

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

PV SYSTEM DESIGN USING NUMERICAL METHOD TECHNIQUE

แสนศักดิ์ ดออ่อน  
SANSAK DEEON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-329-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

PV SYSTEM DESIGN USING NUMERICAL METHOD TECHNIQUE



แสนศักดิ์ ดีอ่อน

SANSAK DEEON

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 47532  
วัน, เดือน, ปี..... 19 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-329-1

**PV SYSTEM DESIGN USING NUMERICAL METHOD TECHNIQUE**

**SANSAK DEEON**

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

**2003**

**ISBN 974-324-329-1**

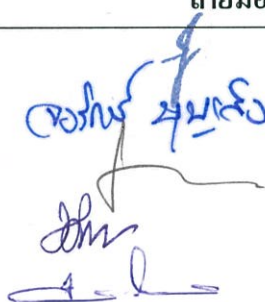
**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข  
PV SYSTEM DESIGN USING NUMERICAL METHOD TECHNIQUE  
ชื่อนักศึกษา นายแสนศักดิ์ คีอ่อน  
รหัสประจำตัว 39061034  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โพรธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน	
รศ.จรงค์ษ์ บุญเส็ง	
ผศ.ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์านุสรณ์	
ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์ โพรธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 เมษายน 2546 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่.....๒๓.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิค ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
นักศึกษา	นาย แสนศักดิ์ คีอ่อน
รหัสประจำตัว	39061034
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อการพัฒนาของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการช่วยประมาณค่าพลังงานจริงที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในช่วงเวลา และฤดูกาลต่างๆ โดยใช้การประมาณค่าและแทนกลุ่มข้อมูลด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่เหมาะสมจากการอ้างอิงข้อมูลคุณลักษณะของกระแสและแรงดันที่ได้จากการทดสอบทั้งภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจริงและชุดจำลองแสงอาทิตย์ ข้อมูลจากการทดสอบได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ รวมทั้งประกอบการพิจารณารูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด การประเมินผลและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยพื้นฐานของโปรแกรม MATLAB ผลการทดสอบใช้งานได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถจำลอง และวิเคราะห์ระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยฟังก์ชันโพลีโนเมียลที่ใช้ประมาณค่าของข้อมูล สามารถแทนกลุ่มข้อมูลจากการทดสอบได้มากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการทดลองที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกระแสที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอมีค่าที่แตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงอยู่ระหว่าง 8 เปอร์เซ็นต์

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบรวมไปถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น มุมเอียง และลักษณะการต่อร่วมแผงเซลล์ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ได้มีการนำไปใช้งานจริงกับระบบป้องกันการผุกร่อนของโลหะ และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

<b>Thesis Title</b>	PV System Design Using Numerical Method Technique
<b>Student</b>	Mr. Sansak      Deeon
<b>Student ID.</b>	39061034
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

### **ABSTRACT**

In this research project, the performance of PV modules has been investigated in order to develop a mathematical model, which will be used to estimate the real power generated by the PV modules in different times and seasons. Using the curve fitting technique, the mathematical model based on polynomial functions is approximated from the PV module's voltage and current characteristics under a natural light and sun simulator. The developed model can be used to predict the maximum power produced by the PV modules, to estimate the size of PV modules and battery, and to find the configuration of the PV modules for maximum power production. Developed using MATLAB, the proposed PV system design program gives accurate results as more than 98% of real data can be represented. When used in predicting the current dispatched from a battery, it yields a small error of 8% as compared with the experimental results.

The developed software can be used to analyse system stability and other parameters such as tilte angle and connection patterns that affect the power generation of the modules. The output data from the software will be used in designing a stand-alone PV system. Also, the program has been applied for a cathodic protection system which can provide the good results.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจากท่าน รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่างๆและเงินทุนสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย

ขอขอบคุณเป็นพิเศษต่อคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับองค์ความรู้พิเศษเฉพาะทาง และแง่คิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอันได้แก่

รศ.ผศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ รวมทั้งความกรุณาที่ให้เกียรติและสละเวลาร่วมวิจัย และนำเสนอบทความวิชาการในต่างประเทศ

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับ ฟิสิกส์และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำหรับแนวทางการพัฒนาเกี่ยวกับคณิตศาสตร์เชิงตัวเลข

รศ.ดร.ศิริชัย เทพา ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์เทียมจากชุดจำลองรังสีแสงอาทิตย์(SOLAR SIMULATOR )

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ประกอบการทดสอบเก็บข้อมูลตลอดโครงการวิจัย รวมทั้งผู้ที่มีได้กล่าวนามไว้ข้างต้นทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และเหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณ บิดาและมารดาที่ได้คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน รวมทั้งโอกาสที่ดีสำหรับการศึกษา จนถึงปัจจุบัน

แสนศักดิ์ คีอ่อน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II	
กิตติกรรมประกาศ.....	III	
สารบัญ.....	IV	
สารบัญภาพ.....	XI	
สารบัญตาราง.....	XVII	
บทที่ 1 บทนำ		
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1	
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2	
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2	
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3	
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4	
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4	
บทที่ 2 ระบบจ่ายพลังงาน ไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์.....		6
2.1 กล่าวนำ.....	6	
2.1.1 การใช้ประโยชน์เชิงความร้อน (Thermal Application).....	7	
2.1.2 การใช้ประโยชน์เชิงไฟฟ้าโดยตรง (Direct Electric Conversion).....	7	
2.1.3 การใช้ประโยชน์เชิงเคมี (Photochemical Conversion).....	7	
2.2 สรุปสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน และแนวโน้มการใช้งาน ในอนาคต.....	10	
2.2.1 สาระสำคัญของนโยบาย แผน และแนวทางการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ พ.ศ. 2540-2544.....	10	
2.2.2 นโยบาย แผน และสถานภาพของการวิจัยพัฒนาและการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....	11	
2.2.3 สถานภาพและแนวโน้ม.....	12	
2.2.3.1 สถานภาพของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....	12	
2.2.3.2 แนวโน้มของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....	13	
2.2.4 แนวโน้มที่ควรจะเป็นในประเทศไทย.....	15	
2.2.5 ปัญหาในการพัฒนา และแนวทางแก้ไข.....	17	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การวิเคราะห์รังสีแสงอาทิตย์.....	19
2.3.1 การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์.....	19
2.3.2 การวัดและการเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์.....	22
2.3.2.1 เครื่องมือวัดความเข้มและพลังงานแสงอาทิตย์.....	25
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ และการประยุกต์ใช้งาน.....	26
2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์.....	30
2.4.2 การพิจารณาดำเนินงาน และมุมในการติดตั้งที่เหมาะสม.....	38
2.4.2.1 มุมเอียง และ ปริมาณแสงที่ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2.4.2.2 การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสม.....	42
2.4.3 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
2.4.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	43
2.4.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	44
2.4.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	44
2.4.3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	45
2.4.4 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
2.4.4.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
2.4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
2.4.4.4 คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	54
2.5 การศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์.....	55
2.5.1 การจัดสมมูลพลังงานของระบบ.....	55
2.5.2 ความสิ้นเปลืองกำลังสูงสุดของเซลล์หนึ่งตัวในแผงเซลล์.....	58
2.5.3 รูปแบบการต่อเซลล์อย่างอนุกรม และขนาน.....	62
2.6 แบตเตอรี่.....	67
2.6.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	67
2.6.2 การใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	67
2.6.3 การป้องกันผลกระทบของแบตเตอรี่ที่เกิดจากการปล่อยประจุเกิน.....	71
2.6.4 การพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	73

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.5 การพิจารณาลักษณะของโหลดภาระ.....	74
2.6.5.1 คาบเวลาของโหลดภาระ.....	75
2.6.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบของโหลดภาระ.....	76
2.6.6 การพิจารณาความจุของแบตเตอรี่.....	76
2.6.6.1 การหาจำนวนแบตเตอรี่ที่จะต่ออนุกรมกัน.....	77
2.7 อุปกรณ์ประกอบสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	80
2.7.1 BOS (Balance of system).....	80
2.7.2 Power Conditioning System (PCS).....	82
2.7.3 ชุดควบคุมจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	83
2.7.4 อินเวอร์เตอร์.....	84
2.7.5 อุปกรณ์ควบคุม.....	86
2.8 บทสรุป.....	87
บทที่ 3 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	88
3.1 กล่าวนำ.....	88
3.2 การหาค่าแทรกแบบไพลน์ (Spline Interpolation).....	88
3.2.1 สไพลน์เชิงเส้น (Linear Splines).....	89
3.2.2 สไพลน์กำลังสอง (Quadratic Splines).....	90
3.2.3 สไพลน์กำลังสาม (Cubic Splines).....	93
3.3 การปรับโค้ง ( Curve Fitting ).....	96
3.3.1 การศึกษาปัญหาทั่วไป.....	96
3.3.2 ความผิดพลาดต่ำสุด.....	97
3.3.3 วิธีของ Least Square.....	98
3.4 อินทิเกรชันเชิงตัวเลข.....	105
3.4.1 กฎ Trapezoidal.....	106
3.4.2 กฎของ Simpson.....	108
3.4.3 กฎของ Simpson สามส่วนแปด (three-eight).....	110
3.4.4 กฎของ Weddle.....	110

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.5 ความผิดพลาดในสูตรการหาอินทิเกรตแบบ Trapezoidal และ Simpson.....	112
3.4.5.1 ความผิดพลาดในสูตรของ Trapezoidal.....	112
3.4.5.2 ความผิดพลาดจากการใช้สูตร Simpson.....	115
3.4.6 รอมเบอร์กอินทิเกรชัน (Romberg integration).....	119
3.4.7 สูตรของ Newton-Cotes.....	120
3.5 บทสรุป.....	122
บทที่ 4 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	123
4.1 กล่าวนำ.....	123
4.2 การวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยกราฟคุณลักษณะ.....	123
4.2.1 ความคู่ควรกันระหว่างสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่.....	123
4.2.2 ระบบซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี.....	127
4.2.3 ระบบประกอบด้วยตัวคุมค่าแรงดันบนโหลด.....	133
4.3 การสร้าง และทดสอบ โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	133
4.3.1 การทำงานของโปรแกรม.....	133
4.3.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	139
4.3.3 การทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์.....	144
4.3.3.1 การประมาณค่าระหว่าง และการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม.....	144
4.3.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข.....	146
4.3.3.3 การทดสอบการประมาณค่าด้วยเส้นที่เหมาะสม.....	147
4.3.3.4 การทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจริง.....	149
4.4 กรณีศึกษา การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อใช้กับระบบป้องกัน การสุกร่อนของท่อโลหะ (ส่วนที่ 1 : หลักการ และเงื่อนไขการออกแบบใช้งาน).....	153
4.4.1 การวิเคราะห์ระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ.....	154
4.4.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ.....	157
4.4.3 รูปแบบการใช้งานของระบบป้องกันการสุกร่อนโดยวิธี Cathodic Protection.....	160
4.4.3.1 การป้องกันการสุกร่อนแบบ Sacrificial Anode.....	160
4.4.3.2 การป้องกันการสุกร่อนแบบ Impressed Current.....	162
4.5 บทสรุป.....	167

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองประยุกต์ใช้งานและผลการทดลอง.....	173
5.1 กล่าวนำ.....	173
5.2 การพิจารณานาถของระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่).....	173
5.2.1 หลักการและเหตุผล.....	173
5.2.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	173
5.2.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....	174
5.2.4 วิธีทดสอบ.....	176
5.2.4.1 หัวข้อการทดสอบ.....	176
5.2.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ.....	176
5.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	177
5.2.6 ผลการทดลอง.....	180
5.2.7 บทวิเคราะห์การทดลอง.....	182
5.3 การพิจารณาผลของมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	183
5.3.1 หลักการและเหตุผล.....	183
5.3.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	185
5.3.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....	188
5.3.4 วิธีทดสอบ.....	189
5.3.4.1 หัวข้อการทดสอบ.....	189
5.3.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ.....	190
5.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	191
5.3.6 ผลการทดลอง.....	191
5.3.7 บทวิเคราะห์การทดลอง.....	193
5.4 การพิจารณาผลการต่อร่วมแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	194
5.4.1 หลักการและเหตุผล.....	194
5.4.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	194
5.4.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....	195
5.4.4 วิธีทดสอบ.....	196

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.4.1 หัวข้อการทดสอบ.....	196
5.4.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ.....	196
5.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	197
5.4.6 ผลการทดลอง.....	198
5.4.7 บทวิเคราะห์การทดลอง.....	201
5.5 ศึกษาการดึงกำลังสูงสุดด้วยโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	202
5.5.1 หลักการและเหตุผล.....	202
5.5.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	202
5.5.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....	202
5.5.4 วิธีทดสอบ.....	203
5.5.4.1 หัวข้อการทดสอบ.....	203
5.5.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ.....	203
5.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	204
5.5.6 ผลการทดลอง.....	204
5.5.7 บทวิเคราะห์การทดลอง.....	206
5.6 กรณีศึกษาการจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานกับระบบป้องกัน การผุกร่อนของท่อโลหะ (ส่วนที่ 2 : การทดสอบระบบจริง).....	208
5.6.1 หลักการและเหตุผล.....	208
5.6.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	208
5.6.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....	209
5.6.4 วิธีทดสอบ.....	212
5.6.4.1 หัวข้อการทดสอบ.....	212
5.6.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ.....	212
5.6.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	215
5.6.6 ผลการทดลอง.....	215
5.6.7 บทวิเคราะห์การทดลอง.....	220

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	222
6.1 การทดสอบวิธีการเชิงเลข และอัลกิริทึมที่ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	222
6.2 การทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ .....	222
6.3 การนำโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ไปใช้วิเคราะห์ กับระบบทดสอบตัวอย่าง.....	223
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	224
6.5 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป.....	226
เอกสารอ้างอิง.....	228
ภาคผนวก.....	231
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของข้อมูลประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	231
ภาคผนวก ข. เครื่องมือ และอุปกรณ์ประกอบการวิจัย.....	244
ภาคผนวก ค. ข้อมูลสรุปสถิติภูมิอากาศ และความยาวนานแสงแดดที่กรุงเทพฯ ระหว่างปี 1969 - 2000.....	250
ภาคผนวก ง. ข้อมูลการทดสอบชุดจำลองรังสีแสงอาทิตย์.....	253
ภาคผนวก จ. ฐานข้อมูลการทดสอบชุดป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ.....	257
ภาคผนวก ฉ. ฐานข้อมูลการทดสอบชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด.....	273
ภาคผนวก ช. คู่มือการติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	292
ภาคผนวก ซ. รายละเอียดคำสั่งที่สำคัญของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ สำหรับโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	307
ภาคผนวก ฌ. ผลงานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	316
ประวัติผู้เขียน.....	339

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ลำดับขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ.....	3
1.2 อัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ.....	3
2.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์บนแผ่นระนาบแต่ละเดือนที่กรุงเทพฯ ในหน่วย kWh/m <sup>2</sup> .day.....	8
2.2 ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ ในแต่ละพื้นที่ของโลกในแต่ละช่วงเวลาในรอบปี.....	9
2.3 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์.....	19
2.4 สเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น.....	20
2.5 การเปรียบเทียบความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ค่าความรับอาบรังสีต่างๆ.....	22
2.6 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ.....	23
2.7 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ.....	24
2.8 เครื่องมือวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้น โลก.....	26
2.9 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานในลักษณะต่างๆ.....	27
2.10 การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของประเทศไทยด้วยภาพถ่ายจาก ดาวเทียมในระยะไกล.....	28
2.11 ความสัมพันธ์ของการเพิ่ม CO <sub>2</sub> ในชั้นบรรยากาศ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มขึ้น.....	29
2.12 การลดปริมาณลงของธารน้ำแข็งบริเวณขั้ว โลกจากผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม..	30
2.13 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์.....	31
2.14 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้น โลก.....	31
2.15 ผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลก จากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา..	32
2.16 การพิจารณามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์บน โลก.....	33
2.17 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาจากจุดอ้างอิงบน โลก.....	35
2.18 การเปลี่ยนมุม Azimuth angle ( $\psi$ ) ตามการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลาต่างๆ.....	36
2.19 ตำแหน่งของมุม Zenith angle ( $\theta_z$ ) และ Altitude angle ( $\alpha$ ).....	36
2.20 แสดงมุมที่เกิดจากพื้นผิว ได้แก่มุม Tile angle $\beta$ , Surface Azimuth angle $\psi$ และ Incident angle $\theta$ .....	37
2.21 การวัด และพิจารณาองค์ประกอบการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ บนพื้นเอียง.....	38
2.22 มุมประกอบต่าง ๆ สำหรับการพิจารณา มุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 ลักษณะแท่งผลึกซิลิกอน ก่อนการตัดเพื่อทำเป็นแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	43
2.24 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ.....	46
2.25 การเกิดคู่อิเล็กตรอน และ โฮลขึ้นเมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบลงบนเซลล์.....	47
2.26 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า.....	47
2.27 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ.....	48
2.28 การเปลี่ยนคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ.....	49
2.29 การพิจารณากราฟคุณลักษณะเฉพาะ เพื่อผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟิลแฟกเตอร์ และจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
2.30 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม และ ความต้านทานขนาน.....	52
2.31 ผลการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะเมื่อค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) เปลี่ยนแปลงค่าไป.....	52
2.32 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
2.33 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม.....	57
2.34 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน.....	58
2.35 ผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์.....	59
2.36 ผลการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน.....	60
2.37 ผลกระทบต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	60
2.38 สถานะการทำงานของชุดเซลล์เมื่อมีการลัดวงจร และเปิดวงจรภายใต้การรับอาบรังสีที่ต่างกัน.....	61
2.39 ลักษณะการต่อใช้งานของบายพาสไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด.....	62
2.40 การเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเฉพาะเมื่อนำเซลล์ที่มีคุณสมบัติต่างกันมาต่อร่วมกันแบบขนาน.....	63
2.41 วัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละวันในรอบปี.....	68
2.42 การทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศที่ต่างกัน.....	68
2.43 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความจุของแบตเตอรี่.....	70
2.44 ค่าเปอร์เซ็นต์ Depth of Discharge.....	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1 สถานะที่สโพลน์ดีกว่า โพลีโนเมียลการหาค่าแทรกอันดับสูงกว่าฟังก์ชันได้รับการปรับที่การเพิ่มขึ้นฉบับล้นที่ $(x = 0)$ .....	89
3.2 สโพลน์การปรับชุดของข้อมูลสี่จุด.....	91
3.3 การหาสโพลน์กำลังสอง (quadratic splines) ในกรณีที่ $n = 3$ .....	93
3.4 การประมาณฟังก์ชันจากจุดสังเกต 5 จุด ด้วยโพลีโนเมียลองศา 1.....	98
3.5 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีการของ Simpson.....	109
3.6 การหาความผิดพลาดตามวิธีการของ Simpson .....	115
3.7 อัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	122
4.1 การใช้กราฟวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่.....	124
4.2 ระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ การสร้างกราฟเพื่อหาจุดทำงานขณะที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่ และจ่ายให้โหลดในเวลาเดียวกัน...125	
4.3 จุดทำงานของระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ซึ่งอยู่ที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ.....	126
4.4 การหาจุดทำงานของระบบที่มีแบตเตอรี่อุดมคติ.....	128
4.5 แผนภาพรายชั่วโมงของกระแสโหลด และแบตเตอรี่ตลอด 24 ชั่วโมง.....	129
4.6 การวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยตัวติดตามควบคุมการทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (maximum power tracker).....	130
4.7 การวิเคราะห์ในระบบที่มีตัวคุมค่าแรงดันออก.....	131
4.8 การวิเคราะห์ในระบบที่มีแบตเตอรี่ ตัวติดตามควบคุมจุดกำลังสูงสุด และตัวคุมค่าแรงดันออก.....	132
4.9 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละส่วนสำหรับวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามวิธีการที่นำเสนอ .....	134
4.10 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์..135	
4.11 ลำดับขั้นตอนการคำนวณค่ากระแสในแต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	136
4.12 ผลการแสดงค่าในลักษณะรูปพื้นผิวโครงร่าง 3 มิติ ในลักษณะต่างๆจากข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	137
4.13 ผลการแสดงค่าในลักษณะของเส้นโครงร่าง.....	138
4.14 ผลการแสดงค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	139

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.15 ลำดับชั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข.....	140
4.16 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของข้อมูลตัวอย่าง....	148
4.17 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของระบบไฟฟ้า แสงอาทิตย์.....	149
4.18 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	153
4.19 พารามิเตอร์ และองค์ประกอบของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อ โลหะ ชนิดกัมมันต์...	155
4.20 วงจรสมมูลของค่าความต้านทานรั่วของท่อ และความต้านทานอนุกรม.....	156
4.21 การสูญเสียแรงดันที่ปลายทางของจุดลงดิน .....	157
4.22 พารามิเตอร์ประกอบตามระยะทางของท่อที่ป้องกัน .....	158
4.23 ความสัมพันธ์ของกำลัง ไฟฟ้าตัวกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง สำหรับท่อ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ที่ค่า $R_E$ ต่างๆ กัน.....	159
4.24 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode.....	161
4.25 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode .....	161
4.26 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current .....	162
4.27 สภาพของท่อ โลหะที่ยังไม่ได้รับการป้องกัน.....	163
4.28 สภาพการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในระยะเริ่มต้น.....	164
4.29 สภาพการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในช่วงสมดุลย์.....	164
4.30 สภาพของท่อ โลหะที่ไม่มีการผุกร่อน.....	165
4.31 ท่อ โลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วที่ต้องการป้องกันการผุกร่อน.....	166
4.32 ระบบการทำงานของชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อ โลหะ.....	168
4.33 อุปกรณ์ประกอบการติดตั้งใช้งานของชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อ โลหะ.....	169
4.34 ความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยแต่ละวันในรอบปี ณ. ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ.....	170
4.35 วิธีการวัดเพื่อหาค่าสภาพต้านทานของดิน.....	171
4.36 วิธีการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแส.....	172
5.1 การต่อระบบทดสอบการจ่าย โหลดภาระแบบต่อเนื่อง โดยมีแบตเตอรี่เป็นชุดสะสม พลังงาน.....	176

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.2 ลำดับขั้นสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการจ่ายโหลดภาวะแบบต่อเนื่อง ที่มีแบตเตอรี่เป็นชุดสะสมพลังงาน.....	177
5.3 การบันทึกค่าและแสดงผลด้วยโปรแกรม Excel.....	178
5.4 ผลลัพธ์การบันทึกค่ากราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	178
5.5 ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ค่ากระแสที่แต่ละส่วนของระบบ ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาตลอด 24 ชั่วโมง.....	179
5.6 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟที่ระบบมีความสมดุลกันของพลังงาน.....	180
5.7 ตัวอย่างการแสดงผล กรณที่พลังงานของระบบไม่สมดุลกัน.....	180
5.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการปรับมุมเอียงค่าต่างๆ ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ.....	183
5.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ ของแต่ละช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ.....	186
5.10 มุมประกอบต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณปริมาณรังสีตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	188
5.11 ลักษณะการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละรูปแบบที่ทำการวิเคราะห์.....	189
5.12 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตออกมาได้ในแต่ละรูปแบบการติดตั้ง.....	190
5.13 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเชิงตัวเลขที่ได้นำเสนอ.....	191
5.14 ผลการต่อร่วมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะอนุกรม และขนาน.....	196
5.15 องค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อ โลหะแบบ Impressed Current.....	209
5.16 ท่อโลหะที่ใช้ทดสอบการป้องกันการสุกร่อนแบบ Impressed Current.....	209
5.17 แอโนดชนิดแมกนีเซียมที่ใช้กับชุดป้องกันการสุกร่อนของท่อ โลหะแบบ Impressed Current.....	210
5.18 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กับชุดป้องกันการสุกร่อนของท่อ โลหะแบบ Impressed Current.....	211
5.19 การต่อระบบเพื่อทำการทดสอบใช้งานชุดป้องกันการสุกร่อนของท่อ โลหะแบบ Impressed Current.....	211
5.20 ปริมาณพลังงานเฉลี่ยที่ตกกระทบบนพื้น โลก ของแต่ละช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ.....	212

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.21 หัววัดแบบ Cu/CuSo <sub>4</sub> สำหรับการวัดตรวจสอบผลการใช้งานของป้องกันการ ผุกร่อนของท่อโลหะ.....	217
5.22 การวัดตรวจสอบผลการทำงานของป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ.....	217
5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่โหลดภาระ.....	218
5.24 ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กับพลังงานไฟฟ้าที่โหลด ภาระต้องการ.....	219
5.25 ผลการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของท่อที่ไม่ได้รับการป้องกันการผุกร่อน กับท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current.....	220
6.1 ภาพโดยรวมของห้องทดสอบมาตรฐาน และวัดผลลัพธ์ข้อมูลของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ที่มีการควบคุมพารามิเตอร์ และปัจจัยต่างๆ ได้.....	227

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสำรองประเภทต่างๆ เมื่อเทียบเป็นพลังงานความร้อน.....	6
2.2 การใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในประเทศไทย จนถึงปี พ.ศ.2540 .....	18
2.3 ค่าคงตัวสุริยะของดาวเคราะห์แต่ละดวงที่ระยะห่างต่างๆ กัน.....	30
2.4 การหาค่าเลขประจำวัน ในรอบ 1 ปี.....	34
2.5 สัมประสิทธิ์การปรับแก้ค่าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนของอุณหภูมิ.....	77
3.1 ตารางช่วยคำนวณสำหรับการปรับ โคงค์ด้วยโพลีโนเมียลองศา 1.....	101
3.2 ตารางช่วยคำนวณสำหรับการปรับ โคงค์ด้วยโพลีโนเมียลองศา 2.....	102
3.3 สัมประสิทธิ์สำหรับสูตรของ Newton - Cotes .....	121
3.4 ลำดับการพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักที่มีการซ้อนกัน.....	121
4.1 ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่ากับฟังก์ชันตัวอย่างที่ทราบผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว.....	148
4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $r^2$ ของฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า แสงอาทิตย์.....	152
4.3 ค่าสภาพต้านทานของคินชนิดต่าง ๆ กัน.....	159
5.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน ที่โหลดภาระขนาด 5 วัตต์.....	181
5.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 64 วัตต์จำนวน 1 แผง ที่โหลดภาระขนาด 3 วัตต์.....	181
5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแต่ละรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	192
5.4 ระยะเวลาการอัดประจุ และปล่อยประจุที่โหลดภาระค่าต่าง ๆ สำหรับแผงเซลล์ชนิด ผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	197
5.5 ปริมาณกระแสที่ได้รับจากการต่อรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	198
5.6 ปริมาณพลังงานที่ได้รับจากการต่อรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	199
5.7 การเปรียบเทียบผลการอัดประจุ สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	199
5.8 การเปรียบเทียบผลการปล่อยประจุ สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	200
5.9 ผลการอัดประจุและปล่อยประจุ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ที่โหลดภาระ 3 วัตต์.....	200
5.10 ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	204

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.11 ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด อะมอร์ฟิซิลิกอน.....	205
5.12 การเปรียบเทียบผลการดิ่งพลังงานสูงสุดกับวิธีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปแบบต่าง ๆ.....	206
5.13 ข้อมูลพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในแต่ละฤดูกาล.....	216
5.14 การวัดผลการป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะด้วยหัววัดแบบ Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	218
ผ.1.1 ข้อมูลคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	232
ผ.1.2 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	241
ผ.1.3 หน่วย และการแปลงค่าต่างๆ.....	242
ผ.1.4 สัญลักษณ์อักษรกรีก และคำอ่าน.....	242
ผ.1.5 ตัวอย่างคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ.....	243
ผ.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ประกอบการวิจัย (หมวดที่ 1 : ระบบ ไฟฟ้าแสงอาทิตย์).....	245
ผ.2.2 อุปกรณ์ประกอบการทดลองชุดป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ.....	247
ผ.2.3 เครื่องมือวัดตำแหน่งที่ตั้ง (GPS).....	248
ผ.2.4 เครื่องมือวัดประกอบการวิจัย.....	249
ผ.4.1 ผลการกระจายแสงภายใต้พื้นที่ทดสอบใช้งาน ของชุดจำลองแสงอาทิตย์ ในมุมมองต่างๆ.....	255
ผ.5.1.1 ผลการทดสอบสถานะการประจุแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	258
ผ.5.1.2 การทดสอบผลการป้องกันการฟุกร่อน ในช่วงเวลา 7 วันที่ทำการทดสอบระบบ (ตามมาตรฐาน NACE RP 0169-1992).....	258
ผ.5.1.3 ผลการป้องกันการฟุกร่อนหลังจากการจำลองสถานะการขาดพลังงานของระบบ เป็นเวลา 5 วัน (ตามมาตรฐาน NACE RP 0169-1992).....	258
ผ.5.2.1 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 1.....	259
ผ.5.2.2 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 2.....	261
ผ.5.2.3 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 3.....	263
ผ.5.2.4 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 4.....	264
ผ.5.2.5 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 5.....	267
ผ.5.2.6 ผลการทดสอบระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อ โลหะ วันที่ 6.....	269

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.5.2.7 ผลการทดสอบระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 7.....	271
ผ.6.1.1 ผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์.....	275
ผ.6.1.2 ผลการวัดค่าอุณหภูมิจากการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสง อาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์...	279
ผ.6.1.3 ผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 64 วัตต์.....	283
ผ.6.1.4 ผลการวัดค่าอุณหภูมิจากการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสง อาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนขนาด 64 วัตต์..	287

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบต่างๆกันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มที่จะมีการนำมาใช้งานกันมากขึ้นในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีสารพิษตกค้างที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญคือเป็นแหล่งพลังงานอันมหาศาลที่ได้เปล่าและมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ

ในการใช้งานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโหนดที่มีการใช้งานต่อเนื่อง ถ้าเป็นระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงมักจะพบปัญหาเรื่องเสถียรภาพของระบบ เมื่อมีการใช้งานกับระบบจ่ายไฟด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบเก็บพลังงานสำรอง หรือมีการออกแบบระบบเก็บสะสมพลังงานที่ไม่เหมาะสม ทั้งกรณีของระบบโดยลำพัง(stand alone) และการประยุกต์ใช้งานของระบบในลักษณะต่างๆ[1] หรือแม้จะเป็นระบบที่มีการออกแบบโดยเพื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่จนเกินความจำเป็น ก็มักจะมีปัญหาในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องหรือขนาดของระบบจะต้องใหญ่จนเกินความจำเป็นเพื่อที่จะให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานและจ่ายให้กับโหนดได้ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองและไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการออกแบบหรือการใช้งานสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณา :-

- พิจารณาในแง่มูลค่าเงินโยบาย ด้านสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต
- ขนาดที่เหมาะสมของระบบกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีข้อพึงพิจารณาที่แตกต่างกันออกไป
- ส่งผลถึงการพิจารณาพิทักษ์ของอุปกรณ์ต่อร่วมต่างๆ ในระบบที่เหมาะสม
- ความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์(ของระบบ PV) และในแง่มุมมองอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับระบบ
- การออกแบบระบบที่มีข้อจำกัดด้านการจ่ายพลังงานกับขนาด(น้ำหนัก)ของระบบที่จะนำไปใช้งาน เช่น ระบบของดาวเทียมและระบบการจ่ายพลังงานของระบบอวกาศยานต่างๆ บนอวกาศนอกโลก

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยใช้การทำดุลพลังงานระหว่างระบบย่อยทั้งหลายแล้วรวมกันเป็นระบบที่ใช้งานกันอยู่ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวจัดว่าเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินระบบในขั้นต้น และสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ง่าย ๆ มาช่วยทำงานได้

อย่างไรก็ตามการทำเช่นนั้นก็มีข้อจำกัดอยู่ เพราะว่าใช้สมมุติฐานว่าตัวเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่พอเหมาะกับค่าเฉลี่ยของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละวัน และเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ตามเวลาที่กำหนด ถ้าหากว่าเราต้องการวิเคราะห์ระบบซึ่งมีความจุการสะสมพลังงานต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเก็บสะสมในหนึ่งวัน หรือถ้าต้องการทราบว่ามิอะไรเกิดขึ้นบ้างภายในหนึ่งวันในแง่ของการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างระบบย่อยต่างๆ สิ่งเหล่านี้จะทำให้วิธีการทำดุลพลังงานจะใช้ไม่ได้ผล จึงนำมาซึ่งโครงการวิจัยนี้

โดยนำข้อมูลจากการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขก็จะทำให้เห็นถึงการใช้พลังงานในแต่ละช่วงเวลาของวันและจะทราบถึงขนาดของระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) ที่จะใช้งานได้เหมาะสมอีกด้วย ทำให้การควบคุมและจัดการด้านพลังงานเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ และจะทำให้การใช้งานและออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์มีความเหมาะสมถูกต้องและสะดวกยิ่งขึ้น

- ทำให้มีความเข้าใจถึงคุณสมบัติเฉพาะและการใช้งานของระบบสะสมพลังงานในรูปแบบต่างๆ สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์
  - นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทำการออกแบบกับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการใช้งาน โหลดที่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องได้อย่างถูกต้องและมีความเหมาะสม
- จะเป็นการพัฒนาและปรับปรุงระบบให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น สามารถนำไปใช้งานในกับระบบจริงต่อไปในอนาคตได้

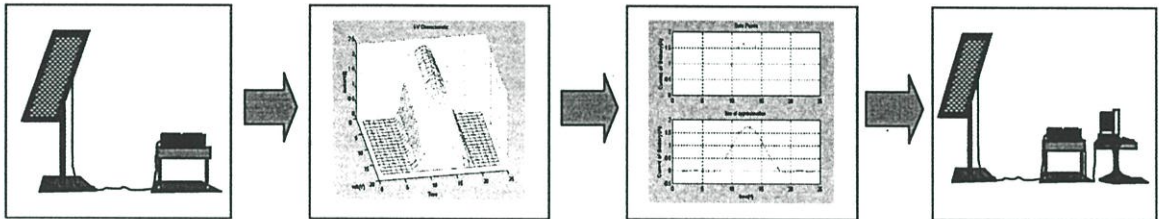
## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- นำเสนอด้านสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต
- การวิเคราะห์ และประยุกต์ใช้งานกับโหลดภาระที่ต้องการความต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือสูง
- การพิจารณาขนาดที่เหมาะสมของระบบสะสมพลังงาน สำหรับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อการจ่ายโหลดที่มีความต่อเนื่อง และต้องการความมีเสถียรภาพของระบบ
- เพิ่มสมรรถนะการจ่ายพลังงานของแหล่งจ่ายให้สูงขึ้นทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบสะสมพลังงาน
- สามารถนำวิธีการที่ได้นำเสนอไปใช้ในการออกแบบระบบจริง ซึ่งมีการใช้งานในสภาวะต่างๆ

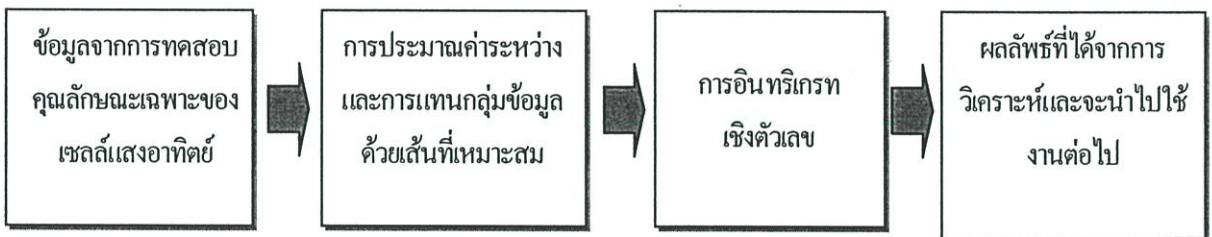
## 1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการพัฒนา รูปแบบและนำเสนอเนื้อหาวิธีการวิเคราะห์ในอีก รูปแบบหนึ่งโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งจะเป็นการพัฒนาในส่วนของการวิเคราะห์ด้าน พลังงาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบ และตัดสินใจเลือกใช้งานระบบที่เหมาะสม

โดยอาศัยวิธีการทำคุณพลังงานทางไฟฟ้า และใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ คือการวิเคราะห์เชิง เลข (Numerical Analysis) มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงการจ่ายพลังงาน การควบคุมและจัด การพลังงาน และใช้พิจารณาขนาดที่เหมาะสมของระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้ง จะนำมาซึ่งวิธีการวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้านการควบคุมและจัดการพลังงานด้วยวิธีการทางไดนา มิกส์ ซึ่งต่างจากวิธีการทำคุณพลังงานแบบเดิมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป และให้ผลที่ใกล้เคียงกับการ จ่ายพลังงานตามความเป็นจริงมากกว่าวิธีการคำนวณแบบเดิม



