.97	326.04	1295.65	3.96	224.45	888.41	0.73	9.95	0.99902
14/1/03	9:05:00	0.7733	0.0682	625.23	508.87	9907.05	921.62	9.3	36.3	25.8	4.55	406.97	4.2	327.01	1331.26	4.12	223.81	921.62	0.72	10.84	0.99942
14/1/03	9:10:00	0.845	0.0717	668.79	522.77	10177.6	956.13	9.39	36.9	26	4.75	407.33	4.36	330.26	1453.44	4.26	224.38	956.13	0.75	8.24	0.99937
14/1/03	9:15:00	0.9183	0.0733	714.17	544.61	10602.8	978.81	9.23	37.2	26	4.91	407.08	4.42	325.58	1439.05	4.4	222.59	978.81	0.72	8.97	0.99973
14/1/03	9:20:00	0.9933	0.075	760.8	559.5	10892.7	1007.3	9.25	38.1	26.5	5.11	407.06	4.55	324.4	1477.32	4.53	222.44	1007.33	0.71	8.9	0.99963
14/1/03	9:25:00	1.0717	0.0783	808.33	570.42	11105.3	1030.5	9.28	37.7	25.6	5.29	407.69	4.65	325.91	1514.23	4.65	221.79	1030.53	0.7	8.58	0.99918

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	I <sub>ac</sub>	V <sub>ac</sub>	P <sub>ac</sub>	FF	Rs	R <sup>2</sup>
14/1/03	9:30:00	1.1517	0.08	857.69	592.26	11530.5	1073.2	9.31	38.7	26	5.37	407.39	4.93	323.22	1508.57	4.83	222.03	1073.17	0.69	8.24	0.98951
14/1/03	9:35:00	1.235	0.0833	908.53	610.13	11878.4	1099.1	9.25	40	26.5	5.58	407.18	5.01	327.78	1643.32	4.96	221.41	1099.07	0.72	7.71	0.99954
14/1/03	9:40:00	1.32	0.085	960.37	622.04	12110.3	1118.5	9.24	41.4	27.2	5.65	405.43	5.08	323.67	1644.31	5.07	220.47	1118.48	0.72	7.8	0.99943
14/1/03	9:45:00	1.4067	0.0867	1013.36	635.94	12380.9	1147.4	9.27	42.8	26	5.88	407.09	5.25	320.49	1681.6	5.21	220.13	1147.36	0.7	8.21	0.99982
14/1/03	9:50:00	1.4933	0.0867	1066.77	640.9	12477.6	1193	9.56	44.1	27.5	5.94	395.53	5.35	323.22	1728.66	5.29	225.61	1192.97	0.74	6.52	0.99809
14/1/03	9:55:00	1.5833	0.09	1121.59	657.78	12806.1	1204.6	9.41	44.8	27.5	6.06	403.06	5.44	320.43	1744.39	5.41	222.68	1204.61	0.71	7.43	0.99982
14/1/03	10:00:00	1.6767	0.0933	1177.39	669.69	13038	1227.4	9.41	45.3	27.3	6.2	403.06	5.56	318.65	1770.65	5.51	222.66	1227.4	0.71	7.49	0.99987
14/1/03	10:05:00	1.7717	0.095	1233.2	669.69	13038	1265.8	9.41	45.3	27.3	6.37	406.06	5.7	321.99	1834.12	5.68	222.93	1265.84	0.71	7.22	0.99962
14/1/03	10:10:00	1.8683	0.0967	1291.9	704.43	13714.5	1275.1	9.3	45	27.5	6.38	403.27	5.77	320.1	1845.85	5.73	222.6	1275.07	0.72	7.04	0.99968
14/1/03	10:15:00	1.9667	0.0983	1351.6	716.35	13946.4	1301.6	9.33	45.1	27.5	6.63	403.14	5.89	320.04	1884.15	5.87	221.6	1301.61	0.7	6.9	0.9998