รูปที่ 1.1 ลำดับขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ



รูปที่ 1.2 อัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ

โครงการวิจัยนี้จะได้นำเสนอรูปแบบวิธีการวิเคราะห์ และการพิจารณาด้านพลังงานของระบบ จ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทางไฟฟ้า และอาศัยเครื่องมือทาง คณิตศาสตร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและหาผลเฉลย แทนการวิเคราะห์ออกแบบระบบใน ลักษณะเดิมที่มีการใช้งานกันอยู่ ซึ่งทำให้ผลเฉลยที่ออกมานั้นมีความถูกต้องแม่นยำและยังสามารถ นำวิธีการที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานและพัฒนาในการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วย แสงอาทิตย์ในสภาวะการใช้งานต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

อีกทั้งสถานที่ซึ่งไม่สามารถนำระบบไฟฟ้าปกติเข้าไปใช้งานได้และที่ห่างไกลต่างๆก็มักจะมีปัญหาเรื่องของการบำรุงรักษา การตรวจสอบและซ่อมแซมระบบถ้าระบบนั้นมีความชำรุดเสียหายเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการออกแบบระบบที่ไม่เหมาะสม และไม่ได้มีการตรวจสอบหรือทำการตรวจเช็คข้อมูลกลับจากข้อมูลที่ได้ออกแบบมา ซึ่งวิธีการที่ได้นำเสนอจะมีส่วนช่วยลดปัญหาดังกล่าวลงได้

นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการทำงานเพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยรวม เพื่อให้การใช้งานของระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

- ทำการจัดสร้างและพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบให้มีความสมบูรณ์และมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้งานจริงได้
- ทำการออกแบบพร้อมจัดสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อทำการทดสอบเก็บข้อมูลและปรับแต่งระบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ และเป็นการพิจารณาขีดความสามารถของรูปแบบและวิธีการที่ได้นำเสนอ
- ยกตัวอย่างงานในการออกแบบระบบเพื่อเป็นกรณีศึกษา และทดสอบการทำงานของระบบโดยรวม

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

- 1) ศึกษาค้นคว้าและหาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแบบ แต่ละชนิด ที่มีการใช้งานกันอยู่
- 2) ศึกษาถึงวิธีการเก็บสะสมพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ แต่ละรูปแบบ แต่ละประเภทของการใช้งาน
- 3) ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาคุณสมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะการใช้ต่างๆ
- 4) วิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการออกแบบระบบ ด้วยวิธีการทางที่ได้นำเสนอ กับวิธีการออกแบบโดยการทำคูลพลังงานแบบปกติ
- 5) ทำการจัดสร้างและพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงาน และช่วยออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เพื่อพิจารณาถึงการจัดการด้านพลังงานและให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

- 6) ปรับปรุงโปรแกรมให้มีการใช้งานที่เหมาะสม และมีความน่าเชื่อถือได้ เพื่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานต่อไป
- 7) ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อทดสอบการทำงานของระบบในสภาวะการใช้งานจริง โดยใช้ฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิมซึ่งได้จากการทดสอบระบบเป็นระยะเวลานานใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงประกอบการพิจารณา
- 8) ทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ และทำการเก็บบันทึกผลข้อมูลต่างๆ
- 9) แก้ไขและปรับปรุงระบบให้มีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือได้ สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 10) สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งนำเสนอผลงาน
- 11) สรุปผลการดำเนินงานขั้นสุดท้ายของงานวิจัย

## บทที่ 2

# ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

### 2.1 บทนำ

มนุษย์เราได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มานานแล้ว แต่ส่วนใหญ่จะใช้กันตามธรรมชาติ เช่น ใช้โดยตรงในการตากแห้งเนื้อสัตว์ และผลไม้ หรือการทำเกลือจากน้ำทะเลที่ทำกันในประเทศไทย เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้รับประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์โดยทางอ้อมเป็นจำนวนมาก กล่าวคือ ก่อให้เกิดพลังงานน้ำ ซึ่งใช้จากการระเหยของน้ำในมหาสมุทร และทำให้เกิดพลังงานลม ซึ่งได้จากการหมุนเวียนของบรรยากาศ เมื่อได้รับความร้อน

ในปัจจุบันแหล่งพลังงานต้นกำเนิดประเภทใช้หมดเปลือง (Fund Energy Source) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณทั้งหมดในโลก เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นพลังงานความร้อน แยกตามชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสำรองประเภทต่างๆ เมื่อเทียบเป็นพลังงานความร้อน

ชนิดของพลังงานต้นกำเนิด (Primary Energy)	ปริมาณสำรองที่นำมาใช้ได้คือ เทียบเป็นพลังงานความร้อน (หน่วยเป็น Joules : จูล)
ถ่านหิน	$30 \times 10^{21}$
ปิโตรเลียม	$6 \times 10^{21}$
แก๊สธรรมชาติ	$5 \times 10^{21}$
ยูเรเนียม	$2 \times 10^{21}$
รวม	$43 \times 10^{21}$

สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ประมาณว่าในปีหนึ่ง ๆ จะมีพลังงานที่ผ่านบรรยากาศมาตกกระทบบนผิวโลก (ทั้งพื้นดินและผิวน้ำ) ทั้งหมด  $1,000 \times 10^{21}$  จูล ซึ่งมากกว่าปริมาณสำรองของแหล่งพลังงานต้นกำเนิด ทั้งหมดในโลกดังกล่าวข้างต้นประมาณ 23 เท่า จะเห็นว่าโลกเรามีพลังงานรูปนี้ที่จะนำมาใช้ประโยชน์อย่างเหลือเฟือ ถ้าวิวัฒนาการทางด้านเทคนิคได้มีการปรับปรุงให้สามารถทำได้โดยใช้เงินลงทุนน้อยลงและให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะการที่จะนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง และกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและครัวเรือนนั้น ต้องประสบกับปัญหาต่าง ๆ มากมาย เช่น ทางด้านดินฟ้าอากาศ (Climatological problems) ซึ่งทำ

ให้อัตราการตกกระทบบนผิวโลกไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละวันและแต่ละฤดูกาล และทางด้านเทคนิค (Technical problems) ซึ่งทำได้ยากต่อการแปรรูปและพลังงานรูปอื่น ยากต่อการเก็บไว้ใช้ และความหนาแน่นของพลังงานรูปนี้ ต่อหน่วยพื้นที่มีอัตราต่ำ (Low area density of Energy incidence) ปัญหาทั้งหมดที่กล่าวนี้ทำให้การลงทุนทั้งพลังงานรูปนี้มาใช้ประโยชน์ยังอยู่ในเกณฑ์สูงมาก[2]

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการลงทุนนำพลังงานรูปนี้มาใช้ประโยชน์ยังอยู่ในเกณฑ์สูงมาก แต่ก็อาจเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าในอนาคต เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้นเปลือง และสามารถนำมาทดแทนพลังงานประเภทหมดเปลืองที่จะหมดไปในอนาคต ซึ่งทำให้ประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศได้พยายามศึกษา วิจัย และทดสอบนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาพัฒนาการนำพลังงานรูปนี้มาใช้ประโยชน์ ซึ่งพอสรุปแยกประเภทของการนำพลังงานไปใช้ได้ดังนี้

### 2.1.1 การใช้ประโยชน์เชิงความร้อน (Thermal Application) ซึ่งแยกได้ดังนี้

- 1) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้ต้มน้ำ ถลันน้ำ และหมูนมอเตอรี่ป้อนน้ำ เป็นต้น
- 2) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อใช้หมูน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การหุงต้ม และเตาเผา เป็นต้น
- 3) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก (Ultra-high Temperature) เพื่อหลอมเหล็ก และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เป็นต้น

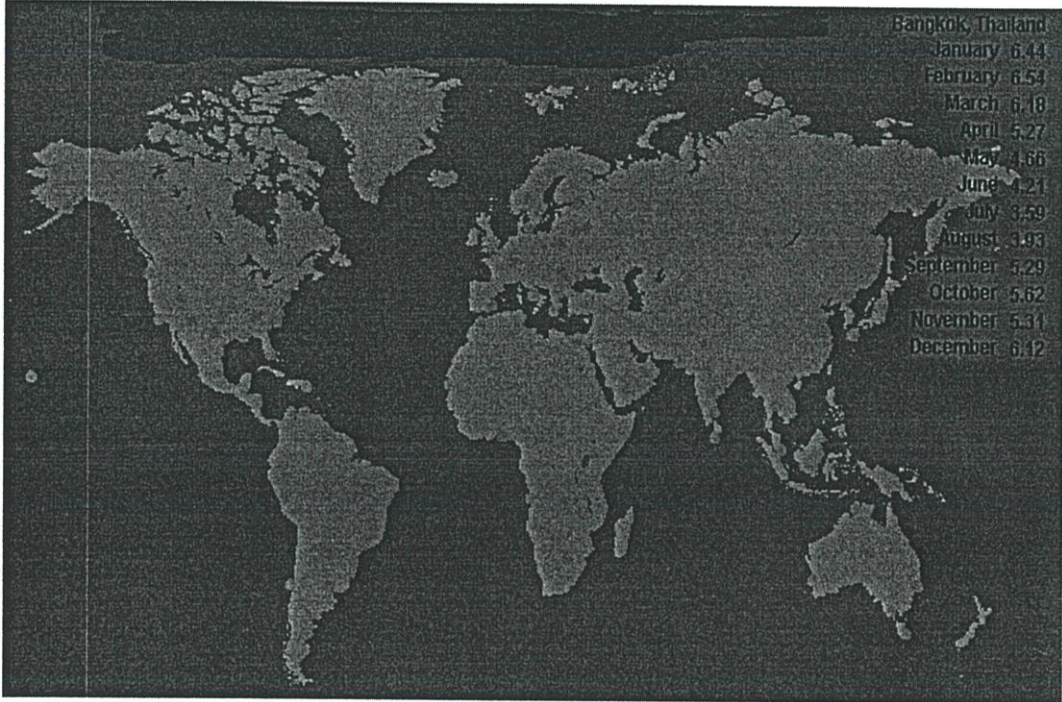
2.1.2 การใช้ประโยชน์เชิงไฟฟ้าโดยตรง (Direct Electric Conversion) ได้แก่การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic generator) ดังเช่น ในยานอวกาศสกายแล็ปจะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถให้กำลังไฟฟ้าขนาด 25 kW. เพื่อใช้ในยานอวกาศ และในการสื่อสารส่งมายังโลก

2.1.3 การใช้ประโยชน์เชิงเคมี (Photochemical Conversion) ได้แก่การผลิตเชื้อเพลิง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีของสารอินทรีย์

ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศได้ทำการวิจัย และพัฒนาการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งบางอย่างถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว เช่น เครื่องทำน้ำร้อนแบบ Flate – Plate Collector และ Solar cell สำหรับวัตถุประสงค์เฉพาะอย่างเช่น เครื่องมือสื่อสาร เป็นต้น

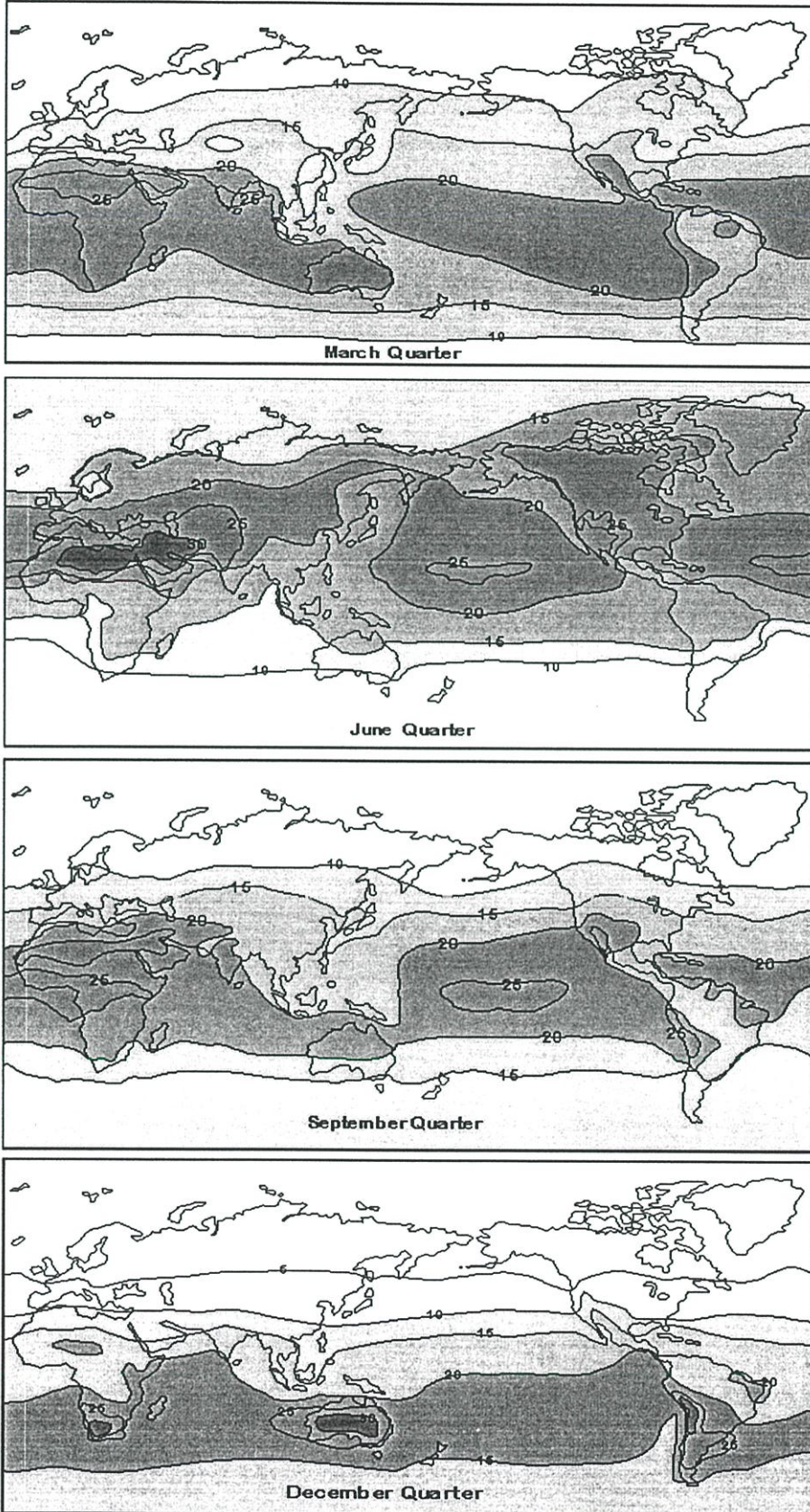
ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตที่นับว่า สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างดี (latitude  $5^{\circ}$  -  $21^{\circ}$  N, longitude  $91^{\circ}$  -  $106^{\circ}$  E) โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์บนแผ่นระนาบแต่ละเดือนที่กรุงเทพฯ ดังรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 ได้แสดงปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่แต่ละช่วงฤดูกาลในแต่ละพื้นที่บนโลก แต่ทั้งนี้ยังคงไม่มีการใช้งานหรือมีการพัฒนาการ

ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างจริงจังเท่าที่ควร นอกจากใช้ประโยชน์ตามธรรมชาติเท่านั้น เช่น ใช้ในการทำนาเกลือ อบหรือตากผลิตผลทางการเกษตร เช่น ไม้ ผลไม้ เนื้อสัตว์ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ในวงจำกัด



รูปที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์บนแผ่นระนาบแต่ละเดือนที่กรุงเทพฯ ในหน่วย kWh/m<sup>2</sup>.day

การพัฒนานำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้ได้อย่างจริงจัง และกว้างขวางจำเป็นต้องมีหน่วยงานปฏิบัติงานและรับผิดชอบโดยตรง ซึ่งในการกำหนดความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ในแต่ละพื้นที่ และฤดูกาลนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาข้อมูล เช่น ความเข้มและอัตราเฉลี่ยที่พื้นที่ที่หนึ่งมีพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเท่าใดต่อปี เพื่อให้ทราบและจะได้นำไปศึกษาต่อไปว่า ตามสถิติข้อมูลทางพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นอยู่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ (Application) แบบใดที่ประเทศต่างๆ กำลังค้นคว้าพัฒนากันอยู่มาใช้ได้ในอนาคต ยกตัวอย่างเช่น บางพื้นที่ในประเทศไทยอาจมีแสงอาทิตย์เข้ม และปริมาณตกกระทบปานกลาง ซึ่งอาจเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ในทาง High temperature thermal application เช่น ใช้ให้พลังงานความร้อนใน Steam Electric Generator หรือใช้เป็นพลังงานกลหมุนปั๊มน้ำ และถ้ามีปริมาณตกกระทบต่ำ อาจใช้ประโยชน์ในทางต้มน้ำ หรือทำความเย็นภายในบ้านและอาคาร เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ ในแต่ละพื้นที่ของโลกในแต่ละช่วงเวลาในรอบปี

## 2.2 รูปสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต

### 2.2.1 ตารางสำคัญของนโยบาย แผน และแนวทางการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน : พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ พ.ศ. 2540-2544

เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว ขณะเดียวกันก็มีการวิจัยและพัฒนาการผลิตเซลล์เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาถูกลง ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกมีกำลังการผลิตรวมทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 100 เมกะวัตต์ต่อปี และคาดว่าในปี พ.ศ. 2553 กำลังผลิตจะเพิ่มเป็น 800 เมกะวัตต์ต่อปี แต่ในกรณีที่ภาวะตลาดเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นจากปัจจัยบางอย่าง เช่น ราคาน้ำมันสูงขึ้น หรือปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม คาดว่าในปี พ.ศ. 2553 กำลังผลิตจะเพิ่มเป็น 4,000 เมกะวัตต์

เท่าที่รวบรวมได้ขณะนี้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกไปแล้วไม่ต่ำกว่า 760 เมกะวัตต์ (ข้อมูลถึงปี พ.ศ. 2538) โดยการติดตั้งขนาดใหญ่ที่สุดคือ 7 เมกะวัตต์ ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอตลอดปี แต่การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังคงจำกัดอยู่เฉพาะในสถาบันการศึกษา บางแห่ง สำหรับโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 3 แห่ง ที่มีอยู่ในปัจจุบันก็เป็นเพียงผู้นำเข้าเซลล์สำเร็จรูป และวัสดุจากต่างประเทศเพื่อประกอบเป็นแผงเท่านั้น โรงงานทั้ง 3 แห่ง มีกำลังผลิตประมาณ 3,000 กิโลวัตต์/ปี

ในด้านการใช้งานมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วประเทศไปแล้วทั้งหมดประมาณ 3,700 กิโลวัตต์ ซึ่งมากกว่า 85% จำกัดอยู่ในส่วนของราชการและรัฐวิสาหกิจ

ปัญหาและอุปสรรคสำคัญของการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ คือ ขาดมาตรการจูงใจในด้านการลดหย่อนภาษีที่จะให้มีการผลิตอุปกรณ์และการใช้พลังงานทดแทน ถึงแม้การใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายกรณีจะมีการคุ้มทุนในระยะยาวก็ตาม แต่ก็ยังได้รับความสนใจน้อย เนื่องจากการลงทุนขึ้นต้นสูงและไม่มีความจูงใจ

โดยเหตุที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถติดตั้งและใช้งานได้ง่าย รวมทั้งมีขนาดที่ยืดหยุ่นตามความต้องการของผู้ใช้ จึงควรเป็นทางเลือกทางหนึ่งสำหรับการพัฒนาชนบทให้มีความเป็นอยู่และรายได้ดีขึ้น โดยสามารถใช้ในการสูบน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค และการสูบน้ำเพื่อบรรเทาปัญหาภัยแล้งที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะในชนบทที่อยู่ห่างไกลและกันดาร นอกจากนั้นยังเป็นทางเลือกที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้าเพื่อแสงสว่างสำหรับหมู่บ้านในชนบทและชุมชนที่มีความต้องการไฟฟ้าในปริมาณต่ำ (ปลั๊กไม้กัหมื่นยูนิิต) นอกเหนือจากใช้กับระบบโทรคมนาคม และระบบวิทยุเพื่อการศึกษาในชนบท

จากศตวรรษที่ 21 เป็นต้นไปมีเหตุผลให้เชื่อได้ว่าจะมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีราคา การลงทุนใกล้เคียง โรงไฟฟ้าพลังความร้อน เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงจะสูงขึ้น และมาตรการทาง มลภาวะจะเข้มงวดขึ้น การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์จะเป็น ทางเลือกที่ดี และมีการใช้งานมากขึ้นในอนาคต โดยมีแนวทางในการวิจัยพัฒนาและสาธิตเซลล์ แสงอาทิตย์ระหว่างช่วงปี พ.ศ. 2540-2544 มีดังนี้

- 1) แผนการวิจัยและพัฒนาการผลิตตัวเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) แผนการวิจัยและพัฒนาาระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) แผนการวิจัยและสาธิตการใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
- 4) แผนการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์
- 5) แผนการส่งเสริมอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ
- 6) แผนการพัฒนาบุคลากร
- 7) แผนงานส่งเสริม เผยแพร่และแลกเปลี่ยนข้อมูล/เทคโนโลยี
- 8) แผนการแก้ไขปรับเปลี่ยนกฎหมายและระเบียบสำหรับรองรับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

โดยมีนโยบาย เพื่อส่งเสริมภาครัฐบาลและเอกชนให้มีการวิจัย พัฒนา สาธิต และผลิต ตลอดจนการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ให้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานคิ่่นรูปที่สะอาดไม่มีมลภาวะ และเป็นกรลดการพึ่งพาการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลใน อนาคต

### 2.2.2 นโยบาย แผน และสถานภาพของการวิจัยพัฒนาและการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

จากวิกฤตการณ์ด้านพลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาและวิจัยการ พัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงพลังงานแสงอาทิตย์ และจากปี พ.ศ. 2534 ทั่วโลกเริ่มตระหนักถึงปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นการช่วยกระตุ้นการพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่ สะอาด เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าในบางส่วน การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ แสงอาทิตย์นับเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางหนึ่ง เนื่องจากการนำพลังงานธรรมชาติที่ปราศจาก มลภาวะและมีอยู่อย่างมหาศาลมาใช้ให้เกิดประโยชน์

การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเด่น และมีความสำคัญแตกต่างจากวิธีอื่นหลาย ประการดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำ
- 2) ไม่มีการเคลื่อนไหวในขณะที่ใช้งาน จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านเสียง
- 3) มีการบำรุงรักษาน้อยและใช้งานแบบอัตโนมัติได้ง่าย
- 4) ประสิทธิภาพคงที่ไม่ขึ้นกับขนาด

- 5) เป็นลักษณะโมดูลที่สามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ
- 6) เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติและไม่หมดสิ้นให้เกิดประโยชน์
- 7) ผลิตไฟฟ้าได้ทุกแห่งแม้บนเกาะเล็ก ๆ กลางทะเล บนยอดเขา และในอวกาศ
- 8) ได้พลังงานไฟฟ้าโดยตรง การนำมาใช้งานสะดวกที่สุด เพราะการส่งและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง เสียง ความร้อน พลังงานจลน์กระทำได้ง่าย
- 9) เป็นการปูพื้นฐานเทคโนโลยีที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในศตวรรษที่ 21

## 2.2.3 สถานภาพและแนวโน้ม

### 2.2.3.1 สถานภาพของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

#### ■ สถานภาพในต่างประเทศ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเป็นเชิงการค้าส่วนใหญ่เป็นแบบซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกโพลี (Poly Crystalline) รวมกำลังผลิตทั่วโลกไม่ต่ำกว่า 100 เมกะวัตต์ต่อปี ผู้เกี่ยวข้องได้ให้ความสนใจและพยายามทำการวิจัยตลอดจนพัฒนาการผลิตให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพเพื่อขยายตลาดของเซลล์ให้กว้างขวางขึ้น งานต่าง ๆ ที่ดำเนินการอยู่มีหลายด้าน อาทิ :-

เทคโนโลยีแบบซิลิกอนขณะนี้มีการทำวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิต อันได้แก่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุแบบต้นทุนต่ำ เช่น การผลิตแบบผลึกโพลี หรือริบบอนซิลิกอน (หรือเทคโนโลยีที่ใกล้เคียง เช่น Dendritic Web) แทนผลึกเดี่ยว นอกจากนี้การผลิตแบบปริมาณมากก็สามารถลดต้นทุนได้อีกด้วย

เทคโนโลยีการผลิตเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจมาก เพราะเป็นเซลล์ที่คาดว่าสามารถผลิตให้มีราคาถูกที่สุด ปัจจุบันอยู่ในขั้นการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ถาวรและสูงขึ้น

เทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพอีกแบบหนึ่งซึ่งมีการวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวางคือ Multijunction Thin-Film นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและวิจัยวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำอย่างอื่นที่จะนำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Cadmium Telluride, Copper Indium Diselenide และ Gallium Arsenide เป็นต้น[3]

มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไปแล้วทั่วโลกไม่ต่ำกว่า 760 เมกะวัตต์ การติดตั้งที่ขนาดใหญ่ที่สุดในโลก คือ 7,000 กิโลวัตต์ ที่ San Louis รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา และ 2,000 กิโลวัตต์ ที่ Saijo ประเทศญี่ปุ่น ตามลำดับ

#### ■ สถานภาพในประเทศไทย

- 1) สถาบันการศึกษา

ประเทศไทยมีสถาบันการศึกษา 4 แห่ง ที่ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบัน คือ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยการผลิตเซลล์แบบผลึกเดี่ยว และผลึกโพลีซิลิกอน มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 สถาบันการศึกษาอีก 3 แห่ง ได้แก่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มีอุปกรณ์หรือห้องทดลองในการทดสอบแผงและระบบ นอกจากนี้สถาบันการศึกษาทั้งหมดดังกล่าว ยังมีโครงการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กอีกด้วย เช่น ใช้ในการสูบน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค และเพื่อการเกษตร ให้แสงสว่าง ดักแมลง และใช้สำหรับผู้เข็น (เก็บผักจีน) เป็นต้น

## 2) โรงงานประกอบเซลล์แสงอาทิตย์

โรงงานประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศมีอยู่ด้วยกัน 3 แห่ง โดยร่วมกับบริษัทต่างประเทศในลักษณะของการร่วมทุน และการให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคโนโลยี โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของโรงงานทั้ง 3 แห่ง ดังกล่าว ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำเร็จรูป และวัสดุส่วนใหญ่ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศแล้วนำมาประกอบในโรงงาน

ถึงแม้ว่าความสามารถในการผลิตรวมทั้งหมดในประเทศจะมีปริมาณ 3,000 กิโลวัตต์ต่อปี ก็ตาม แต่ความต้องการของตลาดในประเทศก็ยังมีไม่มากนัก และการส่งออกก็มีเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ต้องผลิตเป็นช่วง ๆ ตามความต้องการของตลาดเท่านั้น อย่างไรก็ตามในช่วงปี พ.ศ. 2535 นี้ ผลสืบเนื่องจากโครงการอีสานเขียวทำให้บริษัทผู้ผลิตในประเทศจำนวนสองแห่งมียอดขายเพิ่มขึ้นสูงมาก

## 3) ตลาดเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับตลาดในประเทศเท่าที่ผ่านมามีส่วนใหญ่เป็นหน่วยงานราชการ และรัฐวิสาหกิจ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 85% อีก 1% เป็นของมหาวิทยาลัย และวิทยาลัย นอกนั้นเป็นตลาดเอกชน ยอดรวมติดตั้งทั้งหมดภายในประเทศจนถึงปี พ.ศ. 2539 มีประมาณ 3,700 กิโลวัตต์

### 2.2.3.2 แนวโน้มของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

#### ■ แนวโน้มในต่างประเทศ

##### 1) สหรัฐอเมริกา

สหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่ใช้พลังงานมากที่สุดในโลก และเป็นประเทศที่มีความกว้างขวางทั้งทางด้านการศึกษา การผลิต และการใช้งาน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้อุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ของสหรัฐอเมริกาก้าวไปไกลสืบเนื่องมาจากการที่มีแผนและนโยบายที่มีเป้าหมายอย่างแน่ชัดที่จะลดราคาเซลล์แสงอาทิตย์ให้ถูกลง เพื่อแข่งขันกับราคาไฟฟ้าในตลาดปัจจุบัน โดยกระทรวง

การพลังงาน (Department of Energy, DOE) เป็นผู้รับผิดชอบโดยตรงต่อการวางนโยบายการผลิตพลังงานทดแทนต่าง ๆ โดยมอบหน้าที่ให้ Solar Energy Research Institute (SERI) เป็นผู้วางแผนและทำวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ และ Jet Propulsion Laboratories (JPL) เป็นผู้ทำวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังมีภาคเอกชนและรัฐวิสาหกิจเข้ามามีบทบาทร่วมด้วย โดยอัตราส่วนของงบประมาณที่ใช้มาจากภาครัฐบาล และภาคเอกชนประมาณ 50 ต่อ 50

สำหรับเป้าหมายในอนาคตระหว่างปี พ.ศ. 2538-2543 มีแผนการที่จะติดตั้งโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีกำลังผลิตระหว่าง 200-1,000 เมกะวัตต์ และพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ถึง 10-20% นอกจากนี้แผนระยะยาว (ระหว่างปี พ.ศ. 2553-2573) มีเป้าหมายที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเป็น 15-25% และจะให้กำลังผลิตติดตั้งประมาณ 1,000-15,000 เมกะวัตต์ คาดว่าราคาค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบนี้จะลดลงด้วยเช่นกัน

## 2) ญี่ปุ่น

ญี่ปุ่นซึ่งนับเป็นประเทศที่ได้รับความสำเร็จในด้านเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด ได้จัดทำ Sunshine Project ขึ้นเพื่อให้เป็นแกนกลางการวิจัยพลังงานทดแทน ซึ่งมีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก เมื่อปี พ.ศ. 2524 ได้จัดตั้งองค์การ New Energy Development Organization (NEDO หรือ New Energy & Industrial Technology Development Organization ในปัจจุบัน) ขึ้นรับผิดชอบ Sunshine Project โดยตรง มีหน่วยงานที่เข้าร่วมโครงการ ซึ่งมีทั้งสถาบันการศึกษาระดับมหาวิทยาลัย องค์การวิจัยของรัฐ/บริษัทเอกชนกว่า 20 แห่ง และบริษัทผลิตไฟฟ้าชั้นนำในประเทศ ญี่ปุ่น 8 แห่ง มีการตั้งเป้าหมายการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดให้ได้ไม่ต่ำกว่า 2,000 กิโลวัตต์ ระหว่างปี พ.ศ. 2534-2538

NEDO คาดว่าต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเรื่อย ๆ จนมีความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซลในพื้นที่ห่างไกล เช่น เกาะ และภูเขา สำหรับเป้าหมายระยะยาว NEDO จะส่งเสริมการวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิตลงให้เหลือ 20-40 บาทต่อวัตต์ ซึ่งจะสามารถแข่งขันได้กับการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั่วไป

## 3) ประเทศอื่น ๆ

ในยุโรปตะวันตกมีหลายประเทศที่มีการวิจัย พัฒนา ผลิต และติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนไม่น้อยเช่นกัน เช่น เยอรมนี อิตาลี ฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร เป็นต้น ในทวีปเอเชีย นอกจากประเทศญี่ปุ่นแล้วยังมีประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และอินเดีย ซึ่งผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในประเทศเป็นส่วนใหญ่อีกด้วย

ประเทศที่กำลังพัฒนาอีกหลาย ๆ ประเทศในทวีปแอฟริกาและเอเชีย มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ใช้งานขนาดเล็ก ซึ่งยังไม่สามารถรวบรวมเป็นตัวเลขอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับความช่วยเหลือจากประเทศอุตสาหกรรม

#### 4) แนวโน้มด้านการผลิต

ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 คาดว่าอุตสาหกรรมการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกจะมีการขยายเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 190-800 เมกะวัตต์ต่อปี ซึ่งจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2-8 เท่าของกำลังผลิตในปัจจุบัน และมากกว่า 50% ของการผลิตนี้เป็นของสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัท Texas Instruments, Inc. กำลังสร้างโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Spherical Silicon ขนาด 15-20 เมกะวัตต์ต่อปี มีกำหนดแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2537

##### ▪ แนวโน้มในประเทศ

ประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานใดของรัฐบาลที่จัดสรรงบประมาณ เพื่อการทำวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง ดังเช่น SERI ในประเทศสหรัฐอเมริกาหรือ NEDO ในประเทศญี่ปุ่น และอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีลักษณะเป็นการนำเข้ามาเซลล์แสงอาทิตย์จากต่างประเทศเพื่อนำมาประกอบและจำหน่าย

ซึ่งยังมีหมู่บ้านอีกจำนวนเกือบ 2,000 แห่ง (คิดเป็นประมาณ 5% ของหมู่บ้านทั้งหมดทั่วประเทศ) ที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังขยายไปไม่ถึง หากต้องการขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้ทั่วถึงครบทุกหมู่บ้านตามแผนการพัฒนาตามปกติจะใช้เวลานาน และเงินลงทุนสูง โดยเฉพาะหมู่บ้านเล็ก ๆ ในถิ่นทุรกันดารและอยู่ห่างไกลมาก

#### 2.2.4 แนวโน้มที่ควรจะเป็นในประเทศไทย

โดยที่ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันได้สูงถึง 165,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางกิโลเมตร ถ้าจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสนองความต้องการไฟฟ้าปัจจุบันทั่วประเทศในขณะนี้จะใช้พื้นที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 1,000 ตารางกิโลเมตร เท่านั้น ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและมีปริมาณแหล่งพลังงานฟอสซิลในประเทศสำรองจำกัด และคงจะต้องนำเข้าเพื่อสนองความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคตอันใกล้นี้

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2536 เป็นต้นมา ประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้งซ้ำซากมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการพัฒนาชนบทให้มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นตามนโยบายการขยายความเจริญสู่ชนบทของรัฐบาลและเพื่อบรรเทาปัญหาภัยแล้งนั้น การใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่เดิมจะล่าช้าและขยายไปได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนบทที่อยู่ห่างไกลในเขตทุรกันดารและแห้งแล้ง ซึ่งต้องการความช่วยเหลือในการพัฒนามากที่สุด เมื่อพิจารณาประกอบกับปัจจัยพื้นฐานอื่น ๆ ในประเทศแล้ว การสนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าควรเริ่มและเป็นไปตามแนวทางต่อไปนี้

- เพิ่มการใช้ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในหมู่บ้านชนบทห่างไกลส่วนที่เหลือ (เช่น แสงสว่าง ระบบสูบน้ำขนาดเล็ก โทรทัศน์) ให้มากยิ่งขึ้น

- เพิ่มอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อรองรับความต้องการภายในประเทศ และประเทศกลุ่มอินโดจีน และอาเซียน ซึ่งกำลังต้องการไฟฟ้าเพื่อพัฒนาชนบท
- สาธิต ติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก (1-5 กิโลวัตต์) แบบต่อเข้าระบบสำหรับบ้านที่อยู่อาศัยเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าส่วนเหลือใช้เข้าระบบจำหน่ายในลักษณะเดียวกับ Co-generation ซึ่งคาดว่าจะมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์
- สาธิตติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (1-10 เมกะวัตต์) แบบต่อเข้าระบบเพื่อใช้งานในลักษณะ Peak Shaving ในตอนกลางวัน
- ส่งเสริมการค้นคว้าวิจัยให้กว้างขวาง และต่อเนื่องสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้มีเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น และราคาถูกลงด้วย

นับว่าเป็นโอกาสอันดีที่จะส่งเสริมการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ให้กว้างขวางขึ้น โดยควรมีแผนดำเนินการทั้งระยะสั้นและระยะยาวดังนี้

#### ■ แผนระยะสั้น

- 1) เสนอรัฐบาลให้มีมาตรการจูงใจ เช่น การลดภาษีนำเข้า หรือนำมาลดหย่อนภาษีเมื่อมีการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) สาธิตและเผยแพร่การใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้กว้างขวางขึ้น และสนับสนุนให้มีการร่วมมือในการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล
- 3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในหมู่บ้านชนบทห่างไกลที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขยายสายส่งไฟฟ้าไปไม่ถึง
- 4) ศึกษาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น