14/1/03	10:20:00	2.0433	0.0983	1412.95	736.2	14333	1329	9.27	44.6	27	6.73	404.16	6.05	317.87	1923.32	6.02	220.82	1328.99	0.71	7.04	0.99945
14/1/03	10:25:00	2.1333	0.0991	1475.38	749.11	14584.2	1336.4	9.16	45.9	28.2	6.69	403.06	6.11	316.86	1936.39	6.06	220.7	1336.38	0.72	6.96	0.99985
14/1/03	10:30:00	2.2367	0.1033	1538.38	756.06	14719.5	1354.1	9.2	46.8	28.1	7.01	402.55	6.19	315.79	1954.82	6.14	220.6	1354.07	0.69	7.02	0.99978
14/1/03	10:35:00	2.34	0.1033	1601.96	763.01	14854.8	1362.2	9.17	47.5	29.2	7.05	402.03	6.2	316.28	1960.67	6.19	219.97	1362.21	0.69	6.84	0.99964
14/1/03	10:40:00	2.445	0.105	1666.04	768.96	14970.8	1372	9.16	47.3	28.9	7.11	401.76	6.22	316.22	1967.56	6.23	220.15	1372.02	0.69	6.76	0.9997
14/1/03	10:45:00	2.5267	0.107	1730.95	778.89	15164	1397.8	9.22	47.7	29	7.17	401.23	6.36	313.3	1992.13	6.36	219.91	1397.82	0.69	6.82	0.99969
14/1/03	10:50:00	2.61	0.108	1797.1	793.78	15453.9	1441.1	9.33	47.1	28.5	7.43	402.51	6.56	313.67	2057.12	6.56	219.7	1441.1	0.69	6.73	0.99978
14/1/03	10:55:00	2.705	0.109	1863.08	791.79	15415.3	1426.2	9.25	48.6	30	7.4	399.82	6.51	311.29	2027.43	6.5	219.49	1426.21	0.69	6.76	0.99956
14/1/03	11:00:00	2.815	0.11	1930.55	809.66	15763.2	1453.3	9.22	49.3	30	7.46	400.42	6.65	310.07	2063.13	6.62	219.5	1453.28	0.69	6.8	0.99984
14/1/03	11:05:00	2.925	0.11	1998.11	810.66	15782.5	1455	9.22	49.3	30.1	7.43	399.52	6.69	308.25	2062.92	6.64	219.17	1454.96	0.7	6.87	0.9999
14/1/03	11:10:00	3.0383	0.1133	2065.91	813.63	15840.5	1463.3	9.24	48.4	29.3	7.42	400.13	6.76	307.82	2081.2	6.66	219.68	1463.3	0.7	6.97	0.99982

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	Imax	Vmax	Pmax	Iac	Vac	Pac	FF	Rs	R^2
14/1/03	11:15:00	3.15	0.1117	2133.8	814.63	15859.8	1461.3	9.21	49.1	30	7.42	399.48	6.75	306.82	2072.41	6.67	219.24	1461.31	0.7	7.02	0.99989
14/1/03	11:20:00	3.2633	0.1133	2203.5	836.47	16285	1507.1	9.25	48.8	30.5	7.84	399.62	6.85	304.23	2152.55	6.87	219.22	1507.06	0.69	6.11	0.99937
14/1/03	11:25:00	3.3783	0.115	2273.95	845.4	16459	1506.4	9.15	50.2	31.1	7.84	396.26	6.87	308.8	2120.65	6.88	219.1	1506.44	0.68	6.3	0.9991
14/1/03	11:30:00	3.495	0.1167	2344.65	848.38	16516.9	1531.5	9.27	50.6	31	8.03	395.1	7.01	306.07	2144.83	6.97	219.66	1531.45	0.68	6.34	0.99951
14/1/03	11:35:00	3.6133	0.1183	2415.35	848.38	16516.9	1534.7	9.29	50.6	31.5	8.03	395.08	7.02	304.47	2137.05	6.95	220.68	1534.72	0.67	6.52	0.99948