#### ■ แผนระยะยาว

ในแง่ของการจัดสรรงบประมาณเพื่อใช้ในการดำเนินมาตรการต่าง ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเป็นอย่างมาก

- 1) ส่งเสริมการวิจัยให้กับทางภาครัฐบาลและเอกชนในการผลิตเซลล์ และอุปกรณ์ประกอบขึ้นในประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้ราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกลง
- 2) ส่งเสริมการตลาด สนับสนุนให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยกำหนดให้หน่วยงานรัฐบาลเป็นแกนนำในการส่งเสริมการใช้ ซึ่งหากราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกลงจะเป็นการส่งเสริมมาตรการการประหยัดไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง
- 3) ส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างจริงจังในชนบท เพื่อทดแทนการเดินสายส่งเข้าไป ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

## 2.2.5 ปัญหาในการพัฒนา และแนวทางแก้ไข

### ▪ ด้านกำลังคน

ปัจจุบันประเทศไทยอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงเศรษฐกิจและสังคมอย่างเด่นชัด ปัญหาทางด้านบุคลากรซึ่งมีจำนวนจำกัดเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินกิจการในทุกสาขาอย่างไม่อาจปฏิเสธได้ แต่การวิจัยทางด้านระบบเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันดำเนินการอยู่ในกลุ่มของบุคลากรซึ่งมีความสนใจเป็นพิเศษในสถาบันการศึกษาเพียงไม่กี่แห่ง หากรัฐบาลได้เพิ่มสิ่งจูงใจให้เกิดขึ้นแล้ว คาดว่าบุคลากรซึ่งมีความสามารถจะหันมาให้ความสนใจมากขึ้น

### ▪ ด้านงบประมาณ

ที่ผ่านมาในแต่ละปี การจัดสรรงบประมาณให้มีการวิจัย พัฒนา และสาธิตการใช้งาน ยังไม่ได้รับการสนับสนุนจากทางรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเท่าที่ควร ดังนั้นรัฐบาลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องควรมีการจัดสรรงบประมาณเพื่อการนี้โดยเฉพาะ

### ▪ การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชนบท

การนำเทคโนโลยีเข้ามาและการรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจะเป็นวิธีที่ช่วยให้ประหยัดเวลาในการวิจัยและพัฒนา การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและประสบการณ์ในหมู่นักวิจัยด้วยกัน ทั้งในภาครัฐบาลและเอกชนจะช่วยให้การวิจัยและพัฒนาดำเนินไปในแนวทางที่ถูกต้อง จึงควรที่จะมีการขอรับความช่วยเหลือจากองค์การระหว่างประเทศในการจัดฝึกอบรม/สัมมนา/ดูงาน ให้กับผู้วิจัยโดยตรง

### ▪ มาตรการการเงินการคลัง

แม้ว่าการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายกรณีจะมีความคุ้มค่าในระยะยาวดีกว่าระบบการผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ยังไม่ได้รับความสนใจ โดยทั่วไปเนื่องจากค่าลงทุนขั้นต้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่ามาก จึงควรได้รับการสนับสนุน/การจูงใจในรูปแบบต่างๆ จากรัฐบาล เช่น การลดหย่อนภาษีแก่ผู้ประกอบการ การลดภาษีเงินได้แก่ผู้ใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ สนับสนุนเงินทุนบางส่วน ซึ่งเป็นแนวทางที่ต่างประเทศนำมาใช้อย่างได้ผลแล้ว รวมทั้งการสนับสนุนด้านเงินทุนบางส่วน

เนื่องจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีค่อนข้างใหม่ และยังมีแนวทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาอีกมาก จึงสามารถจัดลำดับความสำคัญให้มีการทำวิจัยพื้นฐานอันจะนำมาสู่การผลิตระบบเซลล์ที่มีราคาถูกลง และมีประสิทธิภาพสูงในอนาคตเป็นอันดับหนึ่ง

ลำดับรองลงมา ควรสนับสนุนให้มีการติดตามและประเมินผลของงานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ติดตั้งไปแล้ว ซึ่งรวมถึงการเก็บข้อมูลทางเทคนิคด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล การเก็บข้อมูลความเป็นอยู่ และข้อคิดเห็นของประชาชนผู้ใช้ ตลอดจนข้อมูลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์และประเมินผล อันจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาในอนาคต

สำหรับงานสาธิต การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ตามความเหมาะสมของประเทศ รวมทั้งการพัฒนาบุคลากร อันจะเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานที่สะอาด ช่วยเพิ่มรายได้และคุณภาพชีวิต อีกทั้งยังเป็นการทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคต ก็ควรได้รับการสนับสนุนเช่นกัน

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการพัฒนาอันจะเกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติโดยรวมเป็นดังนี้

- ระดับประเทศ

หากมีการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์อย่างจริงจังแล้ว ตามแนวโน้มการใช้ตามโครงการที่จะเกิดขึ้นรวมกำลังผลิตประมาณ 7,960 กิโลวัตต์ คาดว่าจะเกิดผลดีดังนี้

- จะสามารถลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าลงได้ประมาณ 4.38 ล้านลิตร/ปี
- จะลดมลพิษ CO<sub>2</sub> ประมาณ 1,000-12,000 ตัน/ปี
- จะลด SO<sub>2</sub> ประมาณ 625-716 ตัน/ปี

- ระดับหมู่บ้าน

เป็นการช่วยพัฒนาชนบทให้มีความเป็นอยู่และรายได้ดีขึ้น และเป็นการช่วยบรรเทาปัญหาภัยแล้งได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยเฉพาะในชนบทที่ห่างไกล

- ระดับผู้ประกอบการ

เป็นการก่อให้เกิดพื้นฐานด้านอุตสาหกรรมการผลิตระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นในประเทศ อันจะก้าวไปสู่การส่งออก โดยเฉพาะประเทศกลุ่มอินโดจีน และอาเซียน ซึ่งเป็นการสร้างงานได้อีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 2.2 การใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในประเทศไทย จนถึงปี พ.ศ.2540

ลักษณะงาน/ผู้ใช้	กิโลวัตต์สูงสุดติดตั้ง										
	จพ	กฟผ	กท	ศร	สร	มท	ทพ	กฟภ	ทศท	ทอว	อื่นๆ
- หมู่บ้านพื้นที่ห่างไกล								(60+60+30)			2
- สื่อสาร (สถานีทวนสัญญาณ)		8	10						100		30
- ชูบน้ำ						40	10				(5+10)
- สถานีเคมิจากแบตเตอรี่						51					2
- ประถมศึกษาพื้นที่ห่างไกล				15							3
- สาธารณสุขพื้นที่ห่างไกล					1-2					7	5
- ไฟสัญญาณ ฯ		8									
- ระบบผลิตไฟฟ้าร่วม/ต่อเข้าระบบ (โครงการสาธิต)		27									
		+14									20
- เบ็ดเตล็ด เช่น แสงสว่าง/ทีวี	1-2	12		5			5				

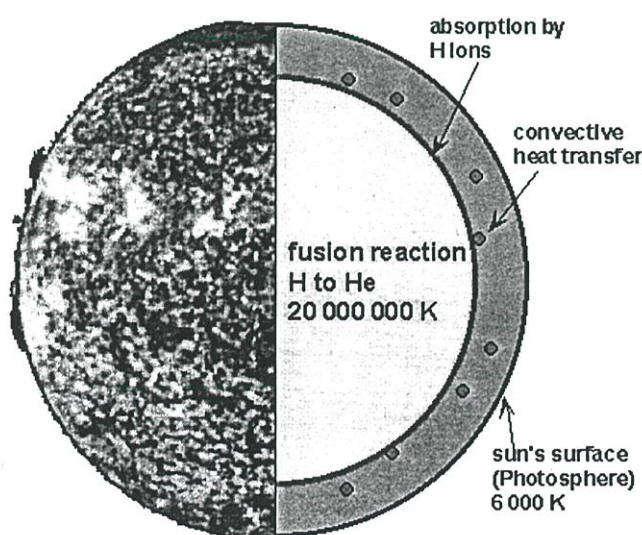
หมายเหตุ :

จพ	=	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กฟผ	=	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
กท	=	กระทรวงกลาโหม
ศร	=	กระทรวงศึกษาธิการ
สธ	=	กระทรวงสาธารณสุข
มท	=	กระทรวงมหาดไทย
พพ	=	กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน
กฟภ	=	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ทศท	=	องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย
พอสว	=	มูลนิธิแพทย์อาสาในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี
อื่น ๆ	=	อื่น ๆ (รวมโครงการอีสานเขียว)

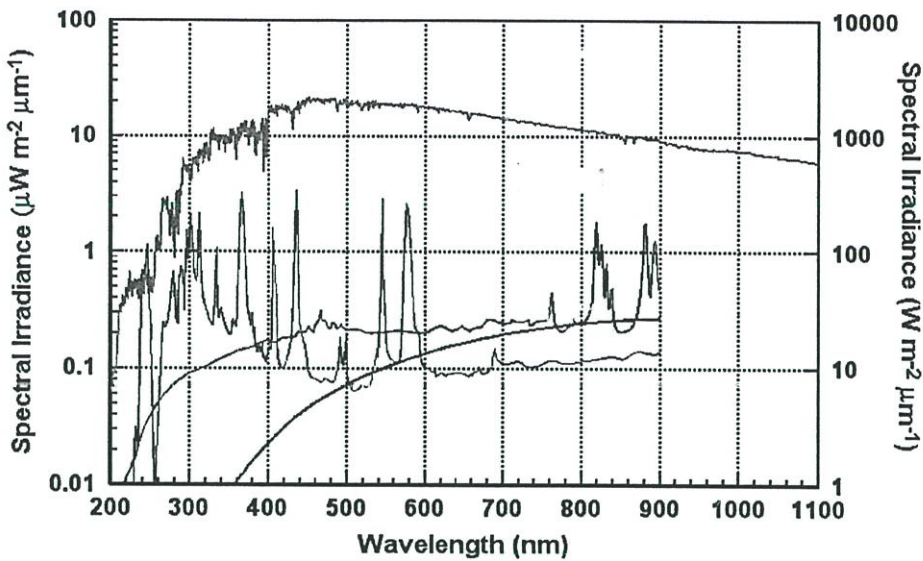
## 2.3 การวิเคราะห์รังสีแสงอาทิตย์

### 2.3.1 การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดของพลังงานมหาศาล และสำคัญที่สุดของมวลมนุษยชาติ โดยมีโครงสร้าง และสเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ เป็นดังรูปที่ 2.3. และ รูปที่ 2.4 ตามลำดับ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยปราศจากการเผาไหม้และการเคลื่อนไหวน้ำอันจะก่อให้เกิดมลภาวะใด ๆ



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น

การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์นั้นอาจแบ่งแยกประเภทได้ตามวัตถุประสงค์และชนิดของเครื่องมือ ดังนี้

1) ศึกษาทางด้านอุตุนิยมวิทยา และอุทกวิทยา โดยใช้เครื่องบันทึกช่วงเวลาที่แดด (Sunshine Duration Recorder)

2) ศึกษาทางการนำมาใช้ประโยชน์ทางพลังงาน โดยใช้เครื่องมือวัดและบันทึกอัตราตกกระทบของรังสี ประเภท Pyranometer, Solarimeter และ Actinometer ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Mechanical Type (Bimetallic) และ Thermoelectric Type

อย่างไรก็ตามในการใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาตามวัตถุประสงค์ในข้อ 2 นั้น ก็จะสามารถให้ข้อมูล เพื่อการศึกษาตามวัตถุประสงค์ในข้อ 1 ได้เป็นอย่างดี สำหรับประเทศไทยนั้น กรมอุตุนิยมวิทยาได้มีข่ายการวัดหาข้อมูลของแสงอาทิตย์ โดยติดตั้งเครื่องมือแบบ Solarimeter 2 เครื่อง ที่กรุงเทพฯ และเชียงใหม่ แต่ข้อมูลจากการวัดและบันทึกได้ใช้ไปเพื่อประโยชน์ทางอุตุนิยมวิทยาเท่านั้น อย่างไรก็ตามสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ได้เคยพยายามศึกษาการกระจายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยใช้การคำนวณประมาณค่าจากข้อมูลที่ได้จาก Sunshine recorder ของกรมอุตุนิยมวิทยา ดังปรากฏในรายงาน “The availability of solar Energy in Thailand” February 1976 by Dr.R.H.B. Excell ซึ่งค่าประมาณที่คำนวณได้ในจังหวัดต่าง ๆ เช่น เชียงราย เป็นสถานีที่มีเครื่องวัดและบันทึกจริงของสำนักงานพลังงานแห่งชาติติดตั้งอยู่ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแล้ว ค่าที่คำนวณได้ในรายงานจะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงโดยเฉลี่ยทั้งปีถึงร้อยละ 17 ฉะนั้นเพื่อศึกษาความเหมาะสมที่จะนำแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานอย่างจริงจัง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวัด (Measuring Network) เพื่อข้อมูลที่แท้

จริง ด้านการตกกระทบของรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy radiation) ด้วยเครื่องมือดังกล่าวในข้อ 2

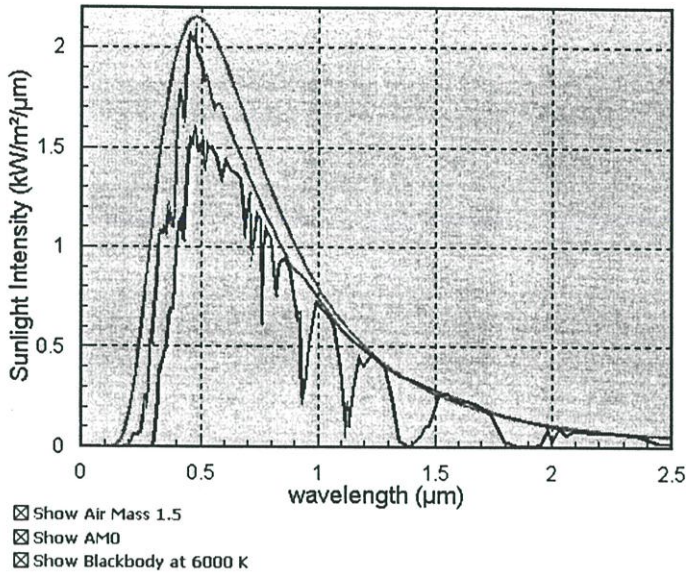
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นสำนักงานพลังงานแห่งชาติ จึงได้จัดตั้งข่ายการวัดเพื่อศึกษาข้อมูลด้านการกระจายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศ โดยในระยะเริ่มแรกได้ทำการติดตั้งสถานีวัดและบันทึกพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือวัด และบันทึกแบบ Mechanical Pyranograph "bi-metallic" โดยติดตั้งเครื่องวัดฯ เหนือระดับพื้นดินประมาณ 1.30 เมตร ซึ่งในปี 2518 ได้ติดตั้งและวัดข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 4 สถานี ที่กรุงเทพฯ อุบลราชธานี อุตรธานี และเชียงราย ส่วนในปี 2519 ได้ติดตั้งเครื่องวัดหาข้อมูลอีกจำนวน 3 สถานี ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ และขอนแก่น ในปี 2520 ได้ติดตั้งอีก 3 สถานี

การสำรวจศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 : การศึกษาเบื้องต้น โดยติดตั้งเครื่องมือวัดตามภูมิภาคต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ และจัดทำรายงานประจำปี

ระยะที่ 2 : การศึกษาโดยละเอียด เป็นการศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติมเฉพาะภูมิภาคที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น แสดงว่ามีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษาในขั้นนี้รวมถึงการรวบรวมข้อมูล และศึกษาลักษณะและความต้องการใช้พลังงานรูปต่าง ๆ ในปัจจุบันตามภูมิภาคนั้น ๆ

ปริมาณความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบตามข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดจะมีค่าเฉลี่ยประจำเดือน ประมาณ  $300-400 \text{ Cal.cm}^{-2} \text{ min.}^{-1}$  จากรูปที่ 2.5 ซึ่งระดับความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดนี้มากเพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ เช่น การต้มน้ำร้อน (Solar Water Heater) การทำน้ำกลั่น (Desalination) และการทำความเย็น (Solar Cooling) เป็นต้น ในประเทศไทยได้มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทำน้ำร้อนใช้ในโรงพยาบาล และสระว่ายน้ำบางแห่งบ้างแล้ว นอกจากนี้ระดับความเข้มฯ ดังกล่าวก็ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้อีก เช่น การสูบน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขับเคลื่อนกำลัง เป็นต้น การริเริ่มนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากในอนาคตสำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมและกำลังพัฒนา เพราะจะทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าและน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ส่วนหนึ่ง และสามารถนำพลังงานที่สงวนได้นั้นไปใช้ประโยชน์กับงานอื่นได้อีกด้วย อีกทั้งยังทำให้ประหยัดเงินตราต่างประเทศที่ต้องจัดซื้อพลังงานเข้ามา หากได้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์ โดยจัดตั้งเป็นรูปโครงการอย่างจริงจังแล้วก็อาจนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้รวดเร็วขึ้น



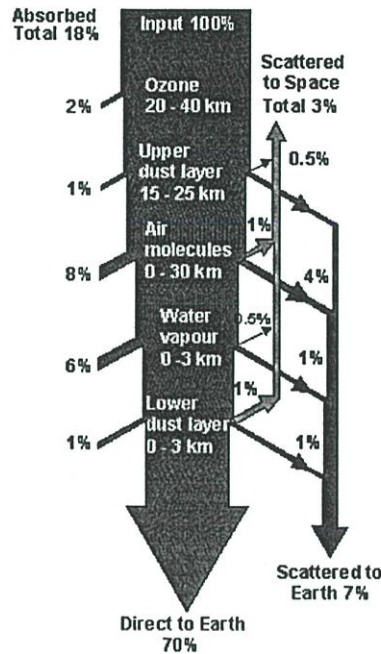
รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ค่าความรับอาบรังสีต่างๆ

งานศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในประเทศที่เจริญและพัฒนาแล้วว่ามีควมสำคัญมากอย่างหนึ่ง และถือว่ามีควมจำเป็นอย่างยิ่งในการวางพื้นฐาน การพัฒนานำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ต่อประเทศ สำหรับประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในเขตที่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ จึงควรมีข่ายการวัด (measuring network) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดยิ่งขึ้นในทุกภูมิภาค และพร้อมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ให้ได้รวดเร็ว และทันต่อสถานการณ์ในปัจจุบัน

โดยทั่วไปแล้วข่ายการวัดควรประกอบด้วย เครื่องวัดและบันทึกที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งได้ปรับค่าคลาดเคลื่อน (calibrate) ในการวัดกับเครื่องวัดอื่น ๆ ตามสถานีวัด การกำหนดตำแหน่งสถานีวัดควรให้กระจายอยู่ทั่วประเทศ และติดตั้งในพื้นที่ที่คาดว่าจะมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในพื้นที่นั้น ๆ ได้ในอนาคต ข้อมูลที่ได้จากแต่ละสถานีควรครอบคลุมได้โดยเฉลี่ยไม่มากกว่า 3 จังหวัด โดยสรุปก็คือข่ายการวัดของประเทศไทยควรมีสถานีวัดทั้งหมดประมาณ 24 สถานี

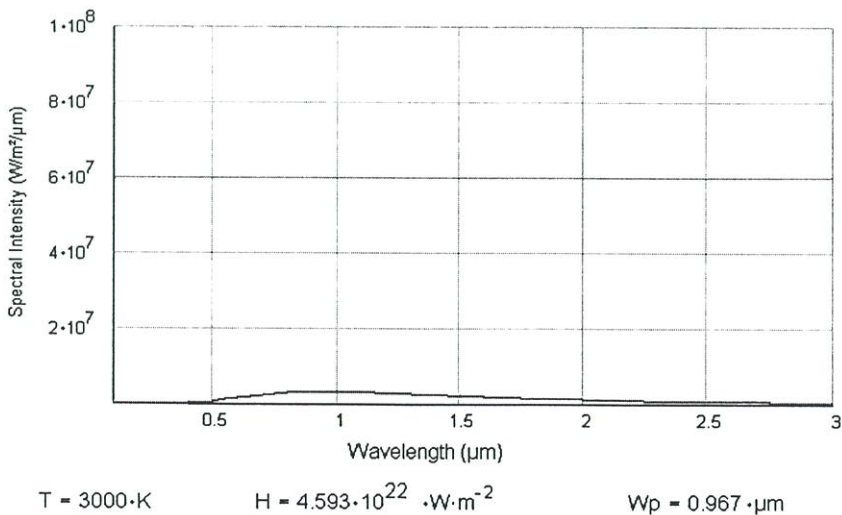
### 2.3.2 การวัดและการเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์

ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังพื้น โลกจะถูกลดทอน และดูดกลืนจากปัจจัยต่างๆ เช่น ชั้นโอโซน ไอน้ำ และฝุ่นละอองในอากาศ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่วนที่เหลือจะสามารถส่งผ่านมายังผิวโลกได้ โดยสามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเข้มการรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ของวัตถุดำเมื่อเปลี่ยนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 2.7

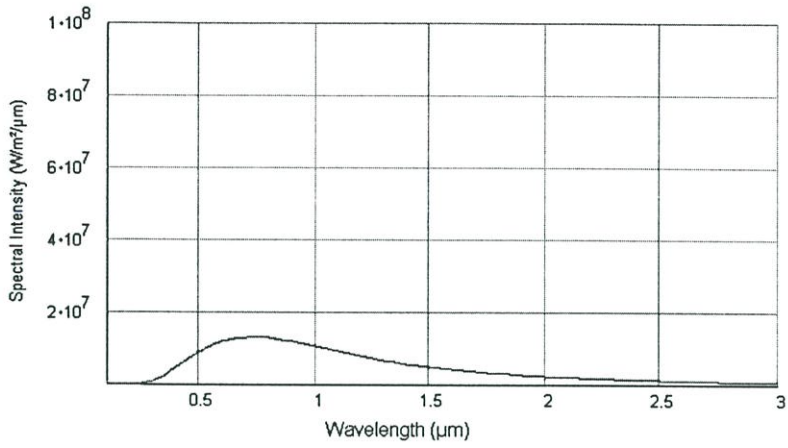


รูปที่ 2.6 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ

พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามความยาวคลื่น คือชนิดความยาวคลื่นสั้น ได้แก่ รังสีตรง และชนิดคลื่นยาว ได้แก่ รังสีกระจาย รวมทั้งการกระเจิงซึ่งมีผลมากในบริเวณที่มีภูมิประเทศปกคลุมด้วยหิมะ เป็นต้น[4] ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ที่ละเอียดและถูกต้องจำเป็นมาก เพราะจะทำให้การวิเคราะห์และประเมินศักยภาพ การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานรูปแบบต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด



2.7 (ก)

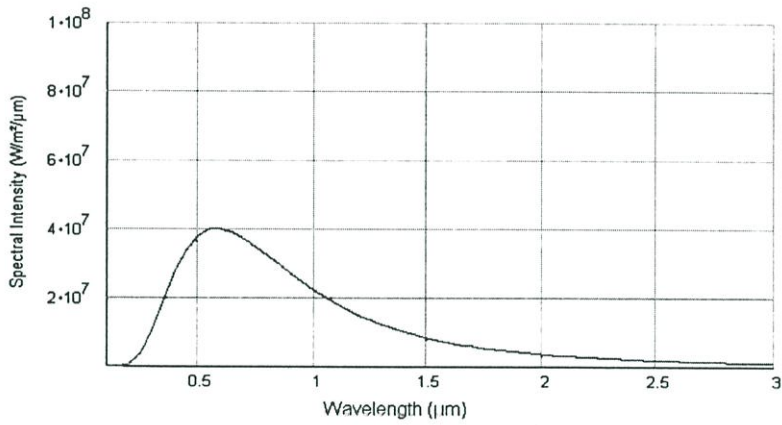


$T = 4000\text{-K}$

$H = 1.452 \cdot 10^{23} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

$W_p = 0.725 \cdot \mu\text{m}$

2.7 (ข)

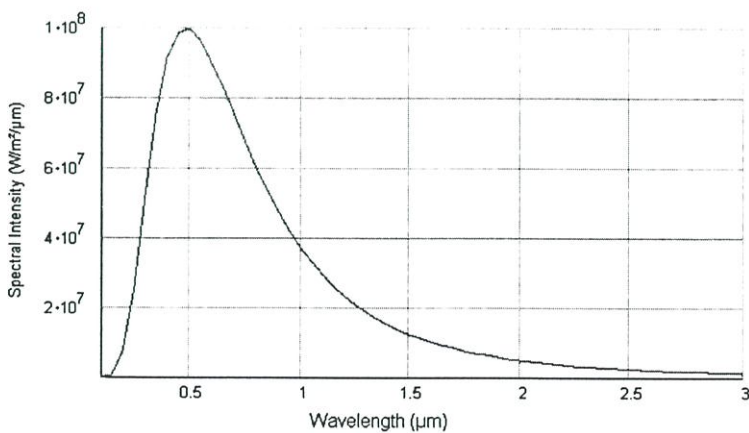


$T = 5000\text{-K}$

$H = 3.544 \cdot 10^{23} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

$W_p = 0.58 \cdot \mu\text{m}$

2.7 (ค)



$T = 6000\text{-K}$

$H = 7.349 \cdot 10^{23} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

$W_p = 0.483 \cdot \mu\text{m}$

2.7 (ง)

รูปที่ 2.7 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ

ก) ที่อุณหภูมิ 3,000 K    ค) ที่อุณหภูมิ 5,000 K

ข) ที่อุณหภูมิ 4,000 K    ง) ที่อุณหภูมิ 6,000 K

### 2.3.2.1 เครื่องมือวัดความเข้มและพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องมือวัดความเข้มและพลังงานแสงอาทิตย์ที่สำคัญ แบ่งออกได้ 2 แบบ

1) ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) เป็นเครื่องมือวัดความเข้มรังสีตรงที่ตกกระทบตั้งฉาก ส่วนประกอบมีกระบอกหน้าต่างแคบสวมอยู่เพื่อกันรังสีกระจายเวลาหันไปที่ดวงอาทิตย์ตัวรับแสงเป็นเทอร์โมไพล์ นอกจากนี้จะต้องมีอุปกรณ์ติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อรับรังสีตรงไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่นิยมใช้กันเช่น Angstrom pyrheliometer, Abbot water flow pyrheliometer, Abbot silver disc pyrheliometer เป็นแบบ Kipp & Zonen

2) ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ใช้วัดฟลักซ์ของรังสีรวม (global solar irradiance or solar flux) คือรังสีตรง + รังสีกระจายที่ตกกระทบพื้นราบจากครึ่งทรงกลมหนึ่ง (มุมต้น =  $180^\circ$ ) อาจใช้ไพราโนมิเตอร์วัดเฉพาะรังสีกระจายเท่านั้น โดยการใช้แถบจานวงกลมบังแสงอาทิตย์ คือบังรังสีตรงเกิดเงาบังตัวรับแสงของเครื่อง และต้องแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการบังรังสีกระจายบางส่วน

เครื่องไพราโนมิเตอร์ที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบเอฟเพลย์ (Eppley pyranometer) วัดรังสีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 2800 nm มีครอบแก้วใสรูปครึ่งทรงกลม 2 อันซ้อน ภายในที่เป็นฐานประกอบด้วยวงแหวนสองวงหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร วางซ้อนในระดับเดียวกัน วงหนึ่งทาสีดำส่วนอีกวงทาสีขาว วงแหวนทั้งสองเชื่อมติดกับเทอร์โมไพล์ (thermopile) ซึ่งประกอบด้วยเทอร์โมคัมเบิลจำนวน 10 – 50 รอยต่อ อาศัยหลักการว่า ความต่างกันของอุณหภูมิระหว่างผิวดำกับผิวขาว (วงแหวนสีดำดูดกลืนความร้อน ส่วนสีขาวไม่ดูดกลืนความร้อน) ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายของเทอร์โมคัมเบิล เกิดกระแสไฟฟ้าในเทอร์โมไพล์จากนั้นก็เปรียบเทียบความต่างศักย์เป็นความเข้มหรือฟลักซ์ของรังสีแสงอาทิตย์ และอาจรวมในช่วงเวลาติดต่อกันเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ( $\text{Wh/m}^2$ ) อีกแบบที่นิยมใช้คือของ Kipp and Zonen ในช่วงความยาวคลื่น 305 – 2800 nm เป็นเทอร์โมไพล์แลต Moll – Gorczycki ประกอบด้วยเทอร์โมคัมเบิล 100 รอยต่อฝังในกระเบื้องเซรามิกส์[5] ใช้หลักการให้เทอร์โมไพล์ชั่วร้อนรับรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนขั้วเย็นทาสีขาวซ่อนไว้ใต้โคมบังแดด

นอกจากนี้ก็มีไพโรมิเตอร์แบบ Robitsch อาศัยหลักการขยายตัวของโลหะคู่ (ที่อุณหภูมิเดียวกันขยายและหดต่างกัน) แบบของ Yellott Solarimeter ใช้เซลล์สุริยะซิลิกอนหรือแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีกระแสเป็นปฏิภาคโดยตรงกับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ แต่การตอบสนองที่ความยาวช่วงคลื่นค่อนข้างจำกัดต้องมีการเทียบปรับค่ามาตรฐาน เครื่องไพร์เฮลิโอมิเตอร์ และไพราโนมิเตอร์จะต่อเข้าเครื่องนับเรียกว่าอินทิเกรเตอร์ เพื่อนับปริมาณรังสีติดต่อกันตลอดวัน สามารถอ่านความเข้มรังสี และฟลักซ์สุริยะในขณะเวลาใด ๆ หรืออินทิเกรตรวมแต่ละชั่วโมง หรือตลอดวันได้ พลังงานแสงอาทิตย์ ( $\text{Wh/m}^2$ ,  $\text{Wh/m}^2/\text{day}$ )



รูปที่ 2.8 เครื่องมือวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นโลก

นอกจากอุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องมือที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งคือ เครื่องวัดระยะเวลาของแสงแดดจ้ารายนวัน (sunshine duration) ได้แก่ Campbell-Stokes recorder มีลักษณะเป็นลูกแก้วทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 96 มิลลิเมตร เพื่อโฟกัสแสงลงบนแถบกระดาษเคมี กระดาษจะมีรอยไหม้เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูงเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ ความยาวของรอยไหม้แสดงช่วงเวลามีแดด ตัวเลขที่นำไปใช้ประโยชน์คือจำนวนชั่วโมงเฉลี่ยที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงจ้า (bright sunshine hour) สำหรับกระดาษเคมีเป็นแผนภูมิแบ่งเสกกลขีดละ  $\frac{1}{2}$  ชั่วโมง แผนภูมิมี่ 4 แบบใช้กับฤดูร้อน ฤดูหนาว ฤดูใบไม้ร่วง และฤดูใบไม้ผลิต โดยข้อมูลการวัดค่าดังกล่าวได้มีการแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

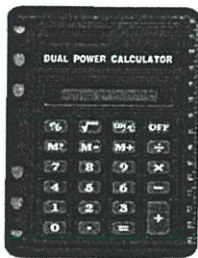
หมายเหตุ : คำนิยามของ “ความเข้มรังสี” (radiation intensity) คือพลังงานที่ผ่านพื้นราบสมมุติต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาต่อมุมตัน ซึ่งมีเส้นแบ่งครึ่งตั้งฉากกับพื้นราบนั้น หน่วย  $\text{MJ/m}^2/\text{s}$  หรือ  $\text{W/m}^2$  “ฟลักซ์รังสี (radiation flux)” หรือ “ความรับอาบรังสีสุริยะ (solar irradiance) คือพลังงานที่ผ่านพื้นราบสมมุติต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา และในทุกทิศทางของด้านหนึ่งของพื้นราบสมมุติ มุมตัน =  $180^\circ$  หน่วยเป็น  $\text{W/m}^2$  เช่นกัน

## 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ และการประยุกต์ใช้งาน

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกเป็นอย่างมาก โดยมนุษย์เองได้มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งในทางตรงและทางอ้อม รวมถึงการนำมาผลิตไฟฟ้า อันได้แก่ การผลิตไฟฟ้าจากเขื่อนพลังน้ำเมื่อน้ำได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ก็จะมีกระแสน้ำขึ้นสู่ท้องฟ้า และตกกลับลงมาสู่พื้นดินในรูปแบบของฝน

เมื่อเราเก็บน้ำนั้นไว้ในเขื่อนและปล่อยออกมาผ่านเครื่องจักรกลไฟฟ้า ก็จะทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาใช้งานได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในทางอ้อม ส่วนการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในทางตรง อันได้แก่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic System หรือ PV System) และเป็นหัวข้อที่จะนำกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับนำไปใช้งานได้โดยตรง[6]

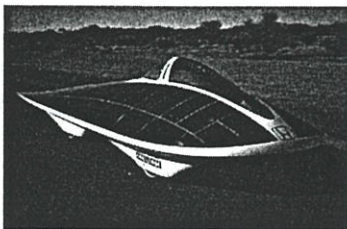
ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic System) เป็นกระบวนการใช้ประโยชน์จากการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าได้โดยตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ ณ วัณนี้การใช้งานระบบดังกล่าวมีการขยายตัวเป็นอย่างมาก นับได้ว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานทดแทนในรูปแบบหนึ่งที่มีความคุ้มค่าและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนพลังงานที่ได้จากรูปแบบอื่น ๆ ที่เกิดจากการแปรสภาพของซากพืชซากสัตว์ ที่ใช้งานกันอยู่ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีการเริ่มใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน โดยมีรายงานเกี่ยวกับการใช้ระบบดังกล่าวตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา และในปี ค.ศ. 1960 มีการวิจัยและพัฒนาให้นำไปใช้งานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอุตสาหกรรมด้านอวกาศ ส่วนการใช้งานตามบ้านเรือนทั่ว ๆ ไป และในงานด้านอื่น ๆ ขณะนั้นยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากมีต้นทุนค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในรูปแบบอื่น ๆ



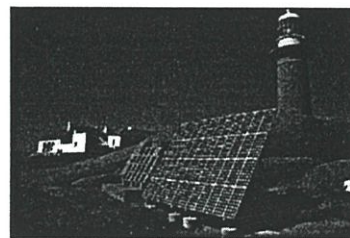
(ก)



(ข)



(ค)



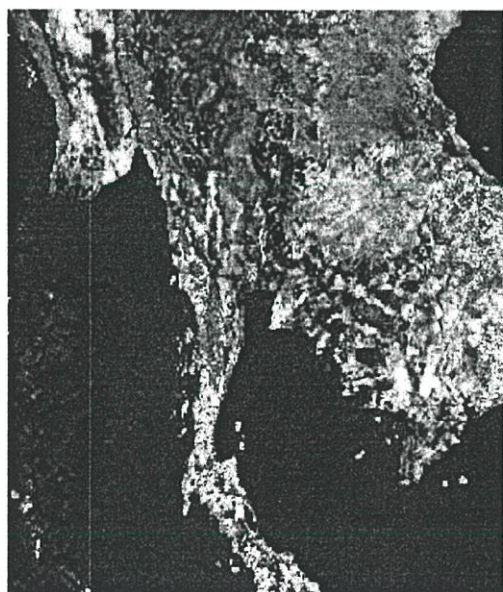
(ง)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานในลักษณะต่างๆ

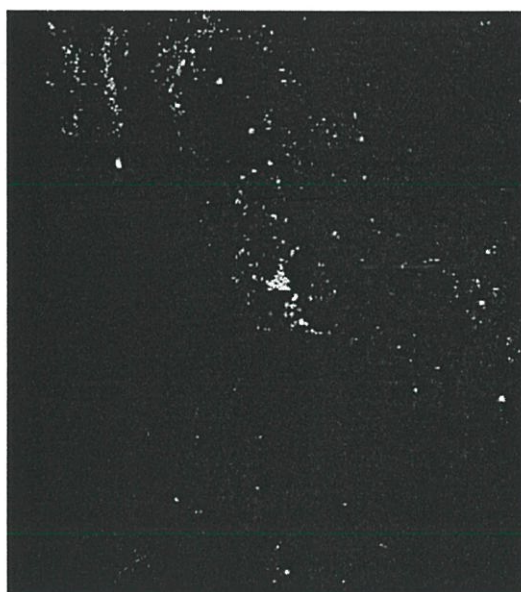
- ก) นาฬิกาข้อมือ    ค) รถไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์  
 ข) เครื่องคิดเลข    ง) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

การใช้เซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมส่งผลให้เทคโนโลยีทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำพวก ซิลิกอน มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วอีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญและเป็นทางเลือกของการใช้พลังงานในรูปแบบหนึ่ง ช่วงที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1970 อีกด้วยการใช้งานที่แพร่หลายของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ๆ คือใช้เป็นแหล่งพลังงาน สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กเช่น เครื่องคิดเลข และนาฬิกา เป็นต้น จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาใช้กับงานประเภทอื่นๆ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 4.9

นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ยังถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในพื้นที่ห่างไกล บริเวณที่เป็นป่าไม้และภูเขา รวมทั้งตามหมู่เกาะต่าง ๆ ในท้องทะเล ที่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถเข้าไปถึงได้ อันเนื่องจากการลงทุนเดินสายไฟและติดตั้งระบบที่สูงมากนั่นเอง จากการสำรวจข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่าประเทศไทยยังมีบ้านเรือนประชาชนในพื้นที่ห่างไกลที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้อีกหลายพันหลังคาเรือน ดังรูป 2.10 ที่ได้แสดงภาพถ่ายจากดาวเทียมในระยะไกล เปรียบเทียบให้เห็นพื้นที่บริเวณที่เป็นประเทศไทย ทั้งตอนกลางวัน และตอนกลางคืน จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลากลางคืน จุดที่มีแสงสว่างเกิดขึ้นหรือบริเวณที่มีการใช้ไฟฟ้า ยังมีเฉพาะตำแหน่งที่เป็นแหล่งชุมชน และตัวเมืองใหญ่ ๆ ของแต่ละจังหวัดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้เล็งเห็นประโยชน์ที่จะนำระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์แบบติดตั้งเดี่ยว มาใช้งานในพื้นที่ห่างไกล ที่ระบบไฟฟ้าปกติเข้าไปไม่ถึงเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและวางระบบไฟฟ้า ทั้งยังตอบสนองต่อความต้องการและอำนวยความสะดวกให้แก่ประชาชนได้อย่างทั่วถึงอีกด้วย



(ก)



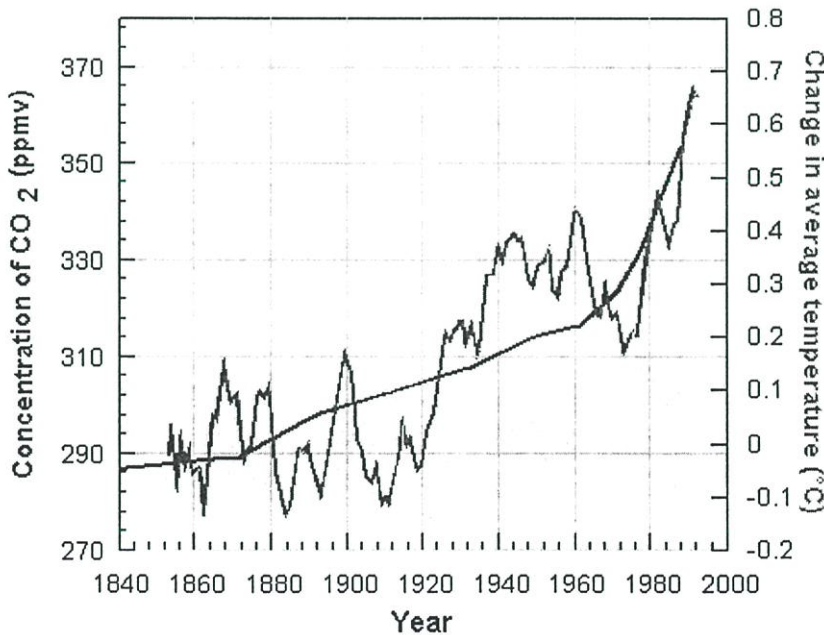
(ข)

รูปที่ 2.10 การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของประเทศไทยด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียมในระยะไกล

ก) ภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเวลากลางวัน ข) ภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเวลากลางคืน

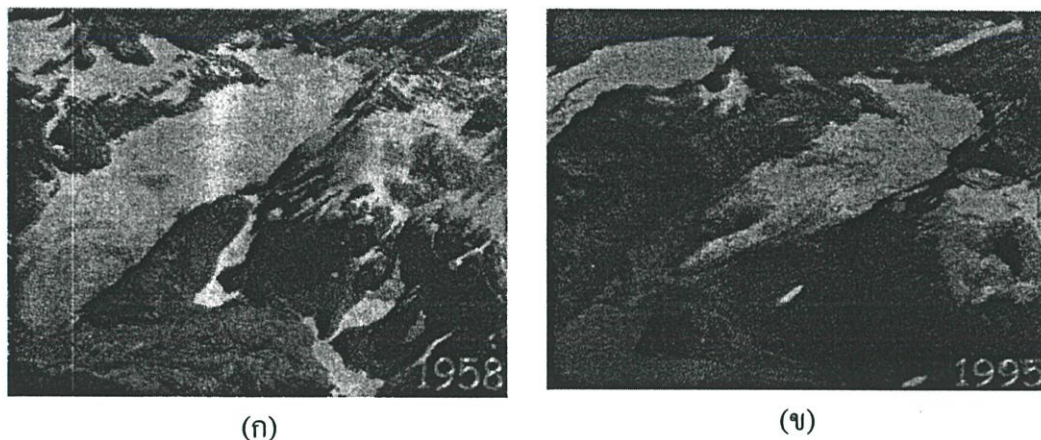
ในอดีตการใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ที่มีพิคต์กำลังสูง ๆ ยังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ (ประมาณ 10-15 %) และต้นทุนต่อหน่วยพลังงานยังสูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานในรูปแบบอื่น แต่เมื่อเทคโนโลยีทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาสูงขึ้นจากเดิมมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้นเป็นลำดับ (โดยเฉลี่ยมากกว่า 15% ในปี ค.ศ. 1999) ทำให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายขึ้น รวมทั้งได้รับความไว้วางใจจากหน่วยที่รับผิดชอบดูแลด้านพลังงานโดยมีการสนับสนุนและผลักดันให้มีการใช้งานอย่างจริงจังในฐานะพลังงานทดแทนที่สำคัญรูปแบบหนึ่ง

ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) เป็นแรงจูงใจอย่างหนึ่งที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้รับความนิยม มากกว่าแหล่งพลังงานในรูปแบบอื่นนั่นคือ เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เหมือนกับแหล่งเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ถ่านหินหรือน้ำมัน เป็นต้น มีการตั้งสมมุติฐานและลงความเห็นว่าการของภาวะเรือนกระจกทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น เนื่องจากมลภาวะและการใช้สารเคมีบางประเภทที่ส่งผลต่อชั้นบรรยากาศในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เป็นผลให้ปริมาณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สู่โลกมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี “พลังงานสะอาดและได้เปล่า” จากคำกล่าวนี้เป็นการยืนยัน จุดเด่น และความน่าสนใจของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเป็นพลังงานทดแทน และจัดได้ว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจอย่างยิ่ง



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของการเพิ่ม CO<sub>2</sub> ในชั้นบรรยากาศ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มขึ้น

ปัญหาภาวะของ โลกที่ทำลายสมดุลของระบบนิเวศและชั้นบรรยากาศทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางระบบนิเวศวิทยาบนพื้นโลกอย่างมาก และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงขึ้นในทุก ๆ ปี ยังส่งผลกระทบต่อธารน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและเคลื่อนตัวออกห่างกัน ดังรูปที่ 2.12



(ก)

(ข)

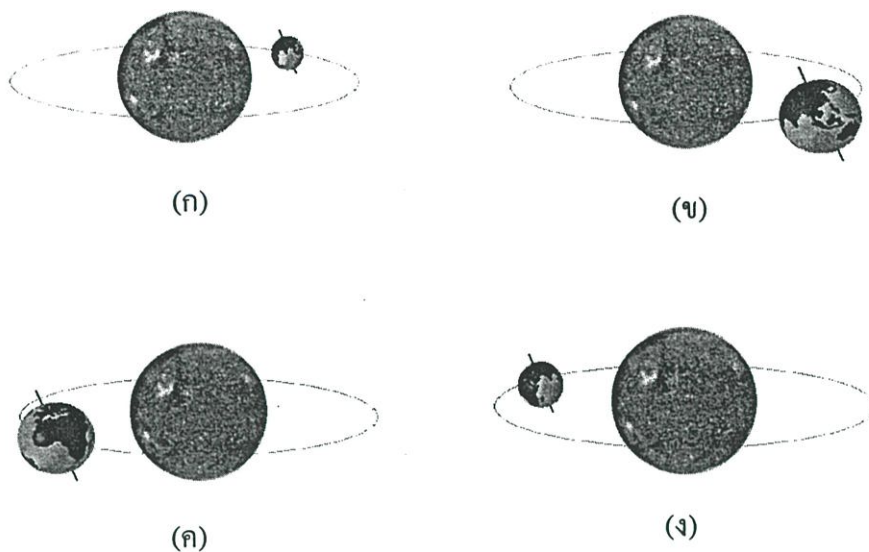
รูปที่ 2.12 การลดปริมาณลงของธารน้ำแข็งบริเวณขั้วโลกจากผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

#### 2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก (Sun Positions in Relation To the Earth) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ขณะที่โลกหมุน แสดงดังรูปที่ 2.13 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็น รูปวงรี โดยแกนหมุนของโลกจะเอียงทำมุม 23.45 องศา กับแนวตั้งฉากของระนาบวงโคจรในการอ้างอิงระนาบของการโคจร ทำได้โดย ถ้าซีกโลกเหนือเอียงไปทางดวงอาทิตย์ในฤดูร้อน และในทางกลับกันถ้าซีกโลกใต้เอียงไปทางดวงอาทิตย์จะเป็นฤดูหนาว นอกจากระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกจะได้รับ[7] โดยสามารถดูการเปรียบเทียบค่าคงตัวสุริยะ (solar constant) ของดาวเคราะห์แต่ละดวงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าคงตัวสุริยะของดาวเคราะห์แต่ละดวงที่ระยะห่างต่างๆ กัน

Planet	Distance ( $\times 10^9$ m)	Solar Constant ( $W/m^2$ )
Mercury	57	8908.0
Venus	108	2481.3
Earth	150	1286.3
Mars	227	561.7
Jupiter	778	47.8
Saturn	1426	14.2
Uranus	2868	3.5
Neptune	4497	1.4
Pluto	5806	0.9



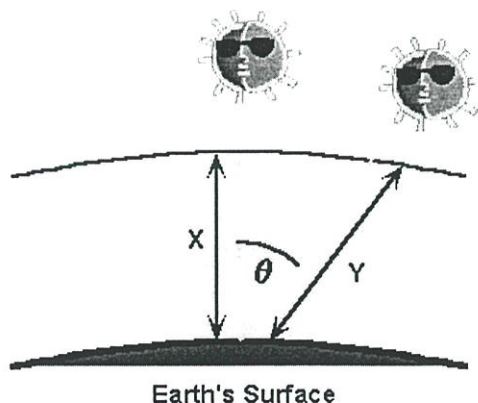
รูปที่ 2.13 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

- ก) ช่วงเดือนมีนาคม   ค) ช่วงเดือนกันยายน  
 ข) ช่วงเดือนมิถุนายน   ง) ช่วงเดือนธันวาคม

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้ม และผลการตอบสนองทางความถี่ของแสงอาทิตย์ จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass  $m$  หรือ AM $m$ ) ขึ้น โดยค่าแอร์แมส คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อ ระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ[8] ซึ่งสามารถแสดงการพิจารณาค่าดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.14 และสมการคำนวณแสดงได้ดังนี้

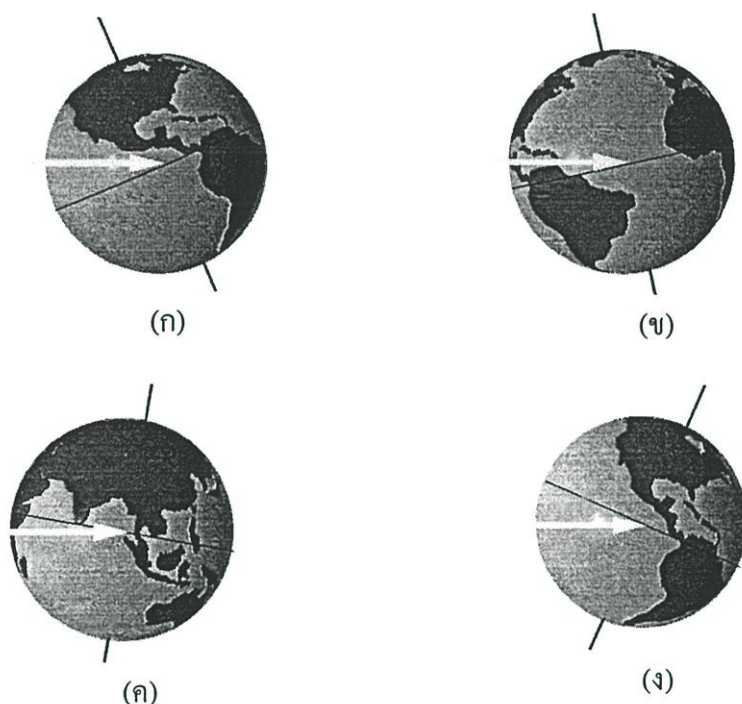
$$\text{Air Mass} = \sec(\theta) = \frac{l}{\cos(\theta)} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมระหว่างแนวของลำแสงที่กระทำกับแนวตั้ง



รูปที่ 2.14 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก

แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกบรรยากาศโลกจะเรียกว่า แอร์แมสซีโร่ (AM0) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 138 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับแสงบริเวณผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลในตอนเที่ยงวันจะเรียกว่า แอร์แมสวัน (AM1) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในปัจจุบันการวัดเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นโลกจะใช้ค่า แอร์แมส อยู่ที่ 1.5 (AM1.5) ซึ่งจะมีค่าพลังงานอยู่ที่ 83.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณพลังงานแสงนี้ได้นำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งก็คือประสิทธิภาพของเซลล์นั่นเอง



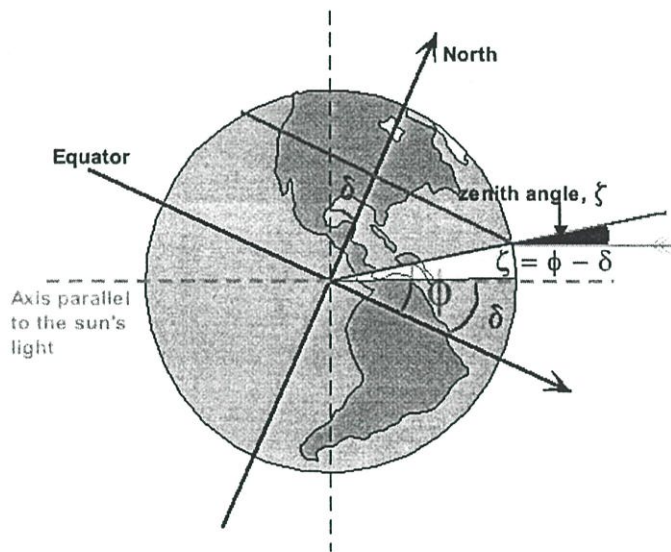
รูปที่ 2.15 ผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลก จากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา

- ก) ช่วงเดือนมีนาคม    ค) ช่วงเดือนกันยายน  
 ข) ช่วงเดือนมิถุนายน    ง) ช่วงเดือนธันวาคม

เส้นอาร์กติก (Arctic Circle) และเส้นแอนตาร์กติก (Antarctic Circle) เส้นทรอปิกออฟแคนเซอร์ (Tropic Cancer) และเส้นทรอปิกออฟแคพริคอน (Tropic of Capricorn) มีความสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ใน 4 ฤดู โดยในฤดูหนาวดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากโลกที่สุด และเป็นช่วงที่ขั้วโลกเหนือจะเอียงหนีจากดวงอาทิตย์ 23.5 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์กติกจะมีค โดยสมบูรณ์ และบริเวณใต้เส้นแอนตาร์กติกจะสว่างโดยตลอด ส่วนในฤดูร้อนดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากโลกที่

สุดเช่นกัน ซึ่งขั้วโลกเหนือจะเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์ 23.5 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์คติกจะสว่างโดยตลอด และบริเวณใต้เส้นแอนตาร์คติกจะมีโดยสมบูรณ์ ส่วนในฤดูใบไม้ร่วงจะมีกลางวันเท่ากับกลางคืน ซึ่งขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้จะมีระยะห่างจากดวงอาทิตย์เท่ากัน ซึ่งแสดงดังรูป 2.15

ด้วยเหตุนี้รังสีที่ส่องลงมาบนโลกจึงเป็นฟังก์ชันทางเลขาคณิต มุมพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังแสดงได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับผิวโลกดังรูปที่ 2.16 โดยกำหนดให้พิจารณา ณ จุดอ้างอิงที่อยู่บนผิวโลก



รูปที่ 2.16 การพิจารณามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์บนโลก

ละติจูด (Latitude) คือ มุมจากระนาบเส้นศูนย์สูตรถึงจุดอ้างอิงบนผิวโลก ละติจูดที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรจะกำหนดให้มีค่าเป็นบวก และละติจูดที่อยู่ต่ำกว่าเส้นศูนย์สูตรลงมาจะกำหนดให้มีค่าเป็นลบ

Declination ( $\delta$ ) คือ มุมที่รังสีของดวงอาทิตย์กระทำกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร กำหนดให้มุมเดคลิเนชันที่เอียงไปทางขั้วโลกเหนือมีค่าเป็นบวก จากรูปที่ 2.16 มุมเดคลิเนชันเป็นมุมระหว่างเส้นจากจุดศูนย์กลางโลก ถึงจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์กระทำกับโปรเจกชันของเส้นนี้บนระนาบเส้นศูนย์สูตร ค่าของมุมเดคลิเนชันจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์องศา ในฤดูใบไม้ผลิ (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง + 23.5 องศา ในฤดูร้อน (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้โลกที่สุด) และจากศูนย์องศา ในฤดูใบไม้ร่วง (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง - 23.5 องศา ในฤดูหนาว (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ไกลโลกที่สุด) โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเดคลิเนชันตลอดปีจะสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(\left(\frac{284 + N}{365}\right) * 360\right) \quad (2.2)$$

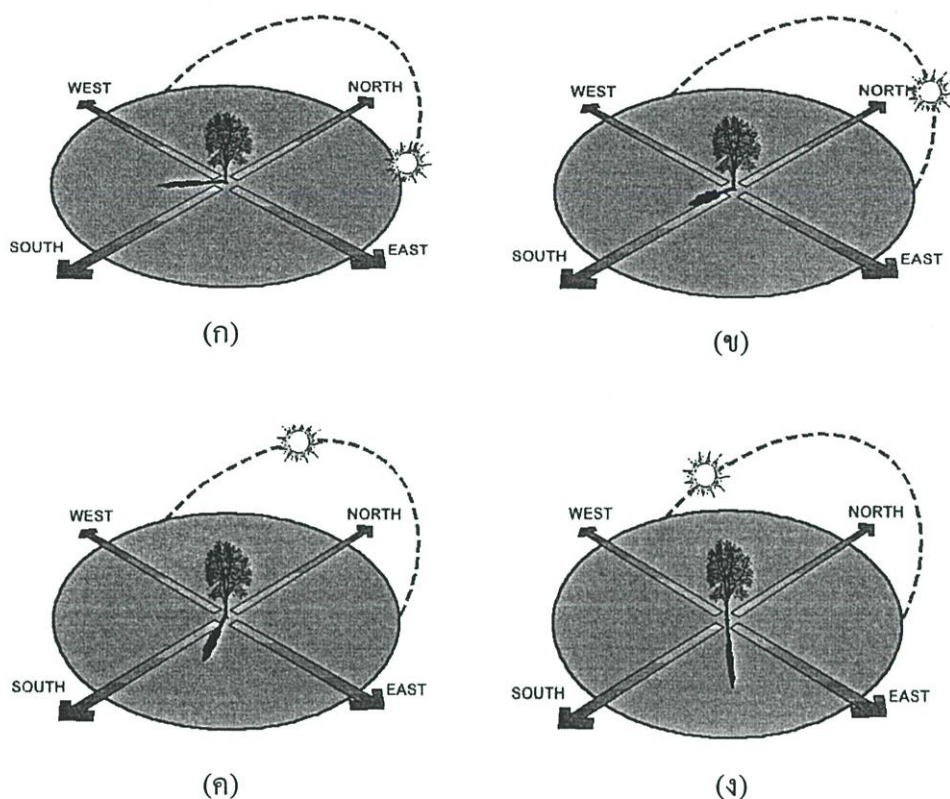
เมื่อ  $N$  คือเลขวันในรอบปี

ในการคำนวณเราจะใช้ค่า declination ชั้นคงที่ตลอดทั้งวัน โดยค่า  $n$  มาจากตารางดังนี้

ตารางที่ 2.4 การหาค่าเลขประจำวัน ในรอบ 1 ปี

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

Hour Angle (  $h$  ) คือมุมระหว่างจุดใด ๆ บนเส้นแวงกับทิศทางของดวงอาทิตย์บนโลก โดยที่ ณ solar noon ของแต่ละท้องถิ่นจะมีค่ามุมชั่วโมงเป็นศูนย์ โดยที่มุมจะหมุนเปลี่ยนไป 15 องศาต่อชั่วโมง (มุมช่วงเช้าจะเป็นลบ และมุมช่วงบ่ายจะเป็นบวก) ตัวอย่างเช่นที่เวลา 11:00 น. มุมจะเท่ากับ - 15 องศา ส่วนที่เวลา 13:30 น. มุมจะเท่ากับ + 15 องศา คูณกับ 15 ชั่วโมง เท่ากับ 22.5 องศา แต่สำหรับการคิดมุมที่ sunset hour angle ( $\omega_s$ ) คือมุมเมื่ออาทิตย์ขึ้น โดยที่  $\omega_s = 90$  องศา รูปที่ 2.17 ได้แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาจากจุดอ้างอิงบนโลก

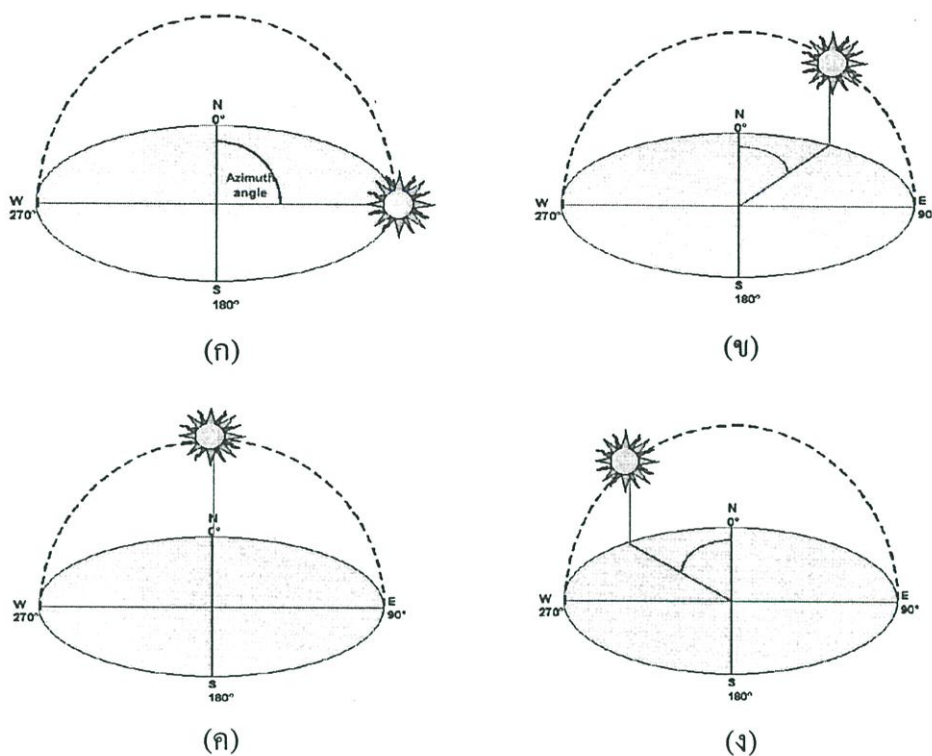


รูปที่ 2.17 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาจากจุดอ้างอิงบนโลก

- ก) ช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มปรากฏ      ค) ช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน  
 ข) ช่วงเวลาก่อนเที่ยงวัน            ง) ช่วงเวลาใกล้ค่ำ

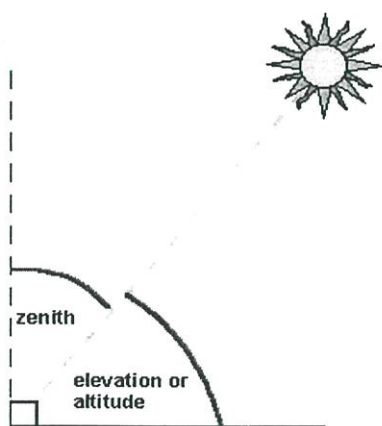
ส่วนในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะต้องใช้มุมใหม่เพิ่มขึ้น 3 มุม จากมุมพื้นฐานข้างต้นเป็นตัวบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18 และ รูปที่ 2.19 โดยโลกจะหมุนไปทางทิศตะวันออก ส่วนดวงอาทิตย์จะปรากฏโดยการสังเกตบนโลกจะเห็นได้ว่าดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปบนท้องฟ้าในลักษณะเป็นเส้นโค้งโดยจะค่อย ๆ ขึ้นจากทิศตะวันออก หลังจากนั้นจะเคลื่อนไปทางทิศตะวันตก มุมที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ได้แก่

1. Zenith angle ( $\theta$ ) คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กระทำในแนวตั้ง หน่วยเป็นองศา
2. Altitude angle ( $\alpha$ ) คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กระทำในแนวนอนหน่วยเป็นองศา
3. Azimuth angle ( $\psi$ ) คือ มุมของรังสีดวงอาทิตย์ที่วัดจากทิศใต้ไปทางทิศตะวันตกในแนวระนาบแนวนอน จะมีค่าเป็นบวกสำหรับซีกโลกเหนือ ส่วนสำหรับซีกโลกใต้จะวัดจากทิศเหนือไปทางทิศตะวันออกในแนวระนาบแนวนอนมีค่าเป็นบวก หน่วยเป็นองศา



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนมุม Azimuth angle ( $\psi$ ) ตามการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลาต่างๆ

- ก) ช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มปรากฏ      ค) ช่วงเที่ยงวัน  
 ข) ช่วงเวลาก่อนเที่ยงวัน            ง) ช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน



รูปที่ 2.19 ตำแหน่งของมุม Zenith angle ( $\theta_z$ ) และ Altitude angle ( $\alpha$ )

สำหรับรังสีของดวงอาทิตย์บนพื้นผิวเอียง จำเป็นที่จะต้องกำหนดมุมมากกว่า 3 มุม ให้สัมพันธ์กับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.20 อันได้แก่

1. Slope ( $\beta$ ) คือ มุมระหว่างพื้นผิวกับระนาบแนวนอน (Horizontal) โดยมุมเอียงจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 180 องศา

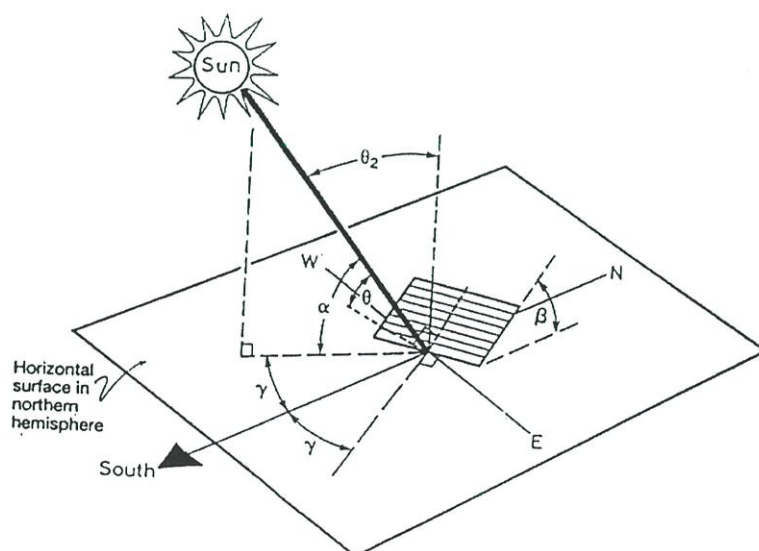
2. Surface angle ( $\phi$ ) คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวกับทิศใต้วัดในแนวระดับ โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศตะวันตก

3. Incident angle ( $\theta$ ) คือ มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากพื้นผิว ถ้าพื้นผิวกับระนาบแนวระดับวางทับกันจะได้ว่ามุม Incident angle ( $\theta$ ) และมุม Zenith angle ( $\theta_z$ ) จะเท่ากัน โดยนี้มีความสำคัญในการคำนวณปริมาณแสงที่จะตกลงบนแผง ถึงมีการตั้งค่าให้มีความสัมพันธ์กับมุมอื่น ๆ โดย

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\delta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (2.3)$$

และสำหรับระนาบแนวนอน มุม incidence คือมุม Zenith ของดวงอาทิตย์ ( $\theta_z$ ) โดยค่าของมุมจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา เมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือแนวระนาบ สำหรับที่สถานะนี้ ค่า Slope ( $\beta$ ) เท่ากับ 90 องศา ดังนั้นจากสมการจึงเป็น

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.20 แสดงมุมที่เกิดจากพื้นผิว ได้แก่มุม Tile angle  $\beta$ , Surface Azimuth angle  $\psi$  และ Incident angle  $\theta$

## 2.4.2 การพิจารณาค่าแห่ง และมุมในการติดตั้งที่เหมาะสม

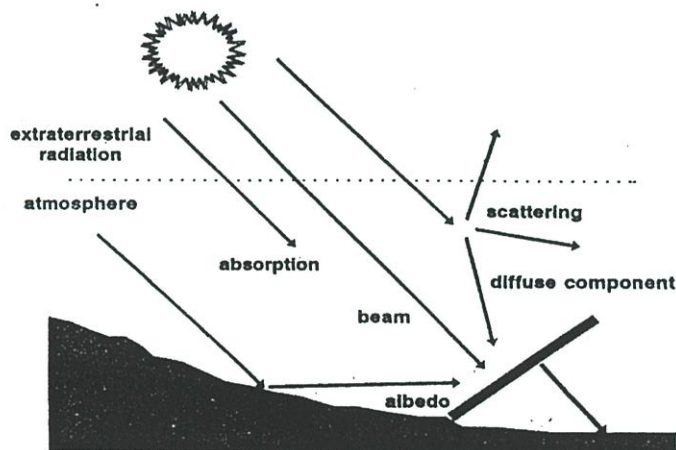
### 2.4.2.1 มุมเอียง และ ปริมาณแสงที่ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รังสีแสงอาทิตย์ เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ [9]

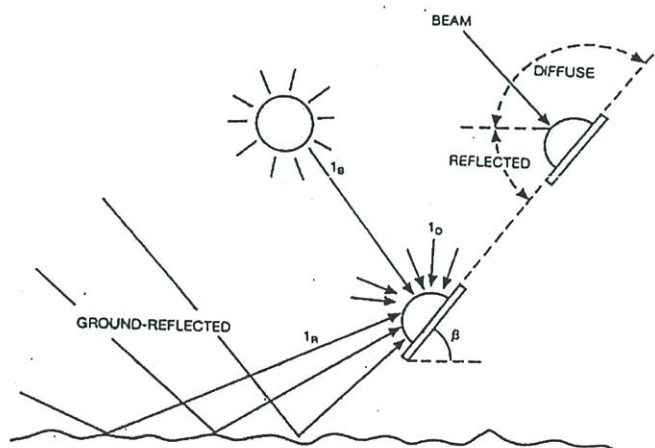
สามารถแบ่งออกเป็น

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

- การแผ่รังสีของทั้ง 3 แบบนี้ ขึ้นอยู่กับวันและเวลา receiving angle และสภาวะแวดล้อมของบริเวณรอบ ๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันออกไป ส่งผลให้ค่าเอ้าท์พุทที่ได้รับนั้นแตกต่างกันด้วย จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลองค์ประกอบการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ บนพื้นเอียง ในส่วนต่างๆ เพื่อการเลือกระบบที่เหมาะสมที่สุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.21 การวัด และพิจารณาองค์ประกอบการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ บนพื้นเอียง

ก) องค์ประกอบของรังสีส่วนต่างๆ ข) การวัดรังสีองค์ประกอบของรังสีส่วนต่างๆ

พิจารณาการแผ่รังสีที่ค่ามุมของแสงที่ต่าง ๆ กัน ค่าปริมาณรังสีตรงที่มุมแสงค่าต่างกัน  $G(\beta)$  มีสมการที่ใช้พิจารณาคือ

$$G(\beta) = B(\beta) + D(\beta) + R(\beta) \quad (2.5)$$

โดยหาค่า  $B_0$  ได้จาก

$$B_0 = (24/\pi) S \{1 + 0.33 \cos(2\pi d_n / 365)\} (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s \sin\phi \sin\delta)$$

$\phi$  = ตำแหน่งละติจูดที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$\beta$  = ค่ามุมเอียงของแผงเซลล์

$\delta$  = มุมเดคลิเนชัน ซึ่งหาได้จาก  $23.45 \sin\{360(284 + n)/365\}$

$n$  = เลขวันในรอบปี โดยวันที่ 1 มกราคม มีค่าเป็น 1 และ 31 ธันวาคม มีค่าเป็น 365

$\omega$  = มุมชั่วโมงตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ สำหรับที่ตั้งนั้นๆ

**หมายเหตุ** มุมที่ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นเรเดียน

โดยค่า  $B_0$  คือค่า irradiancance ที่อยู่นอกบรรยากาศโลกโดยเป็นค่าที่อยู่ในช่วงประมาณ -3% ถึง +3% ของวงโคจรของโลก

ค่า clearness index ( $K_T$ ) ค่านี้จะถูกคำนวณทุกๆ เดือนในหนึ่งปีจาก

$$K_T = G / B_0 \quad (2.6)$$

โดยค่า  $G$  เป็น ปริมาณรังสีรวมบนระนาบแนวนอน (สำหรับข้อมูลของค่าตัวนี้ได้จากปริมาณพลังงานแสงจากกรมอุตุนิยมวิทยา) และค่าดัชนี  $K_T$  จะใช้ในการคำนวณค่าของรังสีกระจาย ดังนั้น

$$D/G = 1 - 1.13K_T \quad (2.7)$$

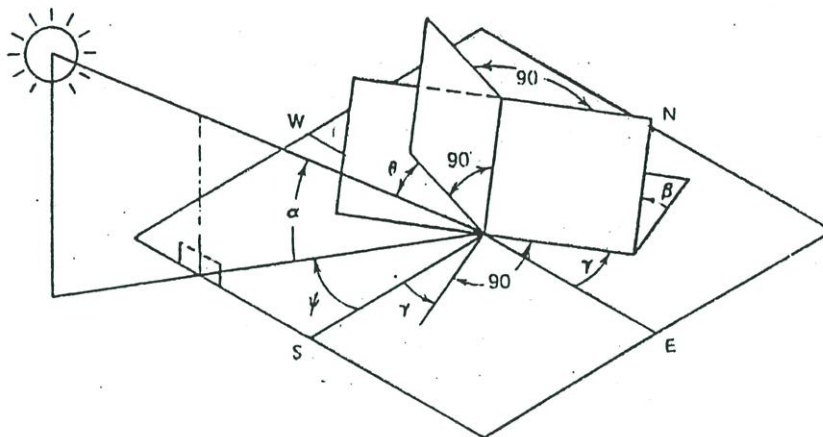
ส่วนการคำนวณ  $B$  ได้จาก

$$B = G - D \quad (2.8)$$

โดยค่า  $B$  เป็นค่ารังสีตรงที่แนวระนาบ ถ้าจะหาค่ารังสีตรงที่ตกบนระนาบใดๆ หาได้จาก

$$B(\beta) = B * R_b \quad (2.9)$$

**หมายเหตุ** ค่า  $R_b$  (geometric factor :  $R_b$ ) คือค่าอัตราส่วนระหว่าง รังสีตรงบนมุมเอียงกับค่าของมันที่พื้นผิวระนาบ  $\{R_b = G_{b,T} / G_b = (G_{b,n} \cos \theta) / (G_{b,n} \cos \theta_z) = (\cos \theta) / (\cos \theta_z)\}$