14/1/03	11:40:00	3.7317	0.1183	2488.45	877.17	17077.4	1603	9.39	50.8	31	8.15	386.09	6.98	305.52	2203.43	7.16	223.76	1603	0.7	4.76	0.99504
14/1/03	11:45:00	3.85	0.1183	2561.46	876.18	17058.1	1590.4	9.32	49.5	30.5	8.22	399.51	7.15	309.74	2215.85	7.18	221.51	1590.44	0.67	6.17	0.99965
14/1/03	11:50:00	3.97	0.12	2634.23	873.2	17000.1	1583	9.31	50.9	31.5	8.18	394.99	7.17	305.94	2193.17	7.17	220.92	1582.98	0.68	6.1	0.9997
14/1/03	11:55:00	4.0917	0.1217	2706.08	862.28	16787.5	1594.8	9.5	49.5	30.5	8.23	399.53	7.15	309.74	2213.19	7.15	223.03	1594.78	0.67	6.18	0.9997
14/1/03	12:00:00	4.2133	0.1217	2779.76	884.12	17212.7	1597.3	9.28	50	31.5	8.26	399.03	7.3	305.34	2227.89	7.24	220.76	1597.3	0.68	6.48	0.99943
14/1/03	12:05:00	4.3383	0.125	2854.27	894.04	17406	1629.8	9.36	49.4	31	8.39	399.73	7.42	305.52	2267.65	7.34	222.05	1629.82	0.68	6.5	0.99957
14/1/03	12:10:00	4.4583	0.12	2928.77	894.04	17406	1632.3	9.38	49.6	31	8.39	399.53	7.42	304.85	2263.01	7.32	222.91	1632.29	0.67	6.56	0.99962
14/1/03	12:15:00	4.58	0.1217	3002.69	887.1	17270.7	1610	9.32	51	31.8	8.26	395.05	7.3	304.24	2220.05	7.22	223.14	1609.99	0.68	6.21	0.99956
14/1/03	12:20:00	4.705	0.125	3077.86	901.99	17560.6	1643.1	9.36	50.5	31.5	8.52	395.82	7.48	302.49	2263.92	7.37	222.85	1643.12	0.67	6.43	0.99943
14/1/03	12:25:00	4.83	0.125	3153.02	901.99	17560.6	1643.9	9.36	50.5	31.5	8.5	399.51	7.47	304.18	2271.23	7.37	223.06	1643.9	0.67	6.62	0.99969
14/1/03	12:30:00	4.9533	0.1233	3228.36	903.97	17599.3	1643.4	9.34	49.9	31.4	8.52	399.57	7.47	304.12	2272.5	7.38	222.63	1643.45	0.67	6.62	0.99963
14/1/03	12:35:00	5.075	0.1217	3301.95	883.12	17193.4	1620.1	9.42	49.2	31	8.28	399.59	7.32	306.18	2241.53	7.26	223.02	1620.13	0.68	6.44	0.99954
14/1/03	12:40:00	5.1983	0.1233	3375.87	887.1	17270.7	1610.5	9.33	50.5	32	8.29	395.55	7.33	303.8	2227.86	7.24	222.42	1610.52	0.68	6.3	0.99924
14/1/03	12:45:00	5.3183	0.12	3449.96	889.08	17309.3	1606.4	9.28	50.6	32	8.29	395.06	7.34	303.18	2224.59	7.25	221.49	1606.44	0.68	6.31	0.99954
14/1/03	12:50:00	5.4383	0.12	3522.65	872.2	16980.8	1585.7	9.34	50.7	31.5	8.18	395.02	7.22	304.9	2202.14	7.2	220.29	1585.66	0.68	6.16	0.99967
14/1/03	12:55:00	5.5583	0.12	3595.99	880.15	17135.4	1575.3	9.19	52.1	32.7	8.17	391.1	7.2	301.74	2173.51	7.18	219.33	1575.3	0.68	6.12	0.99969