รูปที่ 2.22 มุมประกอบต่าง ๆ สำหรับการพิจารณา มุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากรังสีกระจายเกิดจากการที่ ลำแสงสะท้อนกับอากาศแล้วตกกระทบลงบนแผง ดังนั้นค่ารังสีกระจายที่ระนาบใดๆ หาได้จาก

$$D(\beta) = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) * D \tag{2.10}$$

ค่ารังสีสะท้อน ( $R$ ) เป็นรังสีที่สะท้อนจากพื้นมาตกกระทบที่แผงจึงทำให้ปริมาณแสงเพิ่มขึ้น โดยปกติผลของรังสีสะท้อนตัวนี้จะมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับค่าตัวอื่น ๆ โดยหาได้จาก

$$R(\beta) = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta) \rho D \tag{2.11}$$

โดยค่า  $\rho$  (reflectivity) เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามลักษณะของพื้นที่นั้นๆ

**หมายเหตุ** สำหรับตัวอย่างค่าการสะท้อนของพื้นที่ต่างๆ เป็นดังนี้

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

การหาค่ามุมและค่า  $\cos\theta$  ของรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบต่าง ๆ[9]

**กรณีที่ 1 :**

สำหรับอุปกรณ์ที่มีการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แบบสองแกนค่า slope และ มุม incidence จะเป็นดังนี้

$$\beta = \arccos(\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega) \quad (2.12)$$

และ  $\theta = 0$

**กรณีที่ 2 :**

สำหรับกรณีระบบที่มีการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แบบหนึ่งแกน (เหนือ-ใต้, หมุนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วคงที่) ค่า slope และค่ามุม incidence จะเป็น

$$\beta = \arccos(\cos\omega \cos\varphi) \quad (2.13)$$

และ  $\theta = \delta$

**กรณีที่ 3 :**

ในกรณีระบบที่มีการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แบบหนึ่งแกน(ตามแนวตะวันออก-ตะวันตก)

$$\beta = \arccos\left\{\frac{\cos\delta \sin\varphi \cos\omega - \sin\delta \cos\varphi}{\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega}\right\} \quad (2.14)$$

$$\theta = \arccos[\sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\omega] \quad (2.15)$$

**กรณีที่ 4 :**

สำหรับการออกแบบกรณีที่ไม่มีการติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (ไม่มีอุปกรณ์ TRACKING) ค่าของ slope และมุม incidence จะเป็นดังนี้

$\beta = \varphi$  หรือให้ติดตั้งที่  $\varphi + 15$  องศา หรือ  $\varphi - 15$  องศา

$$\theta = \arccos(\cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta) \quad (2.16)$$

ดังนั้น เมื่อหาค่าของ slope ( $\beta$ ) และ มุม incidence ( $\theta$ ) จึงทำให้หาค่า  $B(\beta), D(\beta), R(\beta)$  ได้ ฉะนั้นแล้วจึงหาค่ารังสีรวมที่  $G(\beta)$  ได้

### 2.4.2.2 การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสม

การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสม มีความจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณามุมเดคลิเนชัน ( $\delta$ ) หรือมุมการเอียงปรากฏของแกนหมุนของโลกเข้าหาดวงอาทิตย์เทียบกับแกนตั้งฉากของระนาบสุริยวิถีประกอบด้วย[10] โดยมีสูตรในการคำนวณหาค่ามุมเดคลิเนชันเป็นคังสมการที่ 1 ข้างต้น

นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องพิจารณามุมประกอบอื่นๆ ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 อีกด้วย อันได้แก่ อัลติจูดสุริย ( $\alpha$ ) และมุมแอสซิมูทสุริย ( $\psi$ ) ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีมุมเอียงเป็น  $\beta$  และ มุมแอสซิมูทของแผงเป็น  $\gamma$  และมุมตกกระทบจากดวงอาทิตย์ทำกับระนาบตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นมุม  $\theta$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถรับรังสีในช่วงเวลาหนึ่งได้สูงสุดเมื่อมุม  $\theta(t)$  ในเวลาใด ๆ มีขนาดเล็กที่สุด หรือ  $\cos\theta(t)$  มีค่ามากที่สุด[11]

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\varphi$  เป็นมุมเส้นรุ้งของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ  $\omega$  คือมุมชั่วโมง (hour angle)

โดยถ้ามุมอื่นๆคงที่ค่า  $\cos\theta$  จะแปรค่าตามมุม  $\beta$  และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ  $\frac{d \cos\theta}{d\beta} = 0$  ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสม ( $\beta_{opt}$ ) ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ถ้าทำการพิจารณาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมในตอนเที่ยงวันก็สามารถที่จะพิจารณาได้ดังนี้

$$\tan\beta_{opt} = \cos\gamma \tan(\varphi - \delta) \quad (2.18)$$

เมื่อพิจารณาค่ามุมเอียงที่เหมาะสม ณ. ตำแหน่งเที่ยงวัน คือ  $\omega = 0$  และ  $\gamma = 0$  จะส่งผลให้การหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมเปลี่ยนไปเป็น

$$\beta_{opt} = \varphi - \delta \quad (2.19)$$

นอกจากนี้เพื่อให้ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์สูงสุดในแต่ละวันค่าของ  $\beta_{opt}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปอีกด้วย สำหรับกรณีแผงรับแสงวางอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก และหันหน้าเข้าหาเส้นศูนย์สูตร ( $\gamma = 0$ )  $\beta_{opt}$  จะแปรตาม  $\omega$  ดังนี้

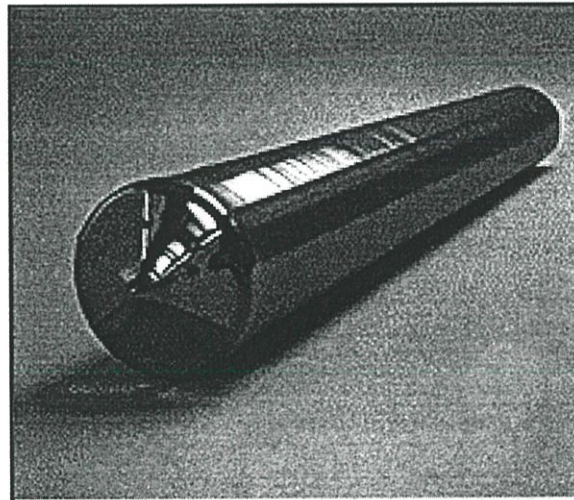
$$\tan \beta_{opt} = \frac{\cos \delta \sin \varphi \cos \omega - \sin \delta \cos \varphi}{\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \quad (2.20)$$

สำหรับในวันที่  $N = 81$  และ  $264$  ที่อิควินอกซ์ ดวงอาทิตย์อยู่บนเส้นศูนย์สูตรพอดี ( $\delta = 0$ ) มุม  $\beta_{opt} = \varphi$  นั่นคือมุมเอียงมีค่าคงที่ตลอดวันจะเท่ากับมุมเส้นรุ้งของสถานที่นั้นๆ โดยไม่ขึ้นกับมุมชั่วโมง  $\omega$

### 2.4.3 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้ คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.23 ลักษณะแท่งผลึกซิลิกอน ก่อนการตัดเพื่อทำเป็นแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

#### 2.4.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานกันมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนนั้นทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้นแม้จะมีความหนาเพียง  $50 \mu\text{m}$  ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน และแบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อย

มาก อายุการใช้งานนานถึง 20 ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้จะมีบ้างก็คือ เนื่องจากผลึกซิลิกอนมีช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง (indirect band gap) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป โดยที่การผลิตนั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้าง IC ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน โดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44 % แต่ในทางปฏิบัติจริงเซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

#### 2.4.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111),(112) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถผลิตโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบลไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พาหะโฟโตนิกที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาอยู่มาก ซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขานี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวกอยจับพาหะข่องน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (life time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดเส้นโค้งขึ้น

#### 2.4.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ แปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่าง ๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Su:H) p-I-

n ซึ่งใช้กันอยู่ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์[12] และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่าง ๆ

#### 2.4.3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

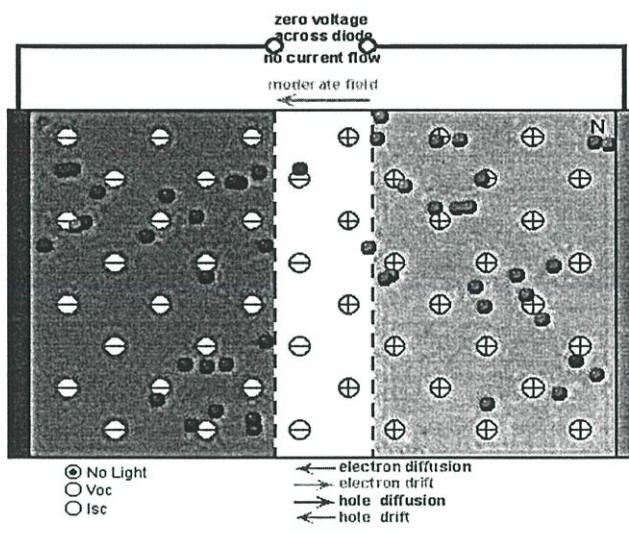
เซลล์ชนิดนี้สร้างจากสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล III-V เช่น GaAs และ InP และสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล II-VI เช่น Cds, DdTe ซึ่งผลิตขายในเชิงอุตสาหกรรมแล้ว โดยมากเซลล์ที่สร้างจาก GaAs และ InP จะใช้กันมากในอวกาศ โดยเฉพาะ InP นั้นจะมีคุณสมบัติทนต่อรังสีได้ดี ข้อดีของเซลล์จำพวกนี้คือ เซลล์มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสารที่นำมาทำเซลล์มีค่าช่องว่างพลังงานที่สูงประมาณ 1.4-1.5 eV และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเนื่องจากเป็นแสงที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ซึ่งสามารถทำเป็นแบบฟิล์มบางได้ โดยถ้าเทียบเป็นประสิทธิภาพที่ 15 % จะต้องใช้ซิลิกอนที่มีความหนาถึง 100 $\mu$ m ในขณะที่ใช้ GaAs จะใช้ความหนาเพียง 10 $\mu$ m เซลล์ชนิดนี้จะมีความทนทานต่อรังสีสูง และทำงานได้ดีในความเข้มสูงๆ คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งก็คือ สามารถสร้างเป็นหลายๆ ชั้นได้จะทำให้สามารถมีศักยภาพในการดูดกลืนคลื่นแสงในลักษณะสเปกตรัมที่กว้างได้ดี

โดยที่กล่าวยกตัวอย่างชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มาทั้ง 4 ชนิดนั้น สารแต่ละชนิดที่นำมาทำเซลล์นั้นจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำคืออยู่ระหว่าง 0.4-2.0 eV ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนด "แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร"  $V_{OC}$  ซึ่งถ้า  $E_g$  มีค่ามากค่าของ  $V_{OC}$  ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้า  $E_g$  มีค่าน้อยก็จะได้  $V_{OC}$  น้อยเช่นกัน

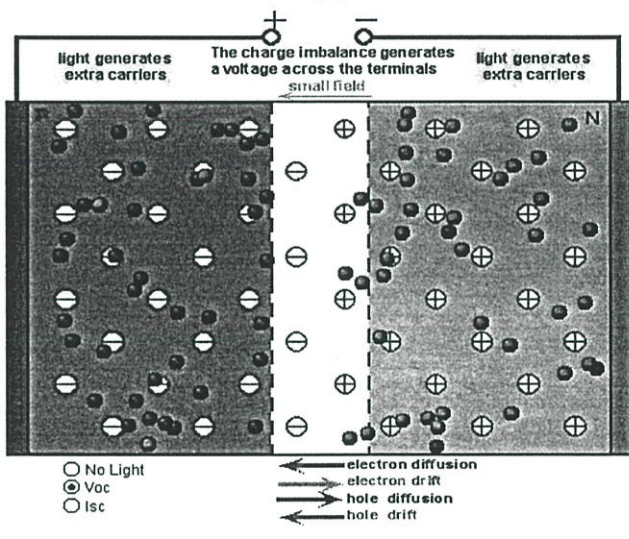
ตัวกำหนดค่าของ  $V_{OC}$  นอกจากจะเป็นค่า  $E_g$  แล้วยังมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ "กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอด"  $I_S$  (saturated reverse current) ซึ่งค่าของ  $I_S$  มีค่าน้อยก็ทำให้ค่าของ  $V_{OC}$  มีค่ามากเพราะค่าของ  $I_S$  จะขึ้นอยู่กับค่าของ  $E_g$  โดยที่ค่าของ  $E_g$  มาก  $I_S$  จะมีค่าน้อย โดยสามารถแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ โฮล ในกรณีต่างๆ ดังรูปที่ 2.24

ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมินี้จะมีผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า  $E_g$  ต่ำๆ มาทำ เพราะอุณหภูมิจะทำให้ "กระแสไฟฟ้าลัดวงจร" ( $I_{SC}$ ) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ  $V_{OC}$  และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

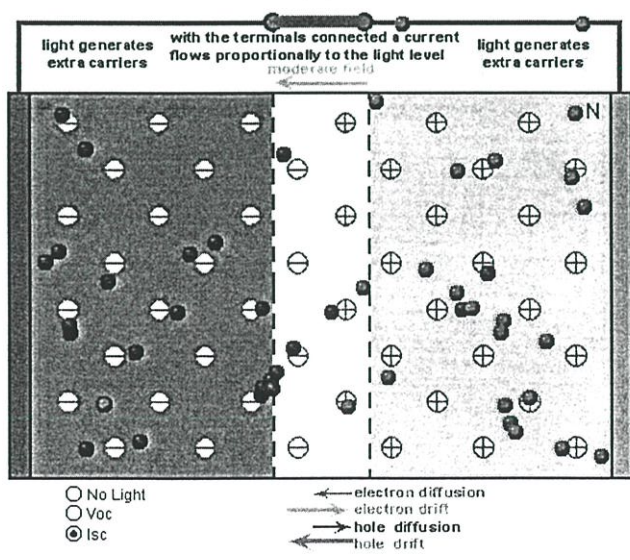
ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้นี้ก็คือ ค่าของ  $V_{OC}$  และ  $I_{SC}$  ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ  $I_S$  จะต้องมีค่าน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อไป



(ก)



(ข)



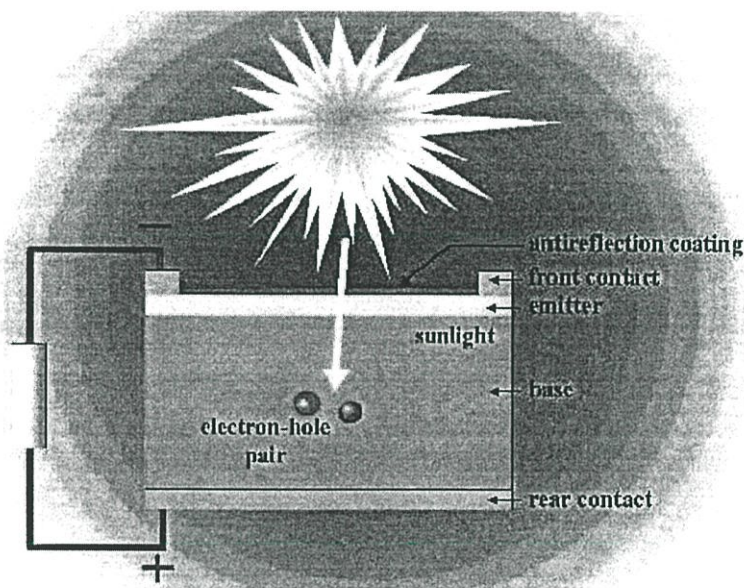
(ค)

รูปที่ 2.24 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ

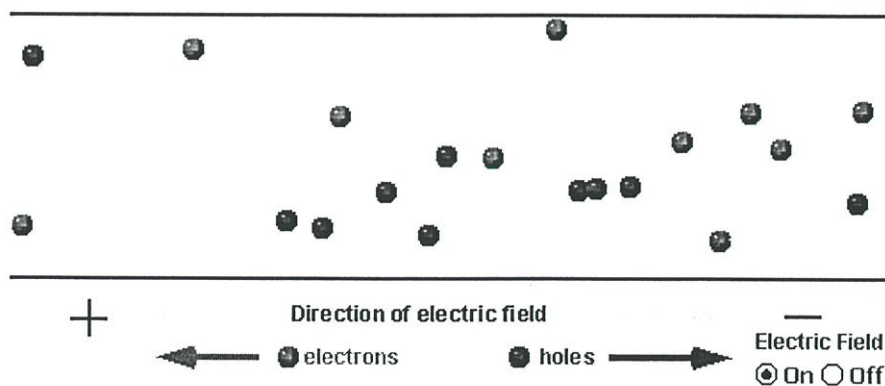
ก) กรณีไม่มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์ ข) เมื่อเกิดการเปิดวงจร ค) เมื่อเกิดการลัดวงจร

#### 2.4.4 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

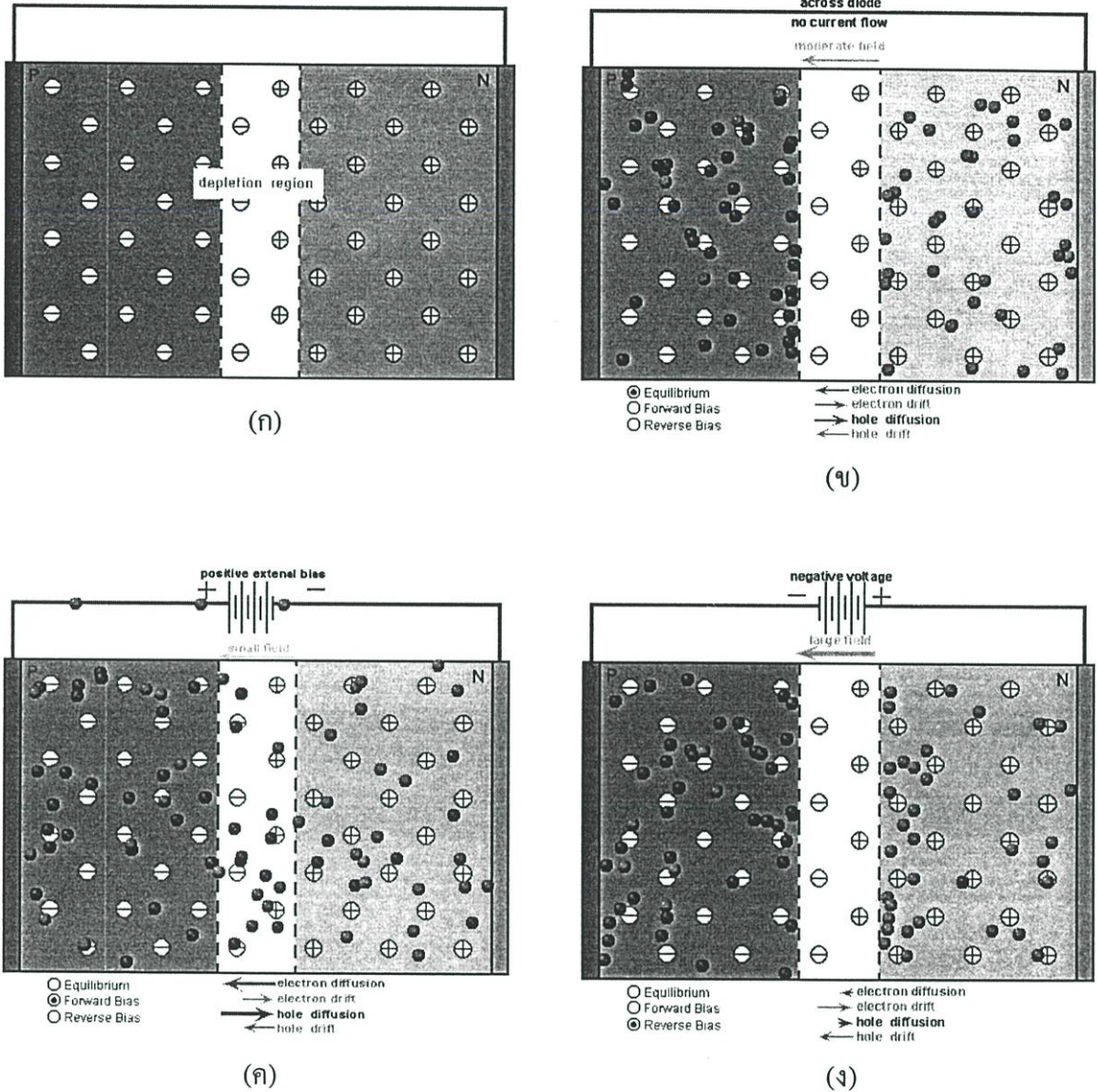
เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกันนั้น จะได้ลักษณะของแถบพลังงาน ซึ่งอยู่ในสถานะของสมดุลความร้อน และเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณปลดพาหะนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ดังรูปที่ 2.25 ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงด้วยว่าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้หรือไม่ ถ้าพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณปลดพาหะนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น ในขณะที่เดียวกันโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี โดยการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 การเกิดคู่อิเล็กตรอน และ โฮลขึ้นเมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบลงบนเซลล์



รูปที่ 2.26 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า

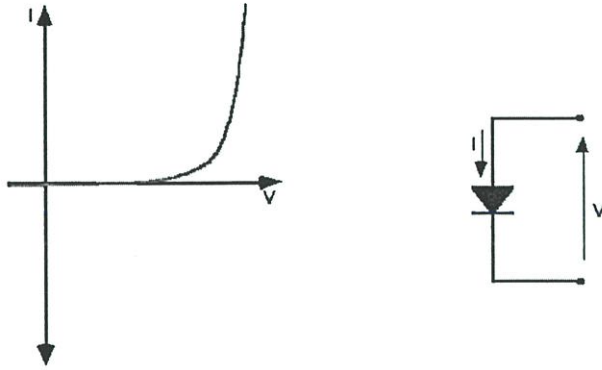


รูปที่ 2.27 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สถานะต่างๆ

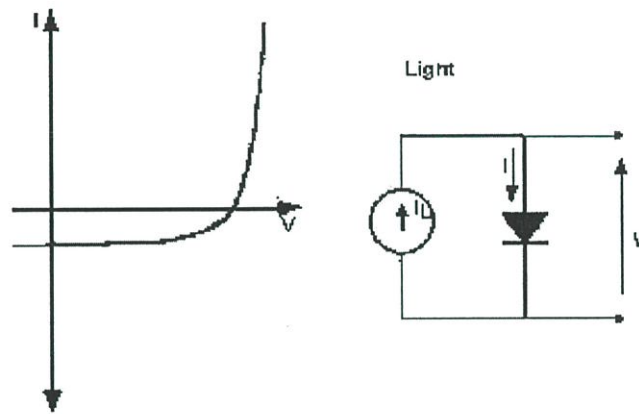
- ก) สภาพปกติ
- ข) ที่สถานะสมดุล
- ค) การกระตุ้นแบบ forward bias
- ง) การกระตุ้นแบบ reverse bias

2.4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

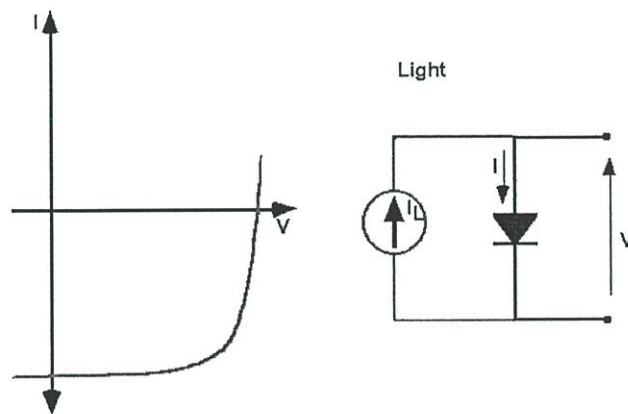
เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เพียงรอยต่อเดียวเหมือนไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ในขณะนี้ยังไม่ได้รับแสงจึงเหมือนกับไดโอดทั่วไป แต่มีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อมากกว่าเท่านั้นดูได้จากรูป 2.27 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สถานะต่างๆไว้ นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า ในขณะที่เซลล์ได้รับแสงทิศทางการไหลของกระแสที่ผ่านรอยต่อของเซลล์จะตรงกันข้ามกับขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยที่แรงดันยังมีลักษณะเหมือนเดิมดังรูปที่ 2.28



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ

- ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบ
- ข) เมื่อมีแสงตกกระทบเพียงเล็กน้อย
- ค) เมื่อแสงที่ตกกระทบมีปริมาณมาก

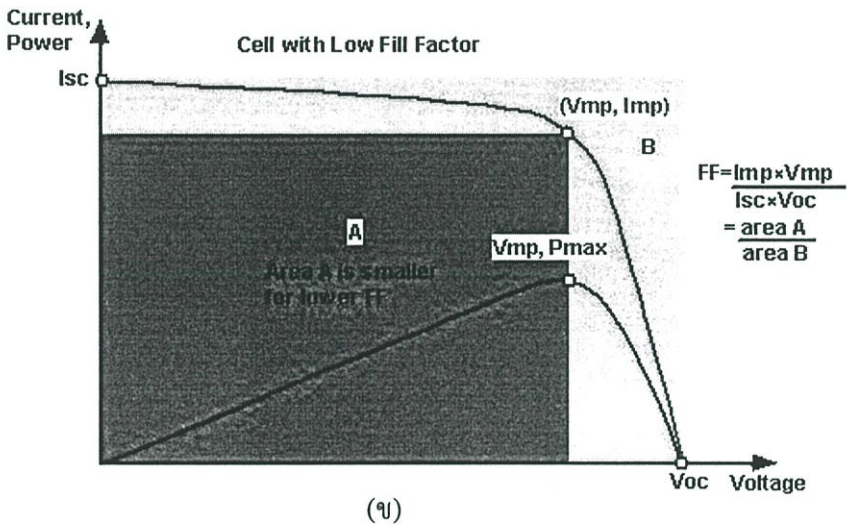
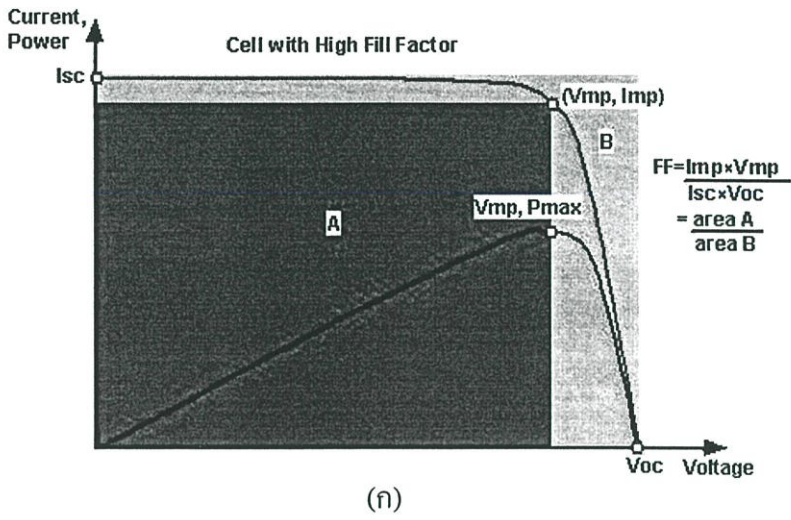
เซลล์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์ถูกลัดวงจรซึ่งให้ค่าเป็น  $I_{sc}$  และ เซลล์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งให้ค่าเป็น  $V_{oc}$  เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแล้ว จะพบว่ากราฟคุณสมบัติของเซลล์ในขณะที่ได้รับแสงในรูปที่ 2.28 จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ค่าผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด จุดนี้จะเรียกว่าจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์ กระแสและแรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็น  $I_m$  และ  $V_m$  ตามลำดับถ้าเรานำไปให้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลด ที่มีความต้านทานพอดีกับจุดนี้ เซลล์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุด ค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมนี้จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง  $V_m$  ต่อ  $I_m$  เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานโหลด  $V_m / I_m$

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟ คือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆ หนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า "ฟิลแฟกเตอร์" (F.F. : Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2.21)$$

เมื่อ	$F.F.$	คือ	ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์
	$P_m$	คือ	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
	$I_m$	คือ	กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
	$V_m$	คือ	แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
	$P_o$	คือ	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
	$I_{sc}$	คือ	ค่ากระแสลัดวงจร
	$V_{oc}$	คือ	แรงดันขณะวงจรเปิด

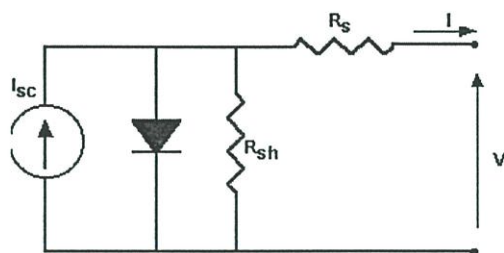
จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติมาก โดยพลังงานจะอยู่ในฟังก์ชันของแรงดันภายใต้ I-V curve ค่ากำลังที่ได้สูงสุดนั้นจะอยู่ภายในสี่เหลี่ยมผืนผ้าของพื้นที่ใต้โค้งนั้นที่จุดกำลังสูงสุด ( $P_{mp}$ ), กระแสสูงสุด ( $I_{mp}$ ) และแรงดันสูงสุด ( $V_{mp}$ ) ในอุดมคติเซลล์ควรจะทำงานภายใต้ค่า ณ จุดกำลังสูงสุดนี้



รูปที่ 2.29 การพิจารณารูปคุณลักษณะเฉพาะ เพื่อผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟิลแฟกเตอร์ และจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ก) เมื่อค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูง      ข) เมื่อค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าต่ำ

เพื่อที่จะเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะพิจารณาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสที่ นั่นก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง ( $I_L$ ) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ ( $R_s$ ) ความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) และรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส  $I_L$  ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ  $R_{sh}$  แล้วจึงไหลมายังโหลด ( $R_L$ ) กระแสที่ไหลผ่าน  $R_s$  และ  $R_L$  ให้มีค่าเป็น  $I_o$



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม และความต้านทานขนาน

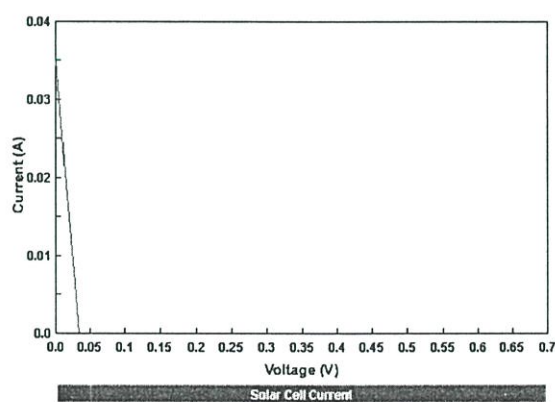
#### 2.4.4.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์

##### 1) ผลของค่าความต้านทานอนุกรม

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ( $R_s$ ) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก ซึ่งถ้า  $R_s \neq 0$  แล้ว แรงดัน  $V_o$  ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตกคร่อม  $R_s$  ซึ่งเท่ากับ  $I_o \cdot R_s$

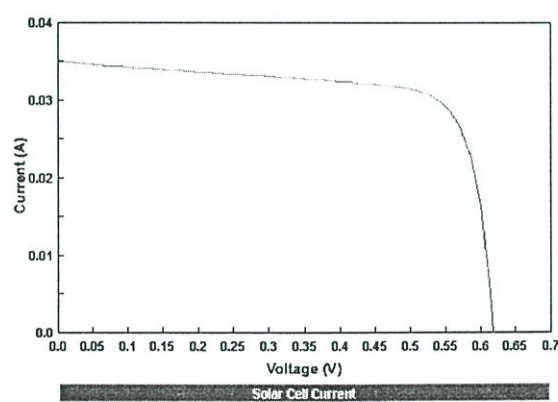
##### 2) ผลของค่าความต้านทานขนาน

ส่วนความต้านทานขนานนั้นอาจจะเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานขนานควรมีค่าสูงมากๆ แต่ความต้านทานขนานอาจจะมีค่าลดลงได้ ส่งผลต่อคุณสมบัติ และกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าไป โดยสามารถพิจารณาผลดังกล่าวได้จากรูปที่ 2.31



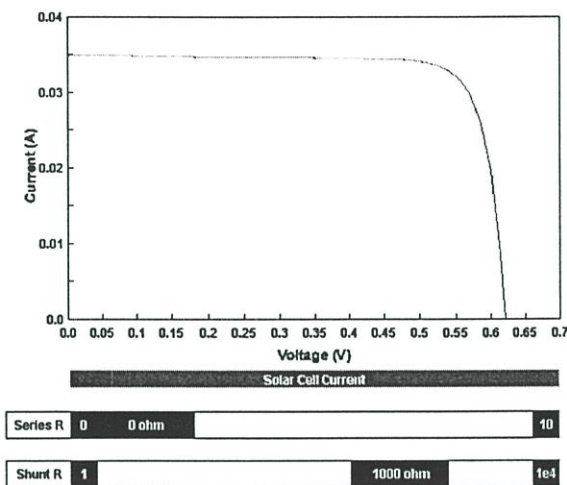
Series R	0	0 ohm	10
Shunt R	1	1 ohm	1e4

2.31 (ก)

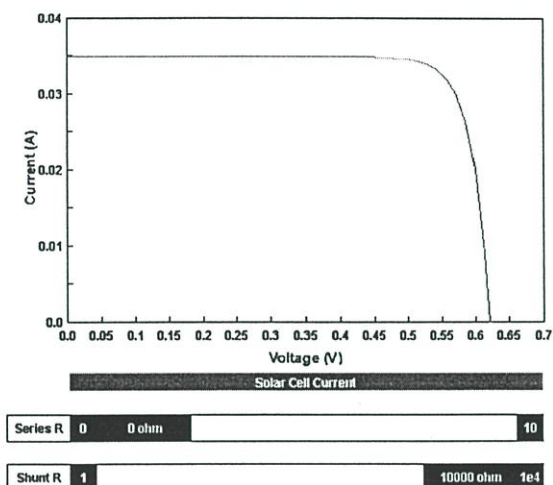


Series R	0	0 ohm	10
Shunt R	1	158 ohm	1e4

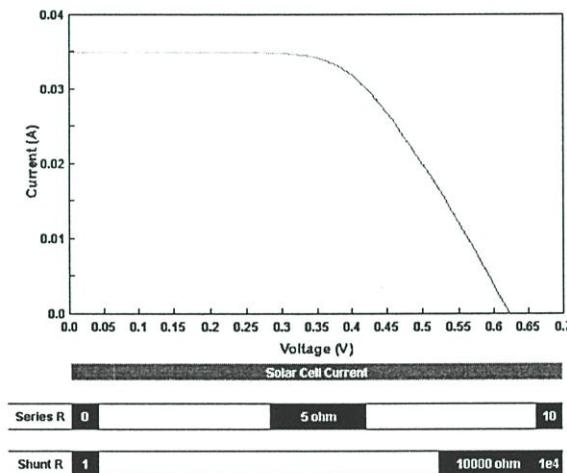
2.31 (ข)



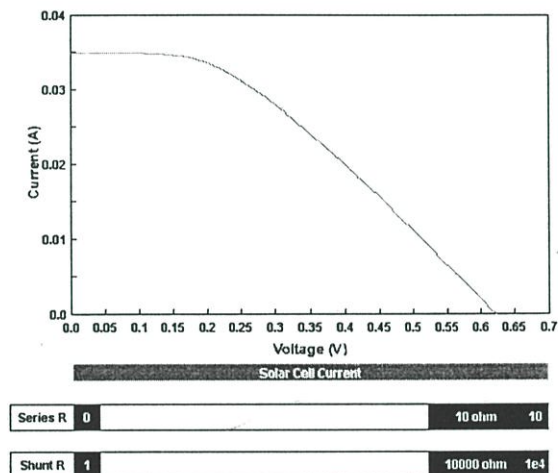
2.31 (ก)



2.31 (ง)



2.31 (จ)



2.31 (ฉ)

รูปที่ 2.31 ผลการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะเมื่อค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) เปลี่ยนแปลงค่าไป

ก)  $R_{sh} = 1 \quad \Omega$  และ  $R_s = 0 \quad \Omega$

ข)  $R_{sh} = 158 \quad \Omega$  และ  $R_s = 0 \quad \Omega$

ค)  $R_{sh} = 1,000 \quad \Omega$  และ  $R_s = 0 \quad \Omega$

ง)  $R_{sh} = 10,000 \quad \Omega$  และ  $R_s = 0 \quad \Omega$

จ)  $R_{sh} = 10,000 \quad \Omega$  และ  $R_s = 5 \quad \Omega$

ฉ)  $R_{sh} = 10,000 \quad \Omega$  และ  $R_s = 10 \quad \Omega$

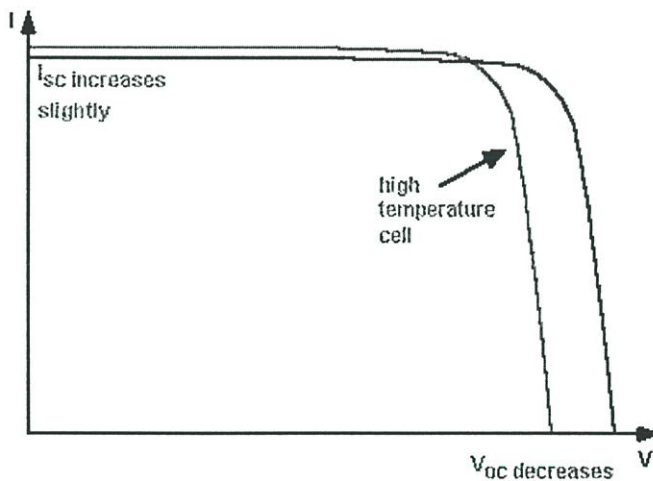
### 2.4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยผลดังกล่าวได้จากรูป 2.32

การคาดคะเนอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ค่าของปริมาณแสง อุณหภูมิโดยรอบ และความเร็วลม สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$T_c = T_a + \theta_G (1 + \theta_{Ta} T_a) (1 - \theta_{Vm} V_m) G \quad (2.22)$$

สมการ 2.22 ซึ่ง  $T_c$  เป็นอุณหภูมิของอาร์เรย์ และ  $T_a$  เป็นอุณหภูมิโดยรอบ  $V_m$  เป็นความเร็วลม  $G$  เป็นปริมาณแสง  $\theta_G = 0.0138$ ,  $\theta_{Ta} = 0.031$  และ  $\theta_{VW} = 0.042$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งหาได้จากข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 2.32 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.4.4.4 คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบและการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ อยู่บนรากฐานของคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแสเซลล์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์ (Cell Temperature) ค่าต่าง ๆ สำหรับจุดประสงค์ในการออกแบบระบบ รูปแบบจะถูกจัดให้อยู่ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์ภายใต้ช่วงสภาวะการใช้งานที่ถูกระบุไว้และคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการข้อมูลจากผู้ผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ นั้น ๆ ด้วย

ในรูปที่ 2.30 เป็นวงจรสมมูลที่ถูกใช้ในการคำนวณสำหรับเซลล์แต่ละตัว และใช้ในการประกอบโมดูลของหลาย ๆ เซลล์ และในการประกอบแถวลำดับเซลล์ (array) ของหลายๆ โมดูล โดยต้องทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 5 ตัวอันได้แก่  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  และพารามิเตอร์การปรับโค้งของเซลล์ที่อุณหภูมิและปริมาณแสงที่ระบุไว้ โดยคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{V + IR_s}{a}\right] - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

และพลังงานจะเป็นดังสมการ

$$P = IV \quad (2.24)$$

ลักษณะกระแส และแรงดันของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เป็นดังรูป 2.29 แกนของกระแส (ซึ่ง  $V=0$ ) คือกระแสลัดวงจร และจุดตัดที่แกนแรงดัน (ซึ่ง  $I=0$ ) เป็นแรงดันเปิดวงจร ซึ่งในช่วงนี้ กระแสจะเกือบคงที่ถึงประมาณ 15 V และที่จุดนี้กระแสไดโอด ( $I_D$ ) จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับที่สภาวะเปิดวงจร ที่ประมาณ 20 V กระแส  $I_L$  ทั้งหมด ( $I_L$  คือ กระแสที่เกิดจากแสง) จะผ่านตัวไดโอด และความต้านทานแบบขนาน (ความต้านทานแบบสั้น) สำหรับการเปรียบเทียบเซลล์ซิลิกอนขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  แรงดันเปิดวงจรจะอยู่ประมาณ 0.6 V และกระแสลัดวงจรจะอยู่ประมาณ 20-30 มิลลิแอมแปร์

## 2.5 การศึกษาผลการต่อรวมเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.5.1 การจัดสมดุลพลังงานของระบบ

โดยการออกแบบระบบนั้นขึ้นอยู่กับรากฐานของความสมดุลระหว่างพลังงานที่ผลิตได้จากแสงแต่ละปี กับพลังงานที่โหลดต้องการ ข้อมูลในการหาขนาดของระบบเป็นดังนี้

- พิจารณาจากข้อมูลของปริมาณแสงของพื้นที่นั้น และมุมเอียงของแผงเข้าด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณแสงที่ตกในแต่ละวันในทุกเดือนของปี
- การพิจารณาความต้องการของโหลดที่ถูกระบุ หรือชนิดของโหลดที่เหมือนกันในระบบจะถูกใช้ในการพิจารณาความต้องการของโหลดในแต่ละวัน

#### 1) การหาจำนวนโมดูลที่ต่อกันแบบอนุกรม

แรงดันกระแสตรง ( $V_{DC}$ ) ที่ใช้งานของระบบจะถูกกำหนดมาให้ ดังนั้นจำนวนโมดูล ( $N_s$ ) ซึ่งถูกต่อกันแบบอนุกรมจะหาได้จากค่าแรงดันของระบบ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$N_S = \frac{V_{DC}}{V_m} \quad (2.25)$$

ซึ่ง  $V_m$  เป็นแรงดันที่ผลิตได้ของโมดูลหนึ่ง โมดูล

2) จำนวนของแผงเซลล์ที่จะถูกต่อกันแบบขนาน

จำนวนแผงเซลล์ที่นำมาต่อขนานนี้จะเกี่ยวข้องกับกระแสที่ต้องการของโหลดการะ โดยกระแสของโหลดการะนี้ สามารถคำนวณได้จาก

$$I_L (A) = \frac{E_L}{(24V_{DC})} \quad (2.26)$$

ซึ่ง  $E_L$  ( $W_h/day$ ) เป็นค่าพลังงานที่โหลดการะต้องการ

ตอนนี้เราสามารถหาค่ากระแสปกติ ( $I_P$ ) ซึ่งได้จากการผลิตของแผงที่ทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุด และปริมาณแสงที่มาตรฐาน A..M. 1.5 (ปริมาณแสงที่  $1 \text{ kW/m}^2$ ) ซึ่งสมมูลของพลังงานในแต่ละวันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_L (W_h / day) = PSH * I_P * V_{DC} \quad (2.27)$$

เมื่อเรานำปริมาณแสงที่หาได้แล้วบนแผงทำให้อยู่ในรูปของ peak solar hours ( $PSH$ ) ซึ่งเท่ากับจำนวนของชั่วโมงที่ปริมาณแสงมาตรฐาน ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) ดังนั้นจึงชัดเจนว่าค่า  $PSH$  เป็นค่าที่เท่ากับปริมาณแสงในรูปของ  $\text{kWh/m}^2\text{day}$  โดยใช้สมการที่ 2.26 และ 2.27 จะได้

$$I_P = \frac{(24I_L)}{PSH} \quad (2.28)$$

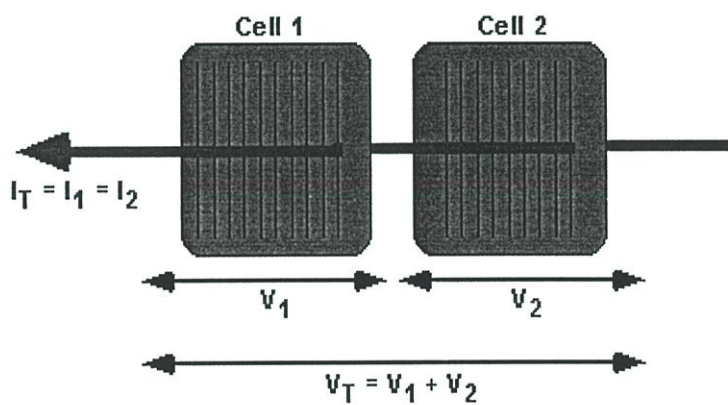
จากสมการที่ 2.28 สามารถแปลงค่าง่าย ๆ คือ กระแสเฉลี่ยของโหลดการะ คูณกับจำนวนชั่วโมงในหนึ่งวันต้องเท่ากับ กระแสปกติ(peak)ของแผงเซลล์ คูณกับจำนวนชั่วโมงของ  $PSH$  ดังนั้นจำนวนโมดูล ที่ต่อแบบขนานจะสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_P = \frac{(SF)I_P}{I_m} \quad (2.29)$$

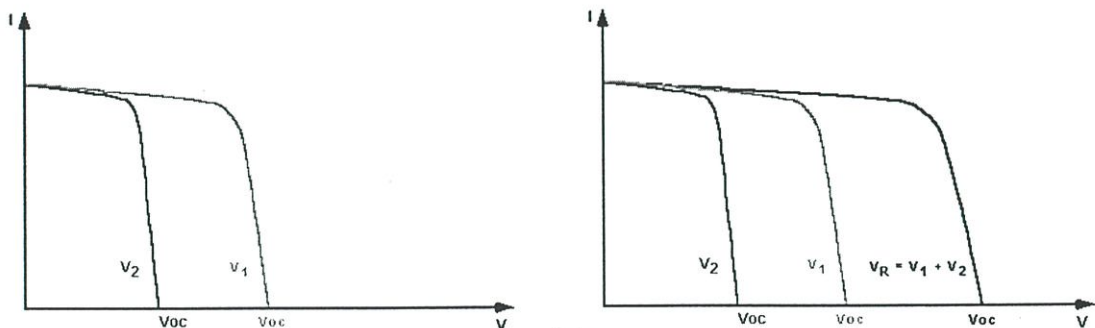
ซึ่ง  $I_m$  เป็นค่ากระแสปกติ ที่ผลิตได้จากโมดูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ละตัวเมื่อแสงตกกระทบภายใต้สภาวะมาตรฐาน และ  $SF$  เป็นค่า sizing factor ซึ่งค่าตัวนี้เป็นค่าขนาดของการเผื่อของปริมาณกระแสที่จะผลิตได้สำหรับอาร์เรย์ โดยค่า sizing factor ตัวนี้จะอยู่ในช่วง 1-1.6

การต่อเซลล์ในลักษณะเป็นโมดูลมาตรฐานทำให้สะดวกในการใช้งาน และการผลิตเป็นอุตสาหกรรมก็สามารถควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้มาตรฐานแน่นอน โมดูลจะถูกนำมาประกอบโดยการเชื่อมต่อเซลล์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วและต่อสายไฟออกมาภายนอก ตัวโมดูลถูกประกบด้วยชั้นพลาสติกกับกระจกปิดทับพร้อมก็นำไปใช้งานได้ การต่อเซลล์ในรูปแบบอนุกรม/ขนาน (หรือขนาน/อนุกรม) นั้นจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่สำคัญอันหนึ่ง คือความน่าเชื่อถือ อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าจะต้องแน่ใจว่าแผงเซลล์มีความปลอดภัยและใช้งานได้แน่นอน ถึงแม้จะใช้งานสนามเซลล์ในกรณีที่เลวร้าย เช่น เซลล์บางตัวเกิดชำรุด (เซลล์มีการเปิดวงจรหรือลัดวงจร) หรือเกิดเงาบังเซลล์บางส่วนของแถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์

ในวงจรที่มีเซลล์ต่อแบบอนุกรมและขนาน ชุดของเซลล์ที่ต่อดังในรูป 2.33 เมื่อนำมาต่ออนุกรมเพิ่มขึ้นจำนวนหนึ่งจนได้แรงดันมาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้ว เรียกว่า โมดูลจัดเข้าแผงได้ ก็เช่นเดียวกันเซลล์จำนวนหนึ่งต่อขนานกันเรียกว่าชั้นโมดูล เอาชั้นโมดูลจำนวนหนึ่งต่ออนุกรมกันจนได้แรงดันมาตรฐาน เรียกว่า โมดูล หรือสตริง (Strings) ดังในรูปที่ 2.34



(ก)

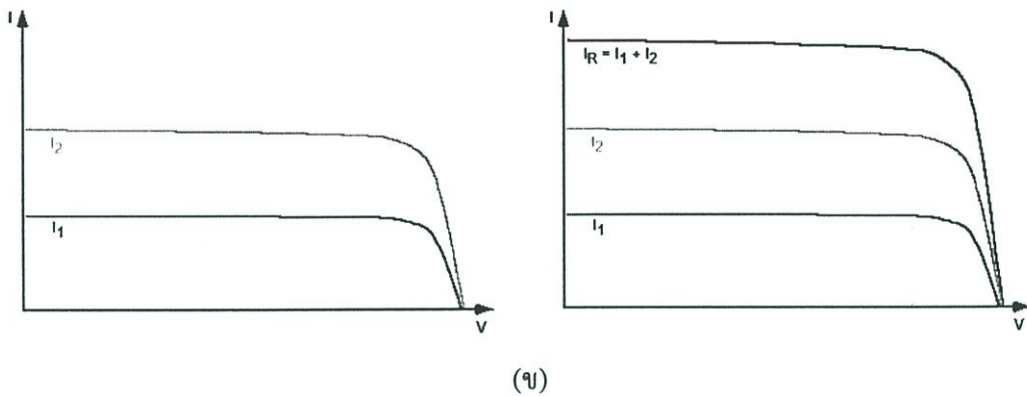
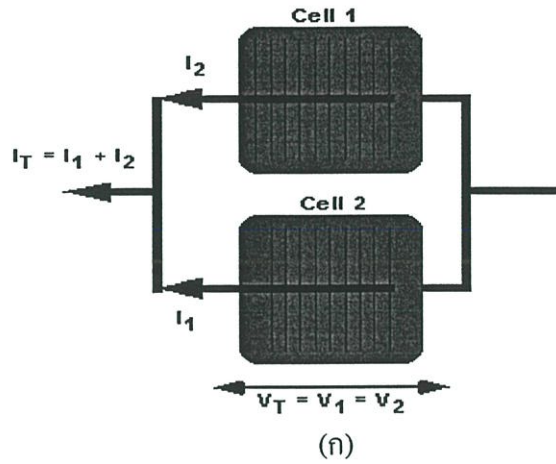


(ข)

รูปที่ 2.33 คุณสมบัติของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

ก) การต่อเซลล์ร่วมกันแบบอนุกรม

ข) การเปลี่ยนแปลงกราฟคุณสมบัติจากผลการต่อร่วมเซลล์แบบอนุกรม

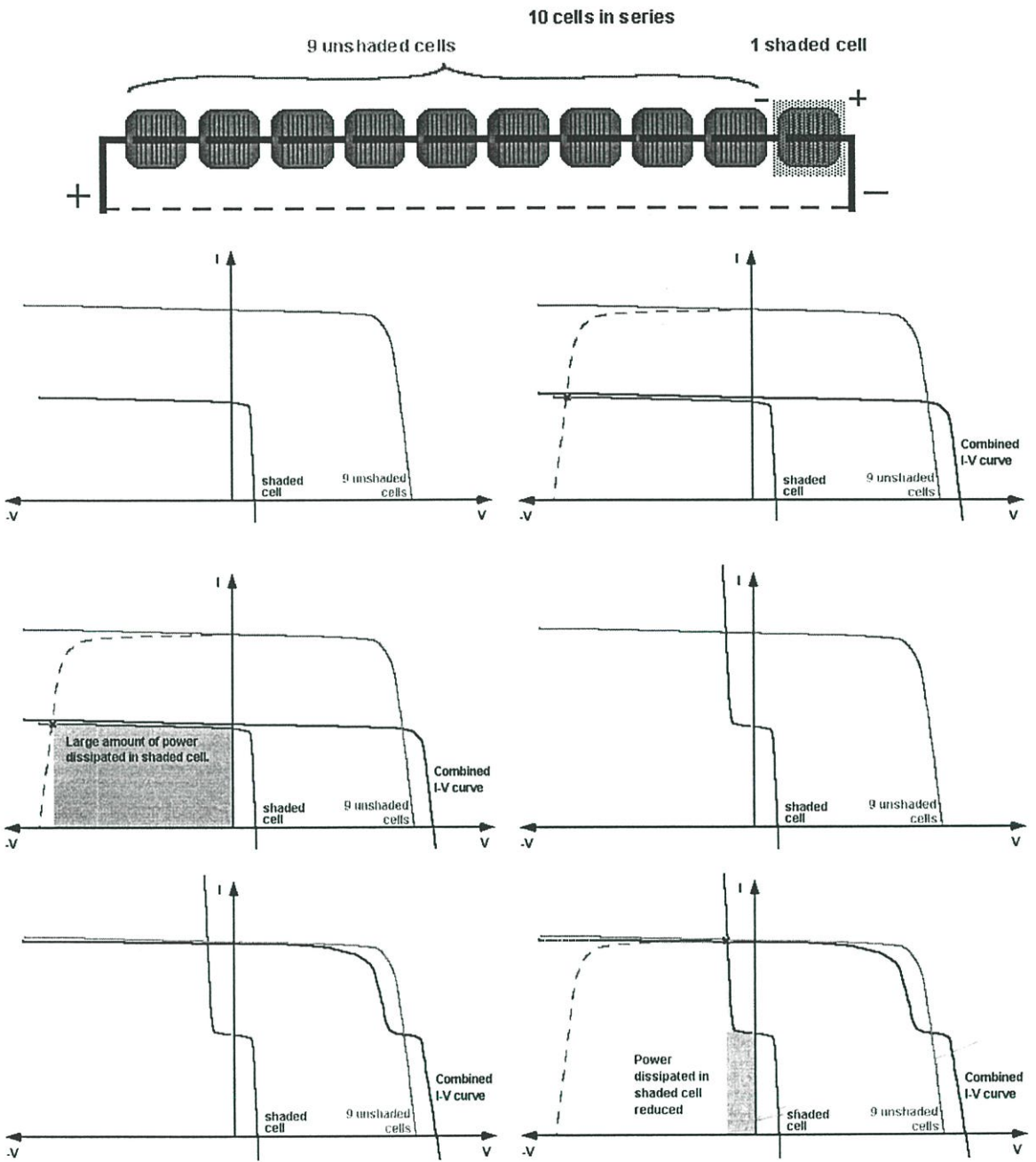


รูปที่ 2.34 คุณลักษณะของการต่อรวมเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

- ก) การต่อเซลล์ร่วมกันแบบขนาน
- ข) การเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะจากผลการต่อรวมเซลล์แบบขนาน

### 2.5.2 ความสิ้นเปลืองกำลังสูงสุดของเซลล์หนึ่งตัวในแผงเซลล์

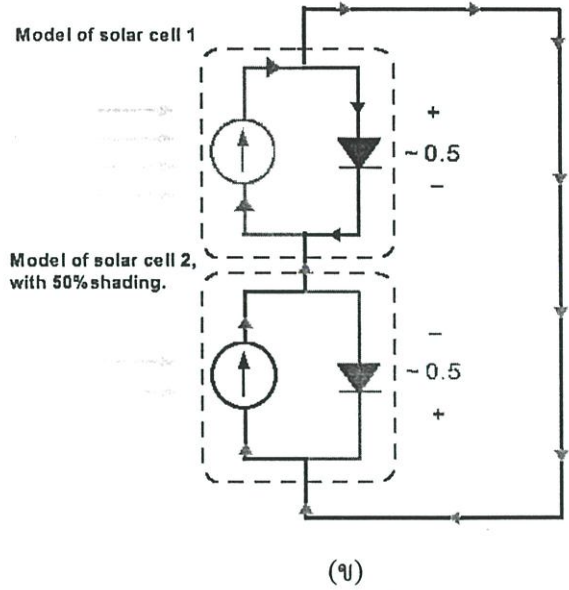
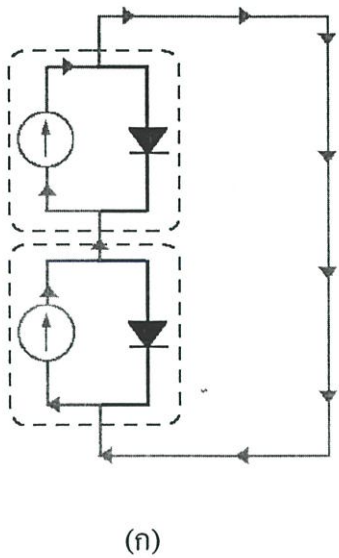
เซลล์ตัวเดียวเมื่อต่อเข้ากับโหลดภาระ ถ้าเซลล์ถูกเงาบังหรือโหลดเปลี่ยนแปลงก็ไม่เกิดความเสียหายใดๆ ต่อเซลล์นั้น เพราะว่ามันเป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจรนั้น เซลล์ยังทนทานต่อการเกิดวงจรเปิดหรือลัดวงจรได้ดีอีกด้วย แต่ถ้าเซลล์นี้ต่อกับเซลล์อื่นๆ อีกหลายตัวเป็นแถวลำดับ ตอนนี้จะมีตัวกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมากซึ่งบางกรณีอาจจะไปไบอัสเซลล์ตัวที่ถูกเงาบัง ทำให้เซลล์พังเนื่องจากกำลังไฟฟ้าจำนวนมากง่ายเข้าไปในเซลล์เกิดความร้อนสูง โดยพิจารณาจากผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์ดังรูปที่ 2.35 ถึงแม้ในเซลล์จะทนอุณหภูมิสูงได้ถึง  $150^{\circ} - 200^{\circ}\text{C}$  ก็ตาม จึงควรกำหนดมิให้เซลล์เกิดความร้อนสูงเกิน  $100^{\circ}\text{C}$  เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ ส่วนที่ใช้เคลือบเซลล์อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ (มักไปในทางเลว) เป็นผลให้ประสิทธิภาพและการทำงานของแผงเซลล์ลดลง อายุการใช้งานจะสั้น



รูปที่ 2.35 ผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์

การไบอัสตรงของเซลล์

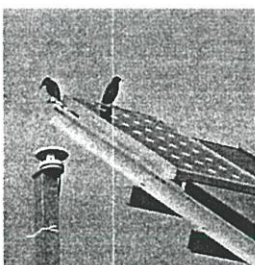
เซลล์ที่ถูกเงาบังจะถูกไบอัสตรง ถ้ามีเซลล์อีกจำนวนหนึ่ง (ได้รับแสงและกำลังผลิตไฟอยู่) ต่อขนานกับมัน สมมุติแยกขั้วโมดูลออกจากแถวลำดับดังรูป 2.36 กระแสทั้งหมดที่ผลิตจากเซลล์ (ต่อขนาน) ที่ถูกแสงจะผ่านเข้าไปยังเซลล์ที่ถูกเงาบัง เหตุการณ์นี้มักเกิดในตอนซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนเซลล์ในแผงกลางแดด ดังนั้นถ้าคำนึงถึงความแตกต่างที่เป็นไปได้ของ  $V_{OC}$  สำหรับเซลล์ในกลุ่มเดียวกันนี้ จะช่วยให้สามารถกำหนดจำนวนจำกัดของเซลล์ที่ควรจะนำมาต่อขนานกันและมีความปลอดภัยได้



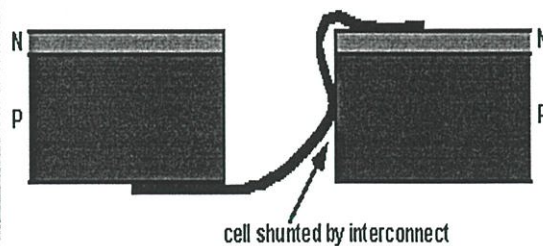
รูปที่ 2.36 ผลการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน  
 ก) ได้รับปริมาณแสงเท่าๆ กัน  
 ข) ได้รับปริมาณแสงที่ไม่เท่ากันเนื่องจากการบังเงา

การไปอัสกลับของเซลล์

การไปอัสกลับของเซลล์มักทำความเสียหายแก่เซลล์ (ผลที่ตามมาอาจทำให้เซลล์ทั้งหมดในแผงเสื่อมคุณภาพ) เนื่องจากเกิดความร้อนในตัวเซลล์สูงเกินไป เมื่อเซลล์ 1 ตัวมีกระแสต่างจากเซลล์ตัวอื่นที่ต่ออนุกรมอยู่ อาจมีสาเหตุมาจากการถูกเงาบังหรือเกิดการชำรุด โดยดูได้จากตัวอย่างสาเหตุของการบกพร่องได้จากรูปที่ 2.37 เช่น กริดหัก เซลล์แตก และจากความไม่สมบูรณ์ต่างๆ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้มีการสิ้นเปลืองกำลังในตัวเซลล์ เนื่องจากแรงดันของเซลล์อื่นๆ จะไปไปอัสกลับต่อเซลล์ตัวนั้น จุดไปอัสของเซลล์ตัวที่มีปัญหาได้จากจุดตัดระหว่างเส้นลักษณะเฉพาะ I-V - กลับของมันกับเงาของลักษณะเฉพาะตรงของ I-V อื่นที่ต่ออนุกรมอยู่และโหลดภายนอก



(ก)



(ข)

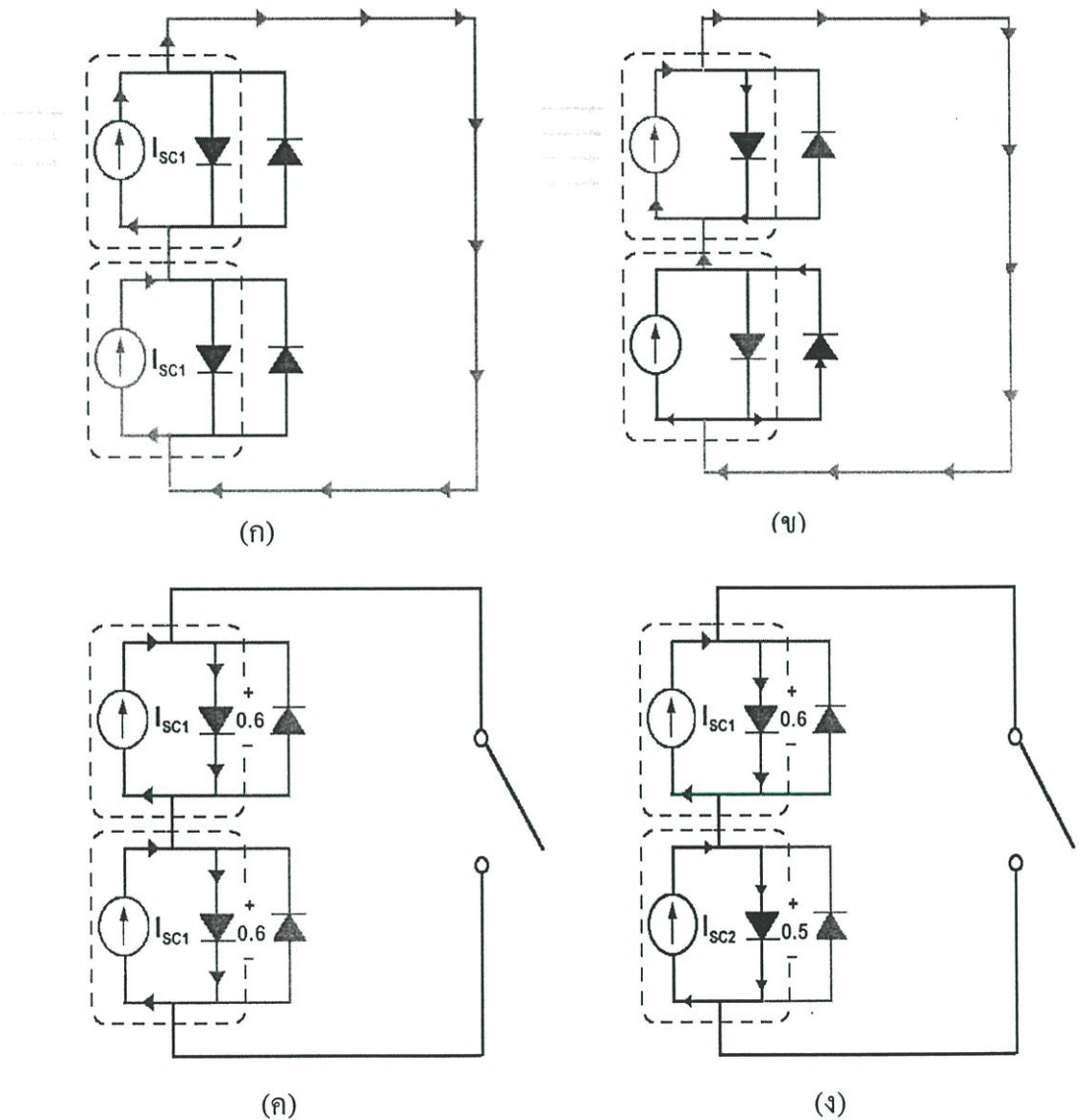


(ค)

รูปที่ 2.37 ผลกระทบต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

- ก) มวลของนกที่เกาะตามแผงเซลล์
- ข) การต่อร่วมเซลล์ที่ไม่สมบูรณ์
- ค) การแตกร้าวบนแผงเซลล์

ในภาวะลัดวงจรเงาเส้น I-V ที่กล่าวถึงคือเส้น I-V ของเซลล์ (n-1) ตัว ส่วนในกรณีมี โหลดต่ออนุกรมอยู่จะต้องกำหนดหาเงาของเส้น I-V โดยเอาแรงดันที่ตัดคร่อมโหลดหักออกจาก เส้น I-V เดิมเสียก่อน รูป 2.38 แสดงให้เห็นผลจากภาวะลัดวงจร อันเป็นผลจากแรงดันรวมทั้ง หมดของเซลล์ที่ถูกแสงจะไปไบอัส (กลับ) เซลล์ตัวเงาบ้าง กำลังสิ้นเปลืองอาจสูงมาก ดังนั้นในแถว ลำดับแรงดันสูง (high voltage arrays) จึงควรรวมวงจรการออกแบบโมดูลให้มีการป้องกันที่ เหมาะสม เพื่อความปลอดภัยของเซลล์ในขณะที่ทำงาน

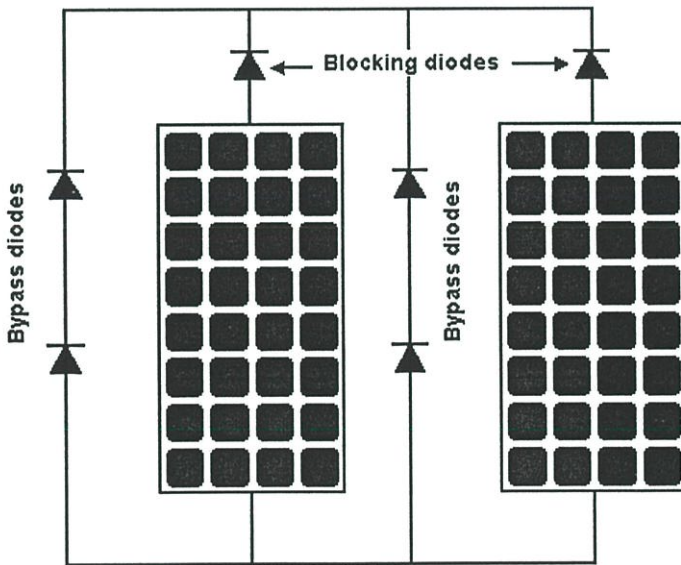


รูปที่ 2.38 สถานะการทำงานของชุดเซลล์เมื่อมีการลัดวงจร และเปิดวงจรภายใต้การรับอาบรังสีที่ ต่างกัน

- ก) สถานะการลัดวงจรเมื่อได้รับแสงเท่ากัน    ข) สถานะการลัดวงจรเมื่อปริมาณแสงต่างกัน  
 ค) สถานะการเปิดวงจรเมื่อได้รับแสงเท่ากัน    ง) สถานะการเปิดวงจรเมื่อปริมาณแสงต่างกัน

### 2.5.3 รูปแบบการต่อเซลล์อย่างอนุกรม และขนาน

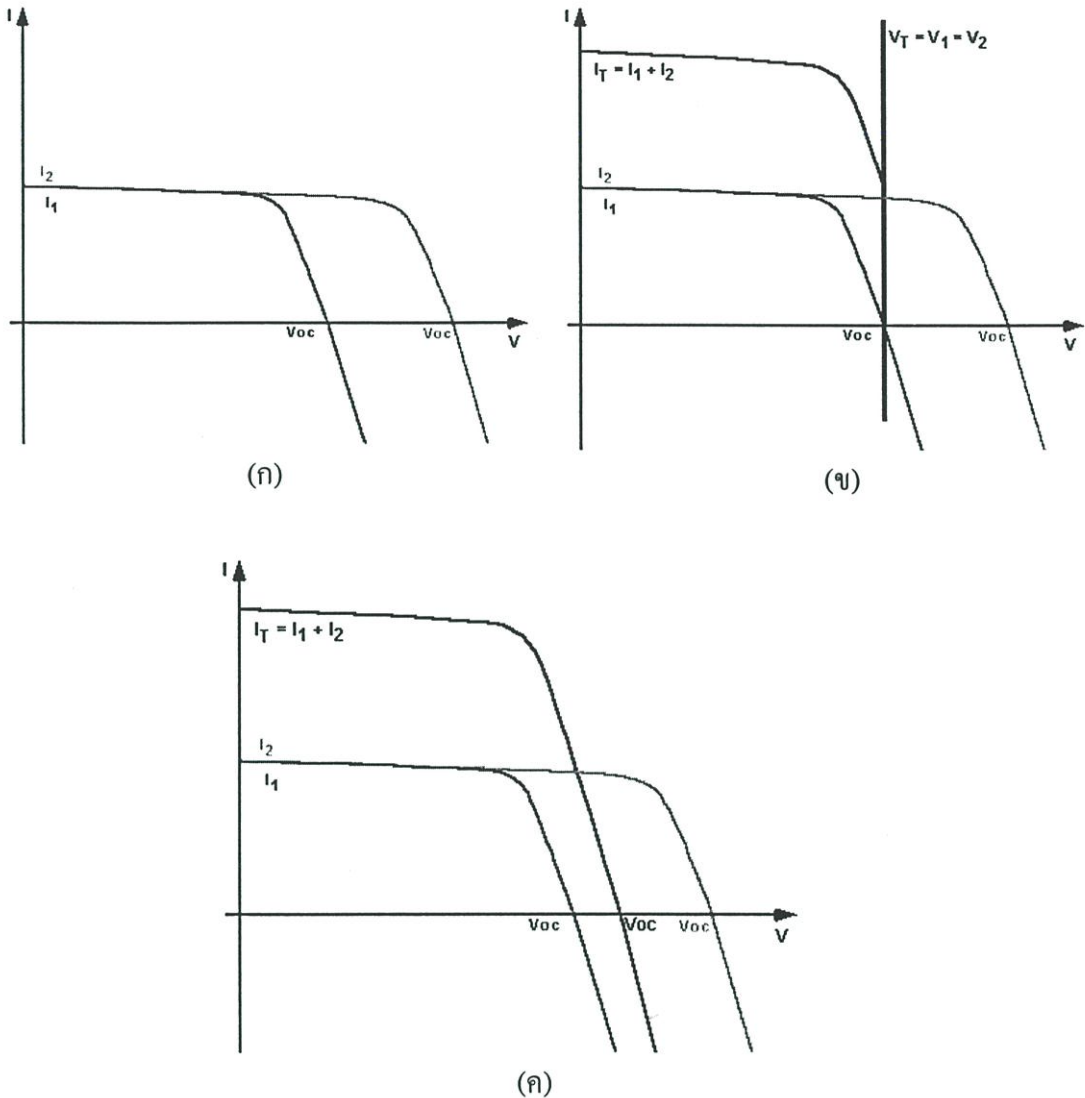
ในการต่อเซลล์ขนาน  $m$  ตัว (1 ซับโมดูล) และต่ออนุกรม  $n$  ซับโมดูล ถ้าเซลล์ 1 ตัวถูกเงาบัง (หรือไม่คู่ควร) ความรุนแรงของการไปอัสกลับต่อตัวมันจะน้อยเพราะว่าเซลล์ตัวอื่นทุกตัวที่ต่อขนานกับมันจะต้องถูกแรงดันไปอัสตัวเดียวกันในกรณีนี้เซลล์ตัวอื่นๆ (ที่ถูกแสง) ที่ขนานกันจะสิ้นเปลืองกำลังสูงกว่าเซลล์ตัวถูกเงาบังเสียอีกเพราะที่แรงดันเดียวกัน มันจำเป็นต้องเฉลี่ยกันรับภาวะกระแสที่ดังรูป 2.39 สมมุติต่อบายพาสไดโอดคละอม  $n$  ซับโมดูลที่อนุกรมกัน ขณะนี้กำลังพิจารณาในแง่เมื่อเกิดภาวะการไปอัสกลับสำหรับเซลล์เงาบัง 1 ตัว ในกลุ่มเซลล์ขนาน (ในซับโมดูลอันหนึ่งอันใด) โดยซับโมดูลที่มีเซลล์เงาบังจะถูกไปอัสกลับเมื่อซับโมดูลที่เหลือซึ่งอยู่ในสตริงอนุกรมเดียวกัน พยายามดันกระแสซึ่งมากกว่าให้ผ่านซับโมดูลที่มีเซลล์เงาบัง (กระแสสูงกว่า  $I_{SC}$  ของมันที่ควรจะมีตามปกติ) สำหรับบายพาสไดโอดมันจะถูกไปอัสตรงทันทีที่ซับโมดูลนี้ถูกไปอัสกลับเลยกระแสไม่ให้อ่านสตริงนี้ พิจารณาจากรูป 2.39 ในการใช้งานจะมีบล็อกกิ้งไดโอดต่ออนุกรมที่ขั้วของสตริงแต่ละชุด ลักษณะการต่อให้ไปโอดถูกไปอัสตรงขณะใช้งานปกติ ถ้าเซลล์หนึ่งตัวในสตริงใดชำรุดหรือเงาบัง