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	Imax	Vmax	Pmax	Iac	Vac	Pac	FF	Rs	R^2
14/1/03	13:00:00	5.675	0.1167	3668.02	864.26	16826.2	1554.3	9.24	52.9	32.9	8.27	391.04	7.11	302.25	2149.01	7.14	217.82	1554.31	0.66	6.17	0.99967
14/1/03	13:05:00	5.7917	0.1167	3739.95	863.27	16806.8	1547.8	9.21	54.3	33.7	8.31	388.41	7.13	296.1	2111.06	7.06	219.36	1547.75	0.65	6.62	0.9995
14/1/03	13:10:00	5.9083	0.1167	3812.56	871.21	16961.5	1560.7	9.2	53.7	33.1	8.17	389.01	7.2	295.72	2128.53	7.11	219.58	1560.69	0.67	6.57	0.99944
14/1/03	13:15:00	6.025	0.1167	3883.92	856.32	16671.6	1551.8	9.31	51.6	32.5	8.21	391.96	7.12	300.48	2138.88	7.04	220.28	1551.82	0.66	6.55	0.99924
14/1/03	13:20:00	6.14	0.115	3954.28	844.41	16439.6	1527	9.29	53.5	33.6	7.92	381.38	6.9	301.45	2073.44	6.88	221.98	1527.03	0.69	5.03	0.99318
14/1/03	13:25:00	6.255	0.115	4025.06	849.37	16536.3	1538.3	9.3	53.4	33.6	8.2	390.62	7.1	298.09	2116.67	7.02	219	1538.31	0.66	6.68	0.99939
14/1/03	13:30:00	6.3683	0.1133	4094.52	833.49	16227	1491	9.19	53.8	33.5	7.83	388.79	6.86	300.03	2058.25	6.8	219.22	1490.99	0.68	6.46	0.99947
14/1/03	13:35:00	6.4817	0.1133	4163.73	830.51	16169	1482.7	9.17	52.3	33.3	7.87	390.85	6.83	302.88	2069.05	6.77	219.09	1482.7	0.67	6.5	0.99935
14/1/03	13:40:00	6.5917	0.11	4232.86	829.52	16149.7	1481.2	9.17	54	34.7	7.84	389.68	6.83	301.46	2059.64	6.79	218.31	1481.24	0.67	6.47	0.99934
14/1/03	13:45:00	6.7	0.1083	4299.58	800.73	15589.2	1429.9	9.17	55.5	35.2	7.42	387.54	6.72	294.57	1980.55	6.55	218.35	1429.91	0.69	7.2	0.99975
14/1/03	13:50:00	6.7833	0.108	4365.9	795.77	15492.6	1324.3	9	53.8	33.7	7.45	377.61	6.5	296.75	1928.14	6.52	218.27	1324.34	0.69	6	0.99191
14/1/03	13:55:00	6.865	0.1065	4432.38	797.75	15531.3	1431.6	9.22	52.8	33.5	7.43	390.1	6.67	299.87	1999.03	6.56	218.19	1431.6	0.69	6.84	0.99959
14/1/03	14:00:00	6.97	0.105	4497.62	782.86	15241.3	1398.2	9.17	52.6	33.6	7.37	389.29	6.49	300.49	1949.1	6.41	218.09	1398.19	0.68	6.9	0.99975
14/1/03	14:05:00	7.0733	0.1033	4562.19	774.92	15086.7	1362.1	9.03	55.5	35.7	7.21	387.53	6.35	295.71	1879	6.25	218	1362.1	0.67	7.37	0.99972
14/1/03	14:10:00	7.175	0.1017	4626.19	767.97	14951.4	1348.6	9.02	54.2	34.2	7.12	387.52	6.24	299.1	1865.14	6.18	218.24	1348.55	0.68	7.07	0.99974
14/1/03	14:15:00	7.2717	0.0967	4686.96	729.25	14197.7	1293.1	9.11	51.9	33.5	6.71	389.8	6.02	303.13	1824.26	5.94	217.73	1293.1	0.7	7.17	0.99972