รูปที่ 2.39 ลักษณะการต่อใช้งานของบายพาสไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด

เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกนำไปใช้งานจะถูกต่อร่วมกันเป็น โมดูล และหลายๆ โมดูลจะถูกต่อเป็นอาร์เรย์ โมดูลแต่ละโมดูล จะประกอบด้วยเซลล์ที่ต่อแบบขนานและอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการ และอาร์เรย์จะประกอบด้วยหลายๆ โมดูลที่นำมาต่ออนุกรมและขนานกัน สำหรับการบ่งชี้โมดูลหรือเซลล์ที่จะต่อแบบอนุกรมจะถูกกำหนดด้วยค่าแรงดัน และเมื่อต่อแบบขนานกระแสจะเป็นตัวกำหนด ถ้าไม่มีการระบุลักษณะเฉพาะของเซลล์ และโมดูลจะเป็นการยากมากในการวิเคราะห์

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามความต้องการของโหลดภาระ รูป 2.40 แสดงคุณสมบัติ กระแสและแรงดันของโมดูล ที่ต่อ 1 และ 2 ตัว ทั้งในแบบที่ต่ออนุกรมและขนาน



รูปที่ 2.40 การเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเฉพาะเมื่อนำเซลล์ที่มีคุณสมบัติต่างกันมาต่อร่วมกันแบบขนาน

- ก) กราฟคุณลักษณะของแต่ละเซลล์
- ข) เมื่อมีการนำเซลล์มาต่อขนาน
- ค) ผลที่ได้รับเมื่อต่อร่วมกันแบบขนาน

โดยเส้นโค้งของ กระแสและแรงดันทั้งหมดในส่วนนี้จะถูกดำเนินการภายใต้สมการ 2.23 โดยพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัว ในโมเดลจะหาได้โดยตรง ด้วยการวัดคุณสมบัติ แรงดันและกระแสของโมดูลที่สภาวะอ้างอิง โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะกระทำภายใต้ปริมาณแสงอ้างอิงที่  $1000 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิโดยรอบ(ambient temperature)ที่ 25 องศาเซลเซียส

สำหรับการวัดกระแสและแรงดันที่สภาวะอ้างอิงนี้มักจัดอยู่ภายใต้สภาวะเปิดวงจร, ลัดวงจร และสภาวะกำลังสูงสุด แต่มันเป็นไปได้ที่จะหาพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัว โดยใช้การวัดแค่ 3 สภาวะนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตามความต้านทานขนานของเซลล์ใหม่ๆ ที่ผลิตได้ตอนนี้จะสูงมากดังนั้นทอมสคูท่ายของสมการ 2.23 มักจะถูกตัดทิ้งไป แต่ที่สภาวะแรงดันต่ำจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความต้านทานขนานด้วย เพราะถ้าไม่พิจารณาความต้านทานตัวนี้ความชันที่ได้จะผิด เมื่อความต้านทานขนานถูกทำให้เป็นค่าอนันต์ ก็จะมีเหลือ พารามิเตอร์อีก 4 ตัวที่ต้องหาภายใต้การวัดจุด 3 จุด ที่อยู่บนเส้นโค้งของ กระแสและแรงดัน เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ ทั้ง 4 ตัวนี้ ที่สภาวะลัดวงจร กระแสไดโอด ( $I_D$ ) จะน้อยมาก และ กระแสเนื่องจากแสง ( $I_L$ ) จะเท่ากับกระแสที่ลัดวงจร

$$I_L = I_{sc} \quad (2.30)$$

ที่สภาวะเปิดวงจร กระแสจะถูกทำให้เป็นศูนย์ และค่า 1 ที่อยู่ทีสมการ 2.23 จะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับในทอมของเอ็กโพเนนเชียล ดังนั้น

$$I_0 = I_L \exp\left(\frac{-V_{oc}}{a}\right) \quad (2.31)$$

การพิจารณาเส้นโค้งของ กระแสและแรงดันที่สภาวะกำลังสูงสุด จะถูกแทนที่ลงไปในการสมการ 2.23 , ค่า  $I_0$  จากสมการ 2.31 และค่า  $I_L$  จากสมการ 2.30 โดยตัด 1 ทิ้งไป ผลจะเป็นดังนี้

$$R_s = \frac{\{ a \ln(1 - I_{mp} / I_L) - V_{mp} + V_{oc} \}}{I_{mp}} \quad (2.32)$$

สมการ 2.32  $R_s$  จะสัมพันธ์กับ  $a$  แต่ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัด โดยค่า  $R_s$  สูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ  $a$  เข้าใกล้ศูนย์ และค่าของ  $a$  จะสูงสุดเมื่อ  $R_s$  เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งตามปกติผู้ผลิตจะไม่ได้วัดพารามิเตอร์ของทั้งคู่ที่สภาวะต่างไว้ ดังนั้นค่าที่เราจะเลือกใช้ได้คือการใช้สภาวะที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งอนุพันธ์ของพลังงาน (แรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์) และจากการคำนวณในกรณีนี้ ในบางครั้งผลของสมการก็ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าลบสำหรับความต้านทานอนุกรม เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ 2.23 ผลที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ได้ โดยปรากฏการณ์ที่ยุ่งยากทั้งหมดเกิดขึ้นจากโปรตอนทำงานร่วมกับสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 2.32 แสดงผลของอุณหภูมิบน โมดูลในลักษณะเส้นโค้งของ กระแสและแรงดันที่ระดับปริมาณแสงคงที่ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจรลดลง และเพิ่มกระแสลัดวงจรเล็กน้อย เพื่อที่ว่าโมดูลจะสามารถบ่งชี้ผลกระทบได้ มันจำเป็นต้องรู้โมเดลของพารามิเตอร์

อันได้แก่  $I_o$ ,  $I_L$  และ  $a$  ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ สำหรับค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ได้ถูกระบุค่าให้เป็นอิสระจากอุณหภูมิในโมเดลนี้ สมการต่อไปนี้จะแสดงค่าประมาณการที่ถูกต้องสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ หลาย ๆ โมดูล

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{C,ref}} \quad (2.33)$$

$$I_L = \left(\frac{G_T}{G_{T,ref}}\right) [I_{L,ref} + \mu_{L,sc} (T_c - T_{c,ref})] \quad (2.34)$$

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{\mathcal{E}N_s}{a_{ref}} * \left(1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)\right] \quad (2.35)$$

ซึ่ง  $\mathcal{E}$  เป็นค่าพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุ โดยมีค่าเป็น 1.12 eV สำหรับซิลิกอน และ 1.35 eV สำหรับแกเรียมอาร์เซไน ค่า  $N_s$  เป็นจำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในโมดูล คู่กับจำนวนโมดูลที่ต่อเป็นอนุกรม ซึ่งปริมาณต่างๆ เหล่านี้จะถูกระบุไว้ในรูปของค่าอ้างอิง (REFERENCE = REF) ซึ่งจะทำให้การวัดที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน โดยสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจร จะถูกหาจากการวัดที่สภาวะแสงอ้างอิงจากสมการดังนี้

$$\mu_{L,sc} = \frac{dI_{sc}}{dT} = \frac{\{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)\}}{(T_2 - T_1)} \quad (2.36)$$

ที่  $T_2$  และ  $T_1$  ถูกวัด ณ สภาวะอุณหภูมิอ้างอิงและในทำนองเดียวกัน สัมประสิทธิ์ของแรงดันเปิดวงจรหาได้จาก

$$\mu_{V,oc} = \frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{\{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)\}}{(T_1 - T_2)} \quad (2.37)$$

จากข้างต้นจึงทำให้สามารถจะระบุสมการของโมเดลได้ ถ้าเรารู้สัมประสิทธิ์ของกระแสลัดวงจร และสัมประสิทธิ์ของแรงดันเปิดวงจร เป็นการแสดงว่าสมการอิสระที่เพิ่มเข้ามาจะถูกหาได้จากการทดลองหาค่าของ  $\mu_{V,oc}$  โดยค่านี้ถูกหาจากการวิเคราะห์ของ  $dV_{oc}/dT$  ดังนั้น  $V_{oc}$  ที่

ถูกอนุพันธ์แล้วในสมการ 2.31 ซึ่งอยู่ในรูปของค่า  $T$  จะถูกใช้ในสมการ 2.33 และ 2.35 และใช้ในการหาของ  $\mu_{L,sc}$  ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$a_{REF} = \frac{(\mu_{V,oc} T_{oc,ref} + \mathcal{E}N_S)}{(\mu_{L,sc} T_{C,ref} / I_{L,ref} - 3)} \quad (2.38)$$

ถ้าค่า  $a_{REF}$  ที่หาได้จากสมการ 2.38 มากกว่าศูนย์ แต่น้อยกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากสมการ 2.32 (ตัวอย่าง เช่น ความต้านทานอนุกรมมีค่า เท่ากับศูนย์) ดังนั้นรูปแบบของเซลล์โมดูลจะสมบูรณ์ซึ่งค่าของ  $V_{OC}, I_{SC}, I_{MP}, V_{MP}, \mu_{L,SC}$  และ  $\mu_{voc}$  ถูกวัด ณ. สภาพะอ้างอิง จากสมการ 2.30 , 2.32 และ 2.38 ถูกใช้เพื่อหาค่า  $I_L, I_O, R_S$  และ  $a$  ที่สภาพะอ้างอิง และสมการ 2.33 - 2.35 ถูกใช้เพื่อหาค่า  $I_O, I_a$  และ  $a$  ที่อุณหภูมิเซลล์ใด ๆ ซึ่งขบวนการนี้จะสามารถหาค่า  $I_L$  ที่สภาพะอ้างอิง จากสมการ 2.30 และสามารถหาค่า  $a_{REF}$  จากสมการ 2.23 หาค่า  $I_{O,REF}$  จากสมการ 2.31 และหาค่า  $R_{S,REF}$  จากสมการ 2.32 และสามารถหา  $a, I_L$  และ  $I_O$  ที่อุณหภูมิใด ๆ โดยใช้สมการ 2.33 - 2.35 ดังนั้นคุณสมบัติของค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จะสามารถหาได้จากสมการ 2.23 และ 2.24 ซึ่งค่าความต้านทานขนานถูกกำหนดค่าให้เท่ากับอนันต์ ถ้าค่าของ  $a_{REF}$  ที่หาจากสมการ 2.23 เป็นค่าติดลบหรือมากกว่าค่าสูงสุดที่ได้รับจากสมการ 2.32 แล้ว ทางเลือกที่จะใช้ค่า(ค่าซึ่งเพียงพอกับการคาดเดาคุณสมบัติเซลล์ที่พิจารณา) หรือเพื่อค้นหาโมเดล โดยมีความเป็นไปได้อย่างหนึ่งที่จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของ  $N_S$  ในสมการ 2.38 และให้ปรากฏอยู่ในพารามิเตอร์ของโมเดลตัวอื่นๆ ดังนั้น สภาพะอื่นๆ ก็มีความจำเป็นเช่นกัน ค่าประสิทธิภาพ ณ. จุดกำลังสูงสุดของโมดูล เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีความสำคัญประมาณคุณสมบัติลักษณะของระบบ ซึ่งประสิทธิภาพ ณ. จุดกำลังสูงสุดของโมดูลเป็นดังต่อไปนี้

$$\eta_{mp} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{A_c G_I} \quad (2.39)$$

ค่าของประสิทธิภาพนี้อยู่ในค่าเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ณ. จุดกำลังสูงสุด โดย  $\mu_{PMP}$

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu_{P,mp} (T_C - T_{ref}) \quad (2.40)$$

ค่าของ  $\mu_{Pmp}$  ถูกระบุจากการแก้ปัญหาโมเดลเซลล์ของประสิทธิภาพ ณ.จุดกำลังสูงสุดที่เกินช่วงอุณหภูมิ ผลของการคำนวณสำหรับโมดูล ที่ใช้เป็นตัวอย่างสัมประสิทธิ์ที่จุดกำลังสูงสุด

จะเห็นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงของอุณหภูมิ และมันยังอิสระจากปริมาณแสงใด ๆ การประมาณค่า  $\mu_{P,mp}$  สำหรับสมการ 2.39 แสดงได้ดังนี้

$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta_{mp}}{dT} = \left( \frac{I_{mp} dV_{mp}}{dT} + \frac{V_{mp} dI_{mp}}{dT} \right) / A_c G_I \quad (2.41)$$

สำหรับโมดูลจำนวนมากๆ  $\mu_{ISC}$  มีค่าน้อยมาก ซึ่งผลของมันนี้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับค่า  $dV_{mp}/dT$  ซึ่งประมาณค่าคร่าว ๆ ได้เท่ากับศูนย์ และค่า  $dV_{mp}/dT$  ประมาณค่าอย่างคร่าว ๆ ได้เท่ากับ  $dV_{oc}/dT$  ซึ่งการประมาณค่านี้ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่จุดกำลังสูงสุดประมาณดังนี้

$$\mu_{P,mp} = \frac{I_{mp}}{A_c G_T (dV_{oc}/dT)} = \frac{\eta_{mp,ref} \mu_{Voc}}{V_{mp}} \quad (2.42)$$

## 2.6 แบตเตอรี่

### 2.6.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

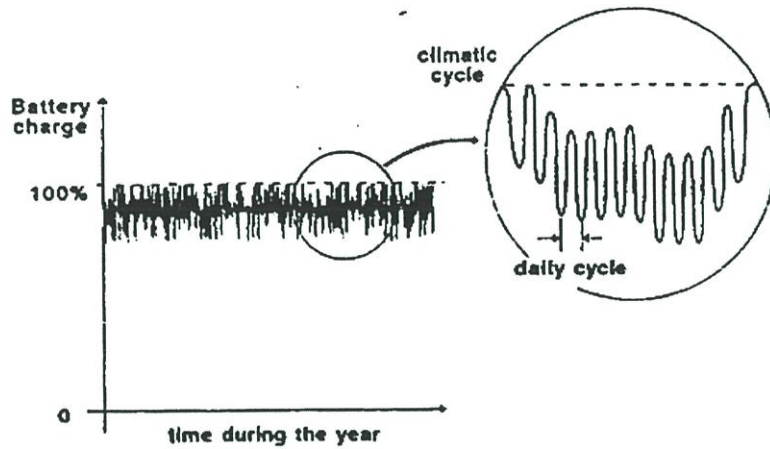
แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่สำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้งานในรถยนต์ทั่วไป แบตเตอรี่แบบนี้ถูกผลิตขึ้นสำหรับงานที่หลากหลายโดยผู้ผลิตจะบอกคุณสมบัติต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่แบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ต้องการการดูแลรักษาบ่อย, ต้องคอยดูระดับน้ำกรดที่หายไประหว่างการใช้งาน, น้ำหนักมากจึงขนย้ายลำบากและเสียค่าก่อสร้างสำหรับวางแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น แต่ที่แบตเตอรี่แบบนี้มีใช้งานกันมากในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์[13] เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน, อายุการใช้งานนาน และราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่แบบแห้ง

Advanced Batteries แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นระบบ zin/bromine ข้อได้เปรียบของแบตเตอรี่แบบนี้คือ มีราคาต่ำ, น้ำหนักเบาเนื่องจากหลอมจากพลาสติกทำให้ขนย้ายง่าย, ทนทาน, ใช้งานได้หลายรูปแบบ แต่ข้อด้อยคือ ต้องการการดูแลรักษาสูงซึ่งต้องบำรุงรักษาปั๊มที่ใช้สำหรับหมุนเวียนสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา, และประสิทธิภาพใช้งานต่ำ

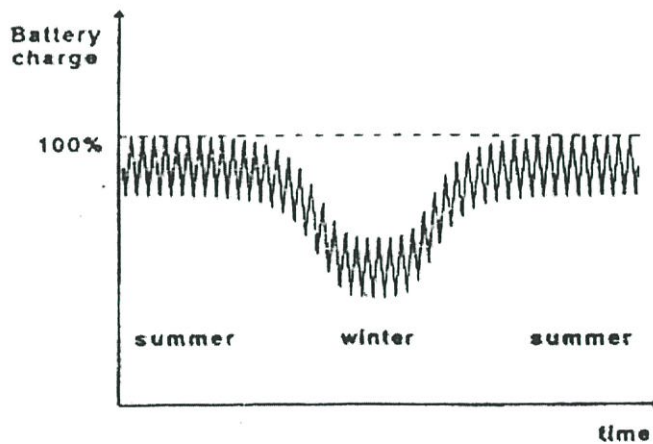
Nickel-Cadmium Battery(Ni-Cd) ถ้าพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของแบตเตอรี่แล้ว แบตเตอรี่แบบนี้เป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์อย่างมาก เนื่องจากไม่มีปัญหาจากการใช้ที่ deep cycle เลย แต่ข้อเสียคือ มีราคาแพง และหาได้ยาก จึงถูกจำกัดการใช้งานในระบบเล็กๆ เท่านั้น

## 2.6.2 การใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แบตเตอรี่จะใช้งานได้ในสถานะที่จำกัด ณ การออกแบบแต่ละชนิดจะมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุในช่วงเวลากลางวัน และจะปล่อยประจุในเวลากลางคืน โดยค่าอัตราการคายประจุในแต่ละวัน ต้องไม่สูงมากนักสำหรับระบบที่ไม่มี การสำรองพลังงานแบบอื่นร่วมด้วย



รูปที่ 2.41 วัฏจักรการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละวันในรอบปี



รูปที่ 2.42 การทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศที่ต่างกัน

### การเลือกใช้และการออกแบบแบตเตอรี่

คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์[14]

1. มี Cycle life สูง สำหรับการใช้งานแบบ Deep cycle
2. ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
3. ประสิทธิภาพในการชาร์จสูง
4. มีความสามารถที่จะดำรงอยู่ในสถานะที่ถูกปล่อยประจุจนหมด

5. อัตรา self-discharge ต่ำ
6. มีความเชื่อถือได้สูง (reliable)
7. อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลให้การทำงานของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

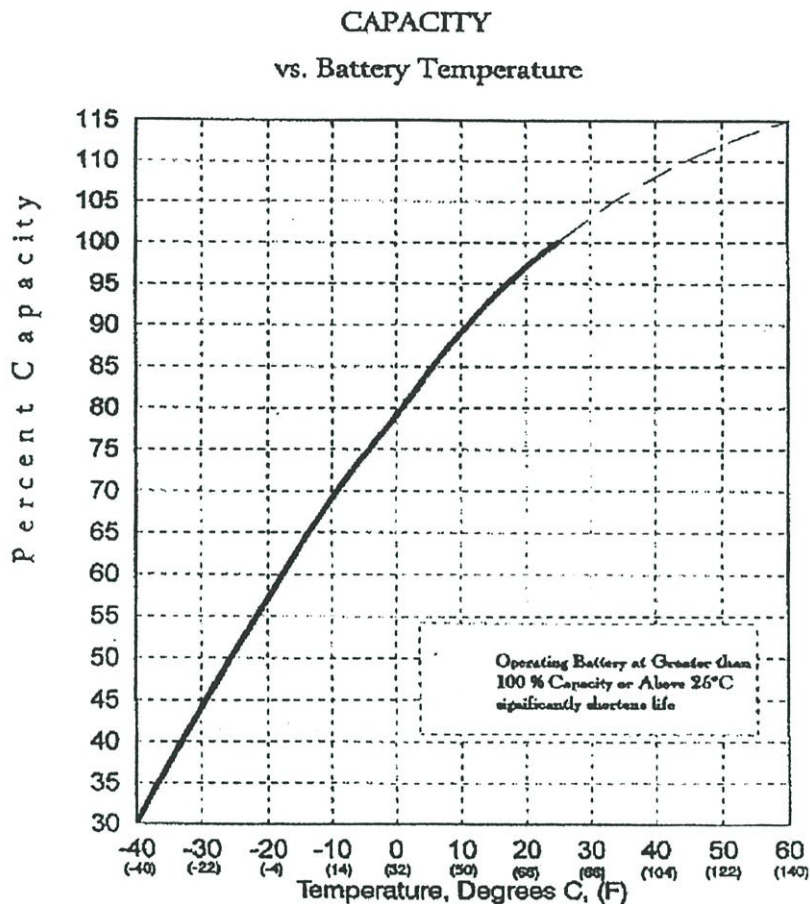
ปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการพิจารณาเลือกแบตเตอรี่สำหรับการสร้างระบบจริง

1. ง่าย หรือมีเพียงพอให้นำไปใช้งานได้
2. ระยะทาง เวลา และราคาในการขนส่งไปยังบริเวณที่ติดตั้ง (ในกรณีระบบมีขนาดใหญ่)
3. การบำรุงรักษาระหว่างใช้งาน
4. น้ำหนัก
5. ราคาและความยากง่ายในการหาซื้ออุปกรณ์ควบคุม ถ้าหากจำเป็นต้องใช้

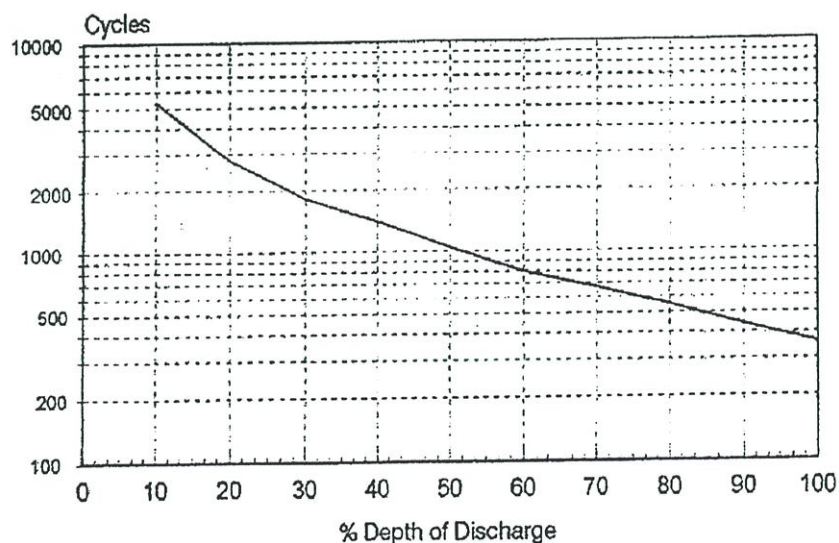
สำหรับในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นั้นส่วนใหญ่ที่ใช้จะใช้แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle Lead Acid เพราะความจุของแบตเตอรี่ที่สูงเพื่อลดจำนวนแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ส่วนใหญ่จะแบ่งตามขนาด 2 โวลต์, 6 โวลต์, 12 โวลต์ และ 24 โวลต์ สำหรับการเลือกขนาดแรงดันของเซลล์นั้น ควรจะเลือกขนาด 2 โวลต์ มากกว่าเซลล์ขนาด 6 โวลต์ หรือ 12 โวลต์ เพราะว่าแผ่นธาตุจะหนากว่า โดยปกติอายุการใช้งานของเซลล์ขนาด 2 โวลต์ จะประมาณ 2750 deep cycle เมื่อเปรียบเทียบกับ 700 deep cycle ของเซลล์ขนาด 6 โวลต์ และ 12 โวลต์ อีกทั้งแบบ 2 โวลต์ ยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยกว่า เพราะไม่ต้องเติมน้ำบ่อยๆ สำหรับการตรวจสอบแบตเตอรี่นั้นทำได้โดยตรวจดูที่แรงดันเซลล์แต่ละเซลล์ได้ โดยแรงดันเซลล์ควรอยู่ภายใน 0.05 โวลต์ เช่น ค่าที่อ่านได้สูงสุดเป็น 2.15 โวลต์ ค่าที่อ่านได้ต่ำสุดเป็น 2.10 โวลต์ โดยถ้ามีค่าแตกต่างกันี้ควรจะเปลี่ยนแบตเตอรี่ แต่สำหรับการตรวจสอบโดยทั่วไปที่ใช้กับแบบ 6 โวลต์ และ 12 โวลต์ ทำได้โดยใช้ hydrometer อ่านค่าถ้ามีการประจุเต็มค่าที่อ่านได้ควรจะเป็น 1.270 จุด (specific gravity)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบใช้งานในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยแรงดันเซลล์อยู่ในฟังก์ชันของอุณหภูมิ, อายุ, อัตราปล่อยประจุ, และชนิดของเซลล์ ในช่วงของการปล่อยประจุ แรงดันจะหล่นลงมาจากค่าเริ่ม 1.98 โวลต์ต่อเซลล์ ไปที่ 1.85 และ 1.65 โวลต์ต่อเซลล์ ขึ้นอยู่กับอายุและการใช้งาน ดังนั้นผู้ผลิตจะต้องระบุแรงดันต่ำสุดในการหยุดใช้งาน สำหรับการปล่อยประจุแบบก้ำกึ่งที่คงที่นั้นกระแสของแบตเตอรี่จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้เข้ากับแรงดันที่ลดลง โดยค่ากระแสสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ค่า end of discharge ส่วนในช่วงเวลาในการอัดประจุแรงดันจะอยู่ในช่วง 2.2 โวลต์ต่อเซลล์ (ตอนเริ่มต้น) และสูงเท่ากับ 2.65 โวลต์ต่อเซลล์ ที่ end of charge โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ การระบุขนาดความจุของแบตเตอรี่จะอยู่ในรูปของ amp-hours (Ah) หรือ kilowatt-hours (kWh) โดยค่านี้จะบ่งบอกว่าเร็วแค่ไหนในการ ปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่อยู่ในรูปของค่า depth of discharge (DOD) โดยค่า depth of discharge ที่สูงๆ (มาก 70-80%) จะทำให้ส่งพลังงานได้สูงแต่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของ

แบตเตอรี่ดังรูปที่ 2.44 และการอัดประจุที่ไม่สมบูรณ์ก็เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ลดลง ดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรออกแบบให้มีการอัดประจุ และนำไปใช้งานที่เหมาะสม



รูปที่ 2.43 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.44 ค่าเปอร์เซ็นต์ Depth of Discharge

## คำนิยามต่างๆ เกี่ยวกับแบตเตอรี่

1. Capacity หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่
2. Ah units of capacity หมายถึง หน่วยที่ใช้ในการวัดค่าความจุของแบตเตอรี่ คือหน่วย ampere-hour(Ah) ซึ่งวัดได้โดยขณะที่ปล่อยประจุให้กระแสไหลออกคงที่ค่าหนึ่ง แล้วนับเวลาจนกระทั่งปล่อยประจุหมด แล้วนำค่ากระแสคูณกับเวลา จะได้ค่า Ah เช่นแบตเตอรี่ที่มีความจุ 80 Ah สามารถจ่ายกระแส 8A เป็นเวลา 10 h หรือ สามารถจ่ายกระแสได้ 4 A เป็นเวลา 20 h จะเห็นว่า ความจุที่วัดได้ จะขึ้นอยู่กับกระแสตอนปล่อยประจุ ซึ่งจะมีผลกับว่าแบตเตอรี่จะถูกใช้ไปเร็วแค่ไหน เมื่อกระแสปล่อยประจุเพิ่มขึ้น ความจุที่ได้รับจริงๆ จะเสมือนว่ามีค่าลดลง ดังนั้น ค่าความจุ จึงถูกเจาะจงไว้เรียกว่า ค่า C rate ของกระแสปล่อยประจุซึ่งก็คือค่าความจุ(Ah) หารด้วยค่า discharge time (n) ซึ่งจะถูกเขียนด้วยตัวเล็ก เช่น แบตเตอรี่มีพิกัด 30 Ah ที่ C/10 หมายความว่า แบตเตอรี่นี้สามารถจ่ายกระแส 3A ได้ในเวลา 10 ชม.
3. Cycle depth หมายถึง เปอร์เซนต์ที่ใช้บอกว่า แบตเตอรี่ถูกใช้ไปมากเท่าไร ก่อนจะถูกชาร์จใหม่
  - shallow cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ปล่อยประจุออกไป น้อยกว่า 50 % ก่อนถูกชาร์จใหม่
  - deep cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ปล่อยประจุออกไป ตั้งแต่ 50% ขึ้นไปก่อนจะถูกชาร์จใหม่
4. Cell life เมื่อใช้แบตเตอรี่ไปสักระยะหนึ่ง ความจุของการชาร์จจะลดลงเหลือ 80% ของแบตเตอรี่ตอนที่ซื้อใหม่ ซึ่ง 20% ที่สูญเสียไปนั้น มีสาเหตุมาจากวงจรรอบการใช้งาน และอายุการใช้งาน จำนวนวงจรที่ชาร์จก่อนที่ความจุจะลดลงเหลือ 80 % จะเรียกว่า cycle life ซึ่งขึ้นอยู่กับ cycle depth, discharge current และอุณหภูมิ ในงานบางประเภทแบตเตอรี่จะถูกใช้น้อยมาก เช่น นำไปใช้เป็น standby battery ซึ่งถูกชาร์จอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดกรณีฉุกเฉินขึ้นจึงจะมีการปล่อยประจุ แต่แบตเตอรี่เหล่านี้ จะมีความจุลดลงอย่างถาวร โดยอายุของมัน ซึ่งเราเรียกว่า calender life หรือ standby life ซึ่งวัดอยู่ในหน่วยปี และมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานด้วย

### 2.6.3 การป้องกันผลกระทบของแบตเตอรี่ที่เกิดจากการปล่อยประจุเกิน

#### Low Voltage Cutoff Unit (LVCU)

เป็นอุปกรณ์ตัดต่อชนิดหนึ่งซึ่งจะใช้ควบคุมการตัดต่อระหว่างแบตเตอรี่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และระหว่างแบตเตอรี่กับโหลดภาระ เมื่ออยู่ในสภาวะที่กำหนด โดยอาศัยการทำงานของชุดรีเลย์ตัดตอน

หน้าที่หลักของ Low Voltage Cutoff Unit มีอยู่ 2 ประการด้วยกัน คือ

1. ทำหน้าที่ตัด โหลดภาระออกจากแบตเตอรี่ เมื่อสถานะการปล่อยประจุของแบตเตอรี่มาถึงจุด Maximum Depth Of Discharge (MDOD) คือ สภาวะที่แบตเตอรี่จ่ายไฟออกไป

จนถึงขั้นต่ำสุดที่กำหนดแล้ว และจะต่อโหลดเข้ากับแบตเตอรี่อีกครั้งหนึ่งเมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุกลับจนถึงระดับที่สูงกว่า maximum depth of discharge แล้ว

2. LVCU จะตัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากชุดแบตเตอรี่ เมื่อแรงดันขาออกของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าน้อยกว่าค่าที่สามารถอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ได้

คุณลักษณะอื่นของ LVCU มีดังนี้

- ในขณะที่ทำงานนั้น LVCU จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการทำงาน โดยจะต่อถาวรกับแบตเตอรี่เลย
- โดยทั่วไปแบตเตอรี่ ที่ใช้ LVCU จะมีการตัดโหลดการะออกเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่ ต่ำลงเหลือประมาณ  $11.1 \pm 0.1$  โวลท์ ที่ 25 องศาเซลเซียส และจะทำการต่อกลับเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุใหม่จนระดับแรงดันถึงประมาณ  $12.3 \pm 5\%$  ที่ 25 องศาเซลเซียส
- LVCU จะมีกลไกที่สามารถป้องกันกระแสไหลจากแบตเตอรี่ ย้อนกลับสู่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่ได้ใช้บล็อกกิ้งไดโอดในการป้องกันกระแสร้อนกลับ แต่จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจและควบคุมปริมาณและทิศทางของกระแส และนำข้อมูลนี้ไปสั่งการทำงานของซูร์เลย์ตัดตอนต่อไป
- อุปกรณ์รีเลย์ที่ใช้ใน LVCU นั้น อย่างน้อยที่สุดต้องสามารถทนกระแสได้ 3 เท่า ของกระแสลัดวงจรที่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- เพื่อจะลดเสิร์จที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของรีเลย์ เราจะใช้รีเลย์หน่วงเวลาใน โดยตั้งการหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ ไว้ประมาณ 5-10 วินาที เพื่อที่จะลดความบ่อยครั้งในการตัดต่อของรีเลย์ลง เพราะการตัดต่อบ่อยเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำให้เกิดเสิร์จขึ้นได้
- LVCU จะต้องมีมาตรฐานที่จะสามารถทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมได้ไม่เกิน 0.05 โวลท์
- อุณหภูมิในการปฏิบัติงานของ LVCU อยู่ระหว่าง 0-55 องศาเซลเซียส
- ความชื้นในการปฏิบัติงานควรอยู่ที่ 0-95 %
- LVCU จะมีไฟแสดงสถานะบอกสถานะการทำงานของอุปกรณ์ โดยทั่วไปจะมี LED อย่างน้อย 4 หลอด ที่บอกสถานะ เช่น
  - ไฟบอกสถานะเมื่อแรงดันจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับแรงดันที่แบตเตอรี่ต้องการ ในการอัดประจุ
  - ไฟที่บอกสถานะเมื่อกำลังมีการอัดประจุของแบตเตอรี่อยู่
  - ไฟที่บอกว่าแบตเตอรี่มีระดับแรงดันที่ใกล้ถึงจุดสูงสุดของมันแล้ว โดยจะมีลักษณะเป็นไฟกระพริบ
  - ไฟที่บอกว่าขณะนี้ระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ถึงจุดต่ำแล้ว

### ชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่

ชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่จะอาศัยหลักการทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการตัดต่อ โดยจะไม่ใช่อุปกรณ์จำพวกรีเลย์

หน้าที่หลักของชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่มีดังนี้

1. จะคอยตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ไม่ให้เกิดแรงดันเกินขึ้น โดยจะทำการตัด แบตเตอรี่ ออกจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อสถานะการประจุของแบตเตอรี่ถึงจุดสูงสุดหรือประจุเต็มแล้วนั่นเอง
  2. จะควบคุมการตัดต่อวงจรระหว่าง แบตเตอรี่กับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแรงดันที่ออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์น้อยมากจนไม่สามารถทำการอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้
- คุณลักษณะอื่นๆ ของชุดควบคุมการประจุแบตเตอรี่ มีดังนี้
- ในการทำงานนั้น ชุดควบคุมการประจุแบตเตอรี่ จะนำพลังงานจากแบตเตอรี่ มาใช้
  - ใช้รีเลย์หน่วงเวลาเพื่อที่จะลดความบ่อยครั้งในการตัดต่อของอุปกรณ์สวิตซ์ลิ่ง โดยตั้ง การหน่วงเวลาการทำงานไว้ประมาณ 5-10 วินาที
  - อุปกรณ์สวิตซ์สามารถทนกระแสไฟได้ประมาณ 2 เท่า ของกระแสลัดวงจรของชุด แผงเซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.6.4 การพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จะจ่ายพลังงานเมื่อโหลดภาระของระบบเกินกว่า พลังงานที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการออกแบบแบตเตอรี่ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นี้เพื่อให้เพียงพอต้องมีแฟกเตอร์ต่างๆ ในการพิจารณาหลายตัว ต้องพิจารณาถึงความจุ และ จำนวนของเซลล์ที่จะใช้ในแบตเตอรี่ โดยจะมีแฟกเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