14/1/03	14:20:00	7.3433	0.0967	4747.73	729.25	14197.7	1251.6	9.11	51.9	33.5	6.56	390.87	5.81	306.61	1780.93	5.75	217.59	1251.61	0.69	7.21	0.99972
14/1/03	14:25:00	7.4267	0.0925	4806.35	703.44	13695.2	1257.1	9.18	51.1	33.5	6.6	391.22	5.83	307.29	1791.68	5.78	217.54	1257.09	0.69	7.14	0.99976
14/1/03	14:30:00	7.52	0.0933	4865.47	709.4	13811.1	1261.4	9.13	51.6	33.6	6.6	390.82	5.84	307.31	1794.34	5.78	218.07	1261.45	0.7	7.05	0.99975
14/1/03	14:35:00	7.6167	0.0918	4924.17	704.43	13714.5	1265.7	9.23	52.4	34.6	6.61	390.56	5.85	306.91	1793.94	5.81	217.93	1265.7	0.69	7.05	0.99978
14/1/03	14:40:00	7.7067	0.09	4980.56	676.64	13173.3	1211.5	9.2	53	35	6.32	389.46	5.6	307.18	1721.48	5.55	218.15	1211.49	0.7	7.22	0.99978

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	I <sub>ac</sub>	V <sub>ac</sub>	Pac	FF	Rs	R <sup>2</sup>
14/1/03	14:45:00	7.7933	0.0867	5035.04	653.81	12728.8	1170.2	9.19	51.6	33.5	6.07	390.72	5.43	306.8	1666.61	5.37	218.09	1170.17	0.7	7.66	0.99983
14/1/03	14:50:00	7.86	0.0867	5088.2	637.92	12419.6	1146	9.23	50.6	33	5.94	391.16	5.32	308.14	1637.92	5.26	217.86	1146.03	0.7	7.69	0.99978
14/1/03	14:55:00	7.9367	0.085	5141.86	643.88	12535.5	1160.3	9.26	49.5	32.5	6.01	394.36	5.38	310.12	1669.97	5.33	217.65	1160.31	0.7	7.74	0.99983
14/1/03	15:00:00	8.0233	0.0843	5195.18	639.91	12458.2	1154.7	9.27	48.5	32.1	5.95	395.94	5.34	310.96	1660.66	5.28	218.57	1154.73	0.7	7.88	0.99964
14/1/03	15:05:00	8.1067	0.0833	5246.36	614.1	11955.7	1111.7	9.3	48.6	32.2	5.62	401.47	5.03	318.44	1600.98	5.06	219.49	1111.69	0.71	8.06	0.99887
14/1/03	15:10:00	8.19	0.0833	5297.95	619.06	12052.4	1111.7	9.22	49.6	34	5.72	391.08	5.14	310.32	1594.51	5.07	219.06	1111.68	0.71	7.7	0.99946
14/1/03	15:15:00	8.2717	0.0817	5348.71	609.13	11859.1	1089.2	9.18	50.5	33.2	5.67	389.84	5.03	307.98	1548.12	4.98	218.93	1089.23	0.7	8.02	0.99952
14/1/03	15:20:00	8.35	0.0783	5397.73	588.29	11453.2	1049.9	9.17	52	35	5.48	388.14	4.91	303.82	1491.3	4.8	218.59	1049.9	0.7	8.64	0.99962
14/1/03	15:25:00	8.4233	0.0733	5444.19	557.51	10854.1	987.03	9.09	52.4	35	5.18	387.53	4.58	305.87	1399.79	4.53	217.86	987.03	0.7	8.76	0.9996
14/1/03	15:30:00	8.495	0.0717	5489	537.66	10467.5	955.54	9.13	50.6	34	4.91	388.23	4.45	310.1	1381.26	4.39	217.66	955.54	0.72	8.54	0.99941
14/1/03	15:35:00	8.5633	0.0683	5532.89	526.74	10254.9	932.14	9.09	49.6	33.5	4.85	389.37	4.35	314.07	1366.2	4.28	217.99	932.14	0.72	8.45	0.99886
14/1/03	15:40:00	8.6283	0.065	5574.06	493.98	9617.14	876.56	9.11	49.3	34	4.51	389.23	4.03	310.21	1250.18	4.02	218.12	876.56	0.71	9.41	0.99877
14/1/03	15:45:00	8.6933	0.065	5615.05	491.99	9578.49	873.21	9.12	49.1	33.9	4.52	389.4	3.98	313.48	1248.48	4	218.25	873.21	0.71	9.11	0.999
14/1/03	15:50:00	8.7533	0.06	5654.07	468.17	9114.63	820.46	9	49.1	34.3	4.25	389.18	3.84	304.7	1170.12	3.76	218.28	820.46	0.71	11.05	0.99961
14/1/03	15:55:00	8.8117	0.0583	5691.35	447.32	8708.76	775.77	8.91	49.1	34.2	3.99	388.62	3.59	314.92	1131.28	3.55	218.46	775.77	0.73	9.93	0.99946
14/1/03	16:00:00	8.8667	0.055	5727.55	434.41	8457.51	747.66	8.84	48.4	33.5	3.79	388.27	3.5	309.33	1083.46	3.42	218.76	747.66	0.74	11.09	0.99974
14/1/03	16:05:00	8.92	0.0533	5762.51	419.52	8167.6	733.2	8.98	47.8	33.5	3.77	388.87	3.4	310.3	1054.56	3.34	219.54	733.2	0.72	11.32	0.99947
14/1/03	16:10:00	8.9717	0.0517	5796.56	408.6	7955.01	696.19	8.75	46.8	33	3.68	389.79	3.28	309.75	978.7	3.2	217.79	696.19	0.73	14.73	0.9968
14/1/03	16:15:00	9.02	0.0483	5829.37	393.71	7665.1	640.81	8.63	46.8	33.5	3.55	388.97	2.97	315.72	966.96	2.94	218.19	640.81	0.7	10.39	0.99715
14/1/03	16:20:00	9.065	0.045	5860.02	367.9	7162.59	611.48	8.54	45.3	32.2	3.06	390.2	2.9	314.98	912.8	2.8	218.02	611.48	0.75	12.75	0.99977
14/1/03	16:25:00	9.1067	0.0417	5888.78	345.07	6718.07	586.73	8.73	44.2	31.5	3.01	390.93	2.72	314.29	855.4	2.69	218.25	586.73	0.73	13.68	0.99944

Day	Time	kWh	wh/5min	Insolation	rradiance	Psun	Pac	Efficiency	Tcell	Tamb	Isc	Voc	I <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	I <sub>ac</sub>	V <sub>ac</sub>	P <sub>ac</sub>	FF	R <sub>s</sub>	R <sup>2</sup>
14/1/03	16:30:00	9.145	0.0383	5914.97	314.29	6118.93	528.55	8.64	43.9	31.7	2.74	390.46	2.44	314.55	767.87	2.42	218.37	528.55	0.72	15.12	0.99934
14/1/03	16:35:00	9.1717	0.0344	5939.51	294.44	5732.39	492.57	8.59	41.8	32	2.55	390.17	2.29	317	725.53	2.25	218.78	492.57	0.73	15.56	0.9994
14/1/03	16:40:00	9.2	0.0313	5963.05	282.53	5500.46	462.48	8.41	41.7	31.5	2.34	389.58	2.15	310.47	666.3	2.11	218.79	462.48	0.73	17.96	0.99913
14/1/03	16:45:00	9.23	0.03	5984.36	255.72	4978.63	413.88	8.31	41.1	31.7	2.16	388.6	1.93	312.82	602.48	1.88	219.58	413.88	0.72	19.28	0.9989
14/1/03	16:50:00	9.255	0.025	6004.76	244.8	4766.03	372.35	7.81	41	31.7	1.99	387.57	1.75	310.06	511.72	1.69	220.61	372.35	0.71	29.59	0.99889
14/1/03	16:55:00	9.2767	0.0217	6023.51	224.95	4379.49	328.9	7.51	39.5	31	1.83	387.53	1.56	315.7	436.65	1.5	218.93	328.89	0.67	38.73	0.99833
14/1/03	17:00:00	9.295	0.0183	6040.76	207.08	4031.6	288.38	7.15	38.4	30.2	1.62	387.57	1.2	308.49	371.48	1.29	222.75	288.38	0.64	29.15	0.99652
14/1/03	17:05:00	9.3117	0.0167	6056.37	187.23	3645.05	256.87	7.05	38.1	29.8	1.51	387.52	1.09	321.58	354.74	1.18	218.21	256.87	0.66	27.08	0.99753
14/1/03	17:10:00	9.325	0.0133	6070.15	165.39	3219.86	219.93	6.83	37.9	30	1.42	387.52	0.95	319.11	302.6	1.01	217.6	219.93	0.64	34.92	0.99585
14/1/03	17:15:00	9.335	0.01	6078.31	97.88	1905.61	177.79	6.53	37.1	29.5	0.97	387.55	0.83	311.12	259.37	0.82	217.53	177.79	0.62	45.5	0.99705
14/1/03	17:20:00	9.345	0.01	6086.46	97.88	1905.61	158.05	6.29	36.3	29.5	0.89	387.54	0.72	300.33	217.67	0.73	217.35	158.05	0.63	60.23	0.99765
14/1/03	17:25:00	9.3517	0.0067	6093.63	85.97	1673.69	93.543	6.12	35.5	29.2	0.53	373.93	0.43	302.8	129.64	0.43	219.07	93.54	0.6	81.74	0.98405
14/1/03	17:30:00	9.3583	0.0067	6100.71	84.97	1654.36	106.51	6.11	34.3	29	0.57	365.38	0.5	294.4	146.67	0.49	218.59	106.51	0.56	69.22	0.99258
14/1/03	17:35:00	9.3617	0.0033	6106.71	72.07	1403.11	85.587	6.1	33.2	29	0.44	358.51	0.41	291.8	120.69	0.39	217.99	85.59	0.58	79.4	0.99294
14/1/03	17:40:00	9.365	0.0033	6112.39	68.1	1325.8	78.918	5.95	32.5	28.7	0.43	356.25	0.38	294.34	110.82	0.36	217.41	78.92	0.55	80.63	0.99468
14/1/03	17:45:00	9.3683	0.0033	6118.06	68.1	1325.8	65.461	4.94	32	28.5	0.35	351.15	0.32	284.51	90.39	0.3	217.52	65.46	0.57	103	0.98008
14/1/03	17:50:00	9.3717	0.0033	6123.24	62.14	1209.83	46.994	3.88	31.3	28.2	0.25	342.14	0.24	288.93	67.94	0.22	217.17	46.99	0.52	113.7	0.97896
14/1/03	17:55:00	9.3733	0.0017	6127.76	54.2	1055.22	0	0	30.6	28.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.93194
14/1/03	18:00:00	9.3733	0	6131.7	47.25	919.93	0	0	30.2	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92158

## ประวัติผู้เขียน

นายสมชาย มานะพิทักษ์พงศ์ เกิดวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538 หลังจบการศึกษาเข้าทำงานในตำแหน่งนักวิจัยของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพีเอ็มเอ เป็นระยะเวลา 5 ปี ในปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้