1. การพิจารณาพลังงานสำรอง คือช่วงเวลาที่โหลดภาระ ควรจะถูกจ่ายพลังงานโดย แบตเตอรี่ที่ติดตั้งไว้ ด้วยการออกแบบที่เหมาะสม
2. การพิจารณาลักษณะของโหลดภาระ โดยปริมาณกระแส ณ. ช่วงเวลาหนึ่งนั้นจะถูก จ่ายโดยแบตเตอรี่ กระแสสูงสุด และแรงดันของระบบ จะขึ้นกับลักษณะของโหลด ภาระ การพิจารณาความจุของแบตเตอรี่ และอัตราการคายประจุ จะถูกพิจารณาโดย ลักษณะจำเพาะของโหลด, จำนวนวันที่ต้องการให้แบตเตอรี่สำรองพลังงาน และชนิด ของแบตเตอรี่
3. การพิจารณาจำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แรงดันของระบบจะเป็นตัวกำหนด จำนวนของเซลล์ที่จะนำมาต่ออนุกรม

4. การพิจารณาความจุ และจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม จะถูกพิจารณาในการเลือกชิ้นสุดท้าย โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะจำเพาะของเซลล์และขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้
5. ตารางพิจารณขนาดของแบตเตอรี่ จะเป็นตารางในการหาและวิเคราะห์ขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์
6. ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่ รูปแบบการใช้งานของระบบ, อายุการใช้งาน, การดูแลรักษา และราคา จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกชนิดของแบตเตอรี่ที่จะใช้กับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

### การพิจารณาแบตเตอรี่สำรอง

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ใช้กับงานบางประเภท อาจต้องการแบตเตอรี่สำรองไว้ เพื่อการรักษาเสถียรภาพของโหลดภาระ และเพื่อจัดหากระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น เกิดสภาวะอากาศแปรปรวนหรือเกิดความผิดพลาดในของอุปกรณ์ต่อรวม ทำให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงควรพิจารณาออกแบบระบบ โดยมีปัจจัยต่างๆที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

- 1.1 ความน่าเชื่อถือของระบบ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะจ่ายให้เพียงพอกับความต้องการของภาระโหลด
- 1.2 ปริมาณแสง โดยค่าปริมาณแสงตัวนี้จะเป็นตัวแปรของวันแต่ละวัน และของฤดูกาล ที่มีผลกระทบต่อจำนวนวันที่ต้องสำรองพลังงานไว้ในแบตเตอรี่
- 1.3 ความต้องการของเสถียรภาพของระบบ ระบบแต่ละระบบมีความต้องการความเสถียรภาพต่างกัน ดังนั้นเมื่อปริมาณพลังงานที่สำรองไว้มีค่ามากก็ยิ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบมากขึ้น
- 1.4 การจัดหากำลังไฟสำรอง ถ้าระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีระบบไฟฟ้าสำรองไว้ใช้งาน ก็มีความจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณา ความถี่ของการใช้งาน และช่วงเวลาในการใช้งานของแหล่งกำลังสำรองดังกล่าวให้มีความเหมาะสมด้วยเช่นกัน
- 1.5 ราคาของระบบ ราคาของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะขึ้นกับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้งานเป็นหลัก

### 2.6.5 การพิจารณาลักษณะของโหลดภาระ

การพิจารณาโหลดภาระของระบบโดยทั่วไป สามารถระบุได้ในรูปแบบของตารางและแบบกราฟฟิค ทั้ง 2 ฟอรั่มนี้จะเริ่มต้นด้วยตารางขนาดของโหลดภาระ และช่วงเวลาที่ใช้ของโหลดแต่ละอัน รูปแบบของตารางจะมีความง่ายกว่า ซึ่งขนาดของโหลดภาระทั้งหมดจะถูกคาดการณ์อยู่ระหว่างช่วง 24 ชั่วโมงของวัน และร่วมกับระยะเวลาที่ถูกใช้งาน แผนผังการใช้งานของโหลดนี้

เป็นส่วนช่วยอย่างมากในการตัดสินใจว่าพื้นที่การใช้งานของโหลดภาระจะเพียงพอกับความ ต้องการหรือไม่ สำหรับลำดับขั้นในการสร้างแผนผังโหลดเป็นดังนี้

ให้เขียนตารางลักษณะจำเพาะของโหลดภาระแต่ละตัวจนครบทุกตัวในระบบ ซึ่งต้อง ประกอบไปด้วยเวลาในการเริ่มต้นและเวลาในการหยุดทำงาน รวมทั้งให้พิจารณาการใช้งานร่วม กันของโหลดภาระด้วย

1. ผลรวมของโหลดภาระที่ใช้งานพร้อมกันในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ
2. ทำการพล็อตผลรวมของโหลดภาระทั้งหมดตามช่วงเวลา ในแต่ละวัน

การพิจารณาข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของโหลดที่สำคัญ มีดังนี้

MOMENT CON CURRENT LOAD เป็นโหลดจำพวกที่ต้องการกระแสทันทีทันใดเพียง ช่วงหนึ่งเท่านั้น (ใช้เวลาในการคงอยู่ 1 นาที หรือน้อยกว่านั้น) โดยค่าแอมแปร์- ชั่วโมง ที่ โหลดจำพวกนี้ต้องการของจะมีค่าน้อยมาก แต่จะมีผลต่อคุณสมบัติของแบตเตอรี่โดยตรง และการ ทำงานของโหลดจำพวกนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลาย ๆ ครั้งใน 1 วัน จึงควรพิจารณาเป็นพิเศษ เช่น กระแสเริ่มต้นในของมอเตอร์หรือกระแสกระชากของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

RUNNING CURRENT เป็นกระแสที่ต้องการสำหรับโหลดภาระหลังจากช่วงกระแสเริ่ม ต้นผ่านไปแล้ว สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังงานคงที่ ค่ากระแสที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นถ้าแรงดัน ของแบตเตอรี่ตกลง

หมายเหตุ สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ขนาดเล็กๆ (1 กิโลวัตต์ -5 กิโลวัตต์) ควรจะพิจารณาค่า กระแสช่วง และกระแสใช้งานปกติด้วย แต่สำหรับระบบขนาดใหญ่ค่ากระแสเหล่านี้จะถูกคิด รวมในรูปของกำลังไฟฟ้า

#### 2.6.5.1 คาบเวลาของโหลดภาระ

เป็นช่วงเวลาในการทำงานของโหลดภาระแต่ละตัว สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีความ เป็นไปได้สูงที่คาบการทำงานของโหลดจะเกิดขึ้นในลักษณะซ้ำๆ กันของแต่ละวัน ซึ่งช่วงเวลาใน การเริ่มต้นทำงานของโหลดส่วนใหญ่เราสามารถทราบได้ แต่ช่วงเวลาในการหยุดของโหลดภาระ นั้นเป็นการยากที่จะระบุค่าได้แน่นอน การพิจารณาค่ากระแสของโหลดภาระแต่ละตัว (MOMENTARY หรือ RUNNING) ควรจะมีการจัดลำดับ และดูว่าโหลดภาระแต่ละตัวนั้นจะทำได้ การใช้งานพร้อมกันหรือไม่ ซึ่งข้อมูลนี้จะช่วยในการเลือกแบตเตอรี่และใช้ในการตรวจสอบอัตรา การคายประจุของแบตเตอรี่ด้วย

นอกจากนี้ค่าแรงดันสูงสุด และต่ำสุดของโหลดภาระแต่ละตัวควรจะถูกพิจารณาดูด้วยเช่น กัน สำหรับค่าแรงดันตกคร่อมในสายเคเบิล และแรงดันตกคร่อมในไดโอดแต่ละตัวระหว่าง แบตเตอรี่กับโหลดภาระ มักจะไม่นำมาพิจารณาในระบบขนาดใหญ่เพราะถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อ

เทียบกับแรงดันของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามค่าแรงดันตกคร่อมเหล่านี้ควรถูกนำมาพิจารณาด้วยในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก

### 2.6.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบของโหลดภาระ

เราสามารถหาความต้องการพลังงานไฟฟ้าของโหลดภาระในแต่ละวันได้ โดยคำนวณจากผลคูณของกระแสของโหลดภาระแต่ละตัว กับช่วงเวลาการทำงานของมันในแต่ละวัน ผลรวมทั้งหมคนี่ถ้าเป็นโหลดแบบชั่วขณะ สามารถคำนวณได้โดยเป็นผลคูณของช่วงเวลาการทำงานกับค่ากระแสชั่วขณะโดยประมาณ และถ้ากรณีที่ไม่ว่าค่าช่วงเวลาในการทำงานของโหลดแบบชั่วขณะ ให้สมมุติว่าเวลาที่ใช้เป็น 1 นาที

ค่ากระแสชั่วขณะและค่ากระแสใช้งานปกติสูงสุด จะถูกนำมาพิจารณาในการหาค่ากระแสคายประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ ถ้าค่ากระแสในการคายประจุของแบตเตอรี่สูงสุดมากกว่า ค่าอัตราการคายประจุที่ 20h (C/20) จำเป็นต้องใช้วิธีการพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ตามที่มาตรฐาน IEEE (IEEE STANDARD 485-1983) ได้กำหนดไว้ [14]

### 2.6.6 การพิจารณาความจุของแบตเตอรี่

การพิจารณาค่าความจุของแบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ สามารถพิจารณาได้จากจำนวนวันของแบตเตอรี่ที่จะใช้สำรองพลังงาน, คุณลักษณะจำเพาะของโหลดภาระแต่ละตัว, ชนิดของแบตเตอรี่ และการติดตั้ง เป็นต้น

UNADJUSTED CAPACITY จะอยู่ในรูปของแอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากผลคูณของเวลาที่สำรองพลังงานของแบตเตอรี่ กับค่ากระแสของโหลดภาระในแต่ละวันโดยเฉลี่ย ซึ่งค่าความจุนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ และสถานะในการใช้งาน

สำหรับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด ความจุของแบตเตอรี่จะถูกปรับเปลี่ยนค่าไปตามผลของพารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่

- ค่า MAXIMUM DEPTH OF DISCHARGE (MDOD)
- ค่า MAXIMUM DAILY DEPTH OF DISCHARGE (MDDOD)

และ ค่า END OF LIFE (EOL) CAPACITY โดยสามารถพิจารณาแฟกเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

1. ความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกปรับค่าสำหรับ MDOD คำนวณได้จาก UNADJUSTED CAPACITY หารกับ MDOD
2. ความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกปรับค่าสำหรับ MDDOD คำนวณได้จากค่า MAXIMUM DAILY AMPERE-HOUR หารกับ MDDOD
3. ความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกปรับค่าสำหรับอายุการใช้งาน จะถูกคำนวณจาก UNADJUSTED CAPACITY หารด้วย END OF LIFE CAPACITY

โดยปกติค่าความจุแบตเตอรี่ที่ระบุมา จะเป็นค่าที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ 25°C (77°F) และค่าความจุนี้อาจจะเสมือนว่ามีค่าเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิมากกว่า 25 องศา และจะลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศา โดยค่าความจุมักจะไม่ถูกปรับแก้ค่าถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูง แต่จะถูกปรับแก้ค่าถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยทางผู้ผลิตแบตเตอรี่จะต้องระบุสัมประสิทธิ์การปรับแก้ค่าจากผลการเปลี่ยนของอุณหภูมิมาให้ โดยแสดงค่าตัวอย่างได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การปรับแก้ค่าอันเนื่องมาจากผลการเปลี่ยนของอุณหภูมิ

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

การออกแบบโดยทั่วไปจะมีการปรับเพื่อค่าของความจุให้สูงกว่าปกติ (มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ) สำหรับสถานะที่ไม่แน่นอน หรือรองรับการขยายตัวของโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าการเผื่อนี้จะบวกไปประมาณ 10-25 % ของความจุ

เพื่อให้ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ ควรมีการพิจารณาเงื่อนไขประกอบการเลือกความจุของแบตเตอรี่ โดยการเปรียบเทียบผลรวมของกระแสใช้งานปกติ เมื่อใช้งานร่วมกัน กับค่ากระแสใช้งานสูงสุดของแต่ละภาวะโพลี โดยให้เลือกค่าที่ใหญ่กว่า

#### 2.6.6.1 การหาจำนวนแบตเตอรี่ที่จะต่ออนุกรมกัน

ตามปกติแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วยจำนวนเซลล์หลายๆ เซลล์ที่ต่ออนุกรม โดยค่าแรงดันสูงสุดของระบบจะหาได้จากจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกัน

ระดับแรงดันใช้งานของระบบ สำหรับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดจะส่งจ่ายกำลังด้วยแรงดันประมาณ 2 โวลต์ต่อเซลล์ ดังนั้นการหาจำนวนของเซลล์อาจจะคำนวณง่าย ๆ ได้จากค่าแรงดันที่ระบบต้องการหารด้วย 2 ตัวอย่าง เช่น ในระบบ 12 โวลต์ จะใช้เซลล์ 6 ตัวต่ออนุกรมกัน หรือสำหรับระบบ 24 โวลต์ ก็จะใช้เซลล์ 12 ตัว ต่ออนุกรมกัน เป็นต้น แต่ทั้งนี้ยังคงต้องมีการพิจารณาถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมด้วยถ้ามีความจำเป็นต้องใช้งานที่ระดับแรงดันสูงๆ

อุปกรณ์ในระบบบางประเภทจะทำงานได้ภายในแรงดันที่ถูกจำกัดไว้สำหรับอุปกรณ์นั้นๆ ถ้าอุปกรณ์ได้รับแรงดันที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่จำกัดของอุปกรณ์นั้นๆ อาจจะทำให้เกิดความเสียหาย หรือมีการทำงานที่ผิดปกติไป ดังนั้นค่าแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดที่ถูกจำกัดไว้สำหรับระบบจะถูกเรียกว่า voltage window ซึ่งขนาดของวินโดว์ นี้จะมีผลโดยตรงกับจำนวนและความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกใช้งาน โดยถ้าวินโดว์ นี้แคบค่าของความจุนี้ก็จะมากขึ้น แต่ถ้าวินโดว์ นี้กว้างค่าของความจุก็จะน้อยลง โดยค่า voltage window นี้จะถูกปรับให้ใช้ได้กับโหลดภาระทุกตัวในระบบเพื่อดำเนินการได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าใช้มีการใช้ชุดควบคุมการประจุ การปรับตั้งค่าก็ควรจะต้องอยู่ภายใน voltage window นี้

จำนวนเซลล์มากที่สุดที่ยอมรับได้ เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการคำนวณหาจำนวนสูงสุดของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อแบบอนุกรม ต้องให้แน่ใจว่าจำนวนนั้นเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการอัดประจุครั้งต่อไป โดยการคำนวณหาค่ามากที่สุดของจำนวนเซลล์ที่อนุญาตของระบบหาได้จาก

$$\frac{V_{MAX}}{\text{cell recharg e voltage}} = \text{Maximum number of cells (round off )} \quad (2.43)$$

เช่น แบตเตอรี่ขนาด 2.4 โวลต์ต่อเซลล์เป็นค่าที่แนะนำสำหรับการอัดประจุกลับ ค่าแรงดันสูงสุดที่ระบบยอมรับได้คือ 58 V<sub>dc</sub> ดังนั้น 58 โวลต์ หารด้วย 2.4 โวลต์ต่อเซลล์ มีค่าเท่ากับ 24.16 หรือเท่ากับ 24 เซลล์นั่นเอง

เพื่อให้แน่ใจว่าระดับแรงดันใช้งานต่ำสุดของระบบ มีค่าไม่น้อยกว่าค่าแรงดันต่ำสุดที่ถูกระบุมาโดยผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องมีการคำนวณค่าดังกล่าว ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสูตรดังนี้

$$\frac{V_{min}}{\text{Number of cells}} = \text{Calculated EOD cell voltage} \quad (2.44)$$

เช่น สมมุติระบบให้ค่าแรงดันต่ำสุดได้ที่ 42 V<sub>DC</sub> ฉะนั้น 42 โวลต์ หารด้วย 24 เซลล์จะเท่ากับ 1.75 โวลต์ต่อเซลล์ ถ้าผลการคำนวณค่าแรงดันเซลล์ต่ำกว่าค่าแรงดันต่ำสุดที่ถูกระบุมาโดยผู้ผลิต (ต่ำกว่าค่า EOD ที่ผู้ผลิตกำหนด) ควรปรับค่าแรงดันต่ำสุดของระบบเสียใหม่ หรือเปลี่ยนขนาดของ

แบตเตอรี่ไปเป็นขนาดอื่นที่เหมาะสมกว่า ถ้าระบบประกอบด้วยหลายๆ หน่วยย่อย และต้องการใช้จำนวนเซลล์ที่แตกต่างกัน ก็สามารถคำนวณหาจำนวนของหน่วยย่อยได้

$$\text{Total number of Multi - cell Units} = \frac{V_{max}}{\text{max imum multi - cell recharge voltaage}} \quad (2.45)$$

โดยเศษที่เหลือการผลการคำนวณจะถูกปัดลง ซึ่งเมื่อคำนวณเสร็จแล้วจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องกลับไปดูค่า voltage window ที่คำนวณไว้ว่าเพียงพอกับความต้องการของระบบหรือไม่

การคำนวณที่ผ่านมาจะเป็นการคำนวณจำนวนของเซลล์ที่มากที่สุดที่อนุญาตที่ให้ต่ออนุกรมได้ ซึ่งจำนวนนี้จะทำให้ระบบสามารถปฏิบัติงานได้อย่างสมบูรณ์ เราสามารถที่จะลดจำนวนเซลล์ที่จะต่อแบบอนุกรมนี้โดยที่ยังสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(OPTIMIZATION)นี้ ควรจะมีการเผื่อค่าไว้สำหรับปัญหาซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

การหาขนาดของแบตเตอรี่สามารถพิจารณาได้จากการใช้ผลของค่าความจุ และผลของจำนวนแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม นำมาใช้เลือกขนาดแบตเตอรี่เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของโหนดภาะนั้นๆ

การเลือกขนาดของเซลล์นั้นจะใช้ข้อมูลของผู้ผลิตที่ให้มาประกอบการตัดสินใจ โดยการเลือกเซลล์นั้นควรพิจารณาค่าแรงดันต่ำสุดของแบตเตอรี่หลังการใช้งานแล้วควรจะมากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดัน EOD ที่ผู้ผลิตกำหนดมา ซึ่งค่าความจุที่ต้องการอาจไม่ตรงกับค่าที่ผู้ผลิตมีขายอยู่ ดังนั้นควรเลือกค่าความจุที่ใหญ่ขึ้น (ตามขนาดของผู้ผลิตมีขายอยู่ในท้องตลาด)

จำนวนแถวของการต่อขนาน โดยปกติแล้วการใช้งานที่มีการต่ออนุกรมของเซลล์แค่แถวเดียวจะดีกว่าการที่มีการต่อขนานหลายๆแถว แต่ถ้าค่าของความจุของระบบไม่เพียงพอสำหรับการจัดหาเพื่อให้เพียงพอความต้องการของโหนดภาะได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มจำนวนแถวเป็น 2 แถว หรือมากกว่านั้น ซึ่งการเพิ่มจำนวนแถวจึงเป็นการเพิ่มค่าความจุ และจำนวนของแบตเตอรี่ เพราะหนึ่งแถวจะเท่ากับแบตเตอรี่หลายๆ ตัวต่ออนุกรมกันอยู่ แต่การต่ออนุกรมกันนั้นควรพิจารณาจากค่าของผู้ผลิตที่แนะนำมาด้วยว่าไม่เกินจำนวนที่ผู้ผลิตระบุไว้ โดยจำนวนแถวที่จะต่อแบบขนานนั้นคำนวณได้จากค่าความจุกรวมของระบบหารด้วยค่าความจุของเซลล์แต่ละแถวที่ถูกต่อไว้ โดยเศษจะถูกปัดขึ้น

จำนวนแบตเตอรี่ที่จะใช้ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากผลคูณของ แบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรมในแต่ละแถว คูณกับ จำนวนแถวที่ต่อใช้งานในระบบ ค่าความจุกรวมของระบบทั้งหมดสามารถคำนวณได้จาก ค่าความจุในแต่ละแถว คูณกับจำนวนแถวที่ต่อขนาน

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นั้น มีปัจจัยต่างๆ ที่ควรใช้ในการพิจารณา ซึ่งจะมีผลกระทบกับลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่มีดังต่อไปนี้

การประจุเกิน อัตราการประจุที่สูงเกินไป หรือการที่ไม่มีการจำกัดแรงดันอัดประจุสูงสุด นั้น จะทำให้เกิดการประจุเกิน ซึ่งผลของกระแส จากการประจุเกินนี้จะทำให้เกิดสภาวะที่อันตรายต่อแบตเตอรี่ (สำหรับแบตเตอรี่บางชนิด) คือทำให้เกิดความร้อนเกินค่าที่กำหนดไว้ และจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง สำหรับอัตราการประจุที่น้อย หรือแรงดันในการประจุที่ต่ำเกินไป ก็จะมีผลทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายไฟได้เช่นกัน

สำหรับโพลกการะที่มีการกระชากของกระแส นั้นถ้ามันเกิดขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเวลาของตอนที่ไม่มีแสง หรือช่วงเวลารันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่ถูกสำรองไว้จะเป็นเหตุให้แรงดันของแบตเตอรี่นั้นต่ำกว่าค่าต่ำสุดของแรงดันระบบได้ ถ้าโพลกการะที่มีการกระชากของกระแสมีค่ามากกว่าค่าของกระแสเฉลี่ยของโพลกโดยรวมมาก แนะนำให้ใช้การหาค่าความจุของแบตเตอรี่ตามข้อกำหนดของ IEEE Std 485-1983 ประกอบการพิจารณา[14] ซึ่งจะไม่ทำให้แรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่าค่าของแรงดันต่ำสุดของระบบ

ในแบตเตอรี่ทุกตัวจะได้รับผลจากการสูญเสียค่าประจุภายในตัวเอง ที่รู้จักกันในชื่อของ self-discharge โดยปริมาณของการคายประจุภายในตัวเองนี้ (Ah ต่อ เดือน) จะอยู่ในฟังก์ชันของอุณหภูมิใช้งานของแบตเตอรี่, ชนิดของแบตเตอรี่ และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกภายใต้สภาวะการใช้งานต่างๆ กัน ควรมีการคำนวณเพื่อค่าความจุ ที่สูญเสียไป เพื่อชดเชยค่าให้เพียงพอกับ ความต้องการของภาระโพลก สำหรับค่า self-discharge ควรจะพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานกับระบบที่มีการสำรองแบตเตอรี่ไว้มากๆ หรือระบบที่มีอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่สูงๆ

## 2.7 อุปกรณ์ประกอบสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

### 2.7.1 BOS (Balance of system)

Balance of system คือชื่อที่ใช้เรียกอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์อันประกอบไปด้วย

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

**Mechanical BOS** ประกอบไปด้วยพวกโครงสร้างรองรับแผง ซึ่งสิ่งสำคัญของอุปกรณ์จำพวกนี้คือความแข็งแรงทนทาน เพราะอุปกรณ์เหล่านี้ส่วนมากจะใช้ภายนอก ดังนั้นจะต้องทนแดดทนฝนได้

**Electrical BOS** ประกอบไปด้วยพวกเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ สวิตช์เกียร์ เป็นต้น

**Electronic BOS** ประกอบไปด้วยพวก ชุดควบคุมการประจุแบตเตอรี่, อินเวอร์เตอร์ และชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งอุปกรณ์จำพวกนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบมากกว่า Mechanical BOS และ Electrical BOS

ซึ่งในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จะต้องอาศัยการทำงานของ BOS ประกอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. PV Module/Array → มีผลต่อราคาของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ มากที่สุด
2. Battery → มีผลทางด้านราคาของลงมา
3. BOS System → มีผลทางด้านราคาน้อยที่สุด

เนื่องจากอุปกรณ์ BOS เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของระบบ เพราะฉะนั้นถ้าหากเราสามารถทำการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ BOS ได้ ก็เท่ากับว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งจะทำให้เราสามารถลดขนาดของระบบลงได้ เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น

เนื่องจาก Electronic BOS มีความสำคัญและมีผลต่อระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ มากกว่า Mechanical BOS และ Electrical BOS เพราะฉะนั้นต่อไปจะเป็นการกล่าวเน้นถึงรายละเอียดของ Electronic BOS เป็นหลัก

## Electronic BOS

Electronic BOS ที่ใช้กันทั่วไปในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย

1. Power Conditioning System (PCS)
2. Maximum Power Point Tracker
3. Inverter
4. Control Unit ที่มี Low Voltage Cut off Unit (LVCU)

สำหรับการเลือก Electronic BOS เพื่อนำไปใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพควรคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้ประกอบการพิจารณา อันได้แก่

- จะต้องใช้งานภายนอก → เพราะฉะนั้น Electronic BOS ที่เลือกจะต้องสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้
- ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ → เนื่องจาก Electronic BOS มีผลต่อการทำงานของระบบ เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่อุปกรณ์ Electronic BOS จะต้องมีความเสถียรภาพ
- การป้องกัน → เนื่องจากในการทำงานอาจจะเกิดสิ่งที่จะมีผลกับระบบได้ เช่น ในระบบ Grid-Connect อุปกรณ์ที่ต่อระหว่าง PV กับ Grid จะต้องทำงานร่วมกันกับ

อุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่นๆ เพื่อที่จะสามารถตัดตัวมันออกจากระบบได้ในกรณีที่เกิดมีพลังงานไหลย้อนกลับมาเข้าในระบบ

- เนื่องจากการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จะใช้งานในระยะยาว ดังนั้น อุปกรณ์ Electronic BOS ที่ใช้จะต้องได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมในระยะยาวได้

### 2.7.2 Power Conditioning System (PCS)

ในการใช้งาน Electronic BOS นั้นโดยทั่วไปจะเป็นการใช้งานในรูปแบบของ Power Conditioning System (PCS) เป็นหลัก ซึ่งจะเป็นหน่วยที่รวมอุปกรณ์ Electronic BOS ไว้ด้วยกัน เช่นในระบบที่มีการต่อร่วมกับระบบของการไฟฟ้าแล้ว PCS จัดว่าเป็นสมองในการทำงานเลยทีเดียว

#### หน้าที่เบื้องต้นของ PCS

หน้าที่เบื้องต้นของ PCS คือการแปลงพลังงานที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะคล้ายคลึงกับหน้าที่ของอินเวอร์เตอร์ ในระบบ Stand alone และยังสามารถเรียงกระแสจากไฟฟ้ากระแสสลับ (utility network) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่ออัดประจุเข้าไปในแบตเตอรี่ ดังนั้น PCS จึงเหมาะกับระบบที่มีการต่อร่วมกับระบบของการไฟฟ้า และ PCS นั้นมีความซับซ้อนมากกว่าในด้านหน้าที่การทำงาน โดยมันจะคอยปรับค่ากระแสและแรงดันที่ได้ให้อยู่ ณ จุดที่มีการส่งผ่านพลังงานได้สูงที่สุด และเมื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรง ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แล้ว PCS จะทำการปรับค่าไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ผลิตได้ให้เข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับที่โครงข่ายของการไฟฟ้า (utility network) และการป้องกันของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะขึ้นกับ PCS เพราะฉะนั้นพฤติกรรมของ PCS ก็จะเป็นตัวแสดงให้เห็นพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน

หน้าที่อีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ PCS ก็คือ เมื่อระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังงานได้ตามที่กำหนดไว้แล้ว เช่น หลังจากที่ดวงอาทิตย์ตกแล้ว PCS ก็จะทำการตัดระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ออกจาก Grid และเมื่อถึงเวลาที่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานได้ตามที่กำหนด PCS ก็จะต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับของการไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

นอกจากนี้ PCS จะทำหน้าที่เป็นตัวกันชนระหว่าง Grid line กับ ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในกรณีที่เกิดสิ่งต่างๆ ที่จะกระทบกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เช่น Over Voltage transient เนื่องจาก lightning เป็นต้น ลักษณะรูปสัญญาณด้านขาออกของ PCS จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งานว่าเหมาะสมกับระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทใด ซึ่ง PCS ที่สัญญาณด้านขาออกเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ จะมีราคาสูงที่สุด

ระดับแรงดันด้านอินพุทของPCS ส่วนมากอยู่ในช่วงระหว่าง 118-660 โวลท์ ซึ่ง PCS นั้นสามารถต่ออินพุท กับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เลย ในกรณีที่เราไม่มีระบบของแบตเตอรี่มาเกี่ยวข้อง ซึ่งระดับแรงดันทางด้านอินพุทนั้นสามารถแปรค่าได้  $\pm 30\%$  ของค่าที่พิกัด

ประสิทธิภาพโดยทั่วไปของ PCS ในการแปลงพลังงานมักจะมากกว่า 90 % แต่ต้องทำงานอยู่ในระหว่าง 50-100% ของค่าที่พิกัดกำลังที่ระบุไว้ ซึ่งถ้าน้อยกว่านี้ประสิทธิภาพก็จะลดลง

สำหรับส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ทางด้านเข้าที่พิกัดของPCSนั้น ควรจะเป็นดังนี้

- กระแสด้านขาออก ควรจะมีค่าการกระเพื่อม ไม่ควรเกิน 10% ของพิกัดกระแส และกระแสไฟฟาร์แอดคทีฟ ควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 lagging-0.95 leading
- การลดทอนอินเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์ ควรจะน้อยกว่า 5% rms
- ผลรวมของการลดทอนอินเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไม่ควรเกิน 2%
- ในส่วนของความถี่นั้น PCS ยังคงทำงานได้ดีในความถี่ที่ผิดเพี้ยนในช่วง  $\pm 1\text{Hz}$
- อุณหภูมิรอบข้างควรอยู่ระหว่าง 0-55 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของแบตเตอรี่ควรอยู่ในช่วง -10 ถึง +70 องศาเซลเซียส

การป้องกันต่างๆ ที่ของอุปกรณ์ PCS ควรมี ประกอบด้วย

- การป้องกันความถี่สูง และต่ำเกินไป
- การป้องกันแรงดันสูง และต่ำเกิน ด้านไฟฟ้ากระแสตรง
- การป้องกันแรงดันสูง และต่ำเกิน ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ
- การป้องกันการทำงานที่ความผิดปกติของชุดแปลงไฟ
- การปรับการทำงานของระบบในกรณีที่ ระบบของการไฟฟ้าทำงานผิดปกติ
- กระแสเกินที่เกิดจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- อุณหภูมิที่สูงเกินของชุดอินเวอร์เตอร์
- ผลกระทบจากค่าเสิร์จฟ้าผ่า

### 2.7.3 ชุดควบคุมจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ชุดควบคุมจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ DC to DC converter โดยจะควบคุม ค่า  $V_{DC}$  และ  $I_{DC}$  ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าที่เหมาะสมกันระหว่าง แบตเตอรี่ และชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจะหาจุดที่ใช้งานได้สูงสุดในการดำเนินงาน ซึ่งโดยปกติแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงมาอย่างไรก็จะให้กำลังงานเป็นไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ ตัวอย่างเช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบุพิกัดไว้ 75 วัตต์ แต่กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงไม่ได้เท่ากับ 75 วัตต์ ซึ่งความเข้มแสงในขณะนั้นแผงเซลล์สามารถจ่ายกระแสออกมาได้ 4.4 แอมแปร์ แต่แบตเตอรี่ตั้งค่าไว้ที่ 13 โวลท์ (ภายใต้สภาวะการอัดประจุ) กำลังจะเป็น 4.4 คูณกับ 13 เท่ากับ 57.2 วัตต์ ดังนั้นพลังงานจะหายไป 20% และในกรณีที่เกิดสภาวะที่มีเมฆมากหรืออุณหภูมิสูง ค่าแรงดันที่ได้จะไม่ถึง 17

โวลท์ (เป็นค่าแรงดันโดยประมาณสำหรับแผงเซลล์ขนาด 75 วัตต์) จะลดลงมาเหลือแค่ 14-15 โวลท์เท่านั้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอในการอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ได้

#### 2.7.4 อินเวอร์เตอร์

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ผลิตออกมาได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่โหลดภาระโดยทั่วไปจะถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียุกรณ์แปลงไฟหรืออินเวอร์เตอร์ไว้คอยแปลงระบบไฟฟ้าเพื่อให้สามารถใช้งานกับโหลดภาระที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับได้

การจำแนกประเภทของอินเวอร์เตอร์ ตามการเรียงกระแส ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. Line commutated inverter (LCI) เป็นอินเวอร์เตอร์แบบสองทาง ดังนั้นจะจ่ายไฟได้เมื่อได้รับสัญญาณที่เป็นรูปคลื่นไซน์จากระบบของการไฟฟ้า
2. Self commutated inverter (SCI) เป็นอินเวอร์เตอร์แบบทางเดียว โดยจะแปลงแรงดันด้วยตัวมันเองให้เป็นรูปคลื่นไซน์ เพื่อจ่ายให้กับโหลดภาระ

สำหรับกรณีที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว จะมีคุณสมบัติต่างๆ ที่เป็นไปได้ดังนี้

- สามารถใช้ในระบบ stand-alone ได้โดยไม่ต้องต่อกับ grid line
- ประสิทธิภาพจะมีค่าไม่น้อยกว่า 90% ที่พิกัดโหลด แต่ถ้ารับโหลดประมาณ 40-90% ประสิทธิภาพจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 87%
- อินเวอร์เตอร์จะถูกออกแบบโดยใช้อุปกรณ์โซลิตสเทททั้งหมด ไม่มีการใช้พวก electro mechanical relay หรือพวกสวิทช์ต่างๆ
- อินเวอร์เตอร์บางรุ่นจะใช้ IGBT ในตัวอินเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะสามารถแปลงพลังงานให้มีประสิทธิภาพสูง โดยตัว IGBT นี้จะมีส่วนช่วยลดปัญหาที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่สูงและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ต่ำได้
- สามารถปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ตั้งแต่ 20% ของพิกัดกำลัง จนถึงค่าที่พิกัด โดยสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในช่วง 0.95 lagging-0.95 leading
- %THD ของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 5% และ %THD ของแรงดันไม่เกิน 2%
- สามารถรับค่าการกระเพื่อมของกระแสขาเข้าได้  $\pm 10\%$
- ในระบบที่ใช้แบตเตอรี่ อินเวอร์เตอร์จะทำงานร่วมกับ Low Voltage Cutoff ซึ่งจะตัดโหลดภาระออกเมื่อสถานะของการประจุลดต่ำลงจนถึง Maximum depth of discharge (MDOD) ซึ่งจะเป็นค่าที่กำหนดของแบตเตอรี่แต่ละรุ่น แต่ละยี่ห้อ ซึ่งโดยทั่วไประดับแรงดันตัดวงจรจะอยู่ประมาณ  $1.85 \pm 0.02$  V ที่ 25 องศาเซลเซียสสำหรับเซลล์ 2 โวลท์

โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดัน แรงดันของเบคเตอร์ด้วย โดยค่าแรงดันของเบคเตอร์จะลดลง  $-4\text{mV} \pm 1 \text{ mV}$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส สำหรับเซลล์ขนาด 2 โวลท์

- อุณหภูมิในการปฏิบัติงานของอินเวอร์เตอร์ อยู่ตั้งแต่ 0-155 องศาเซลเซียส
- ความชื้นในการปฏิบัติงานควรอยู่ที่ 0-90%

การป้องกันที่มีในอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวโดยทั่วไป เช่น

- การป้องกันการเปิดวงจรที่ขั้วต่อของระบบ
- การป้องกันการลัดวงจรทั้งทางด้านอินพุท และเอาต์พุท
- การป้องกันการสลับขั้วของอินพุทที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- การป้องกันแรงดันที่สูง และต่ำเกิน

กรณีที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส จะสามารถมีคุณสมบัติต่างๆ ที่เป็นไปได้ดังนี้

- ความถี่ทางด้านขาออกจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง  $\pm 0.01 \%$
- ประสิทธิภาพโดยทั่วไปไม่ต่ำกว่า 92 % ที่ 100% ของพิกัดกำลัง และจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 90% ที่ประมาณ 40-90% ของพิกัด
- ในการออกแบบและใช้อุปกรณ์โซลิตสเทททั้งหมด จะไม่ใช้พวกอุปกรณ์รีเลย์ใดๆเลย
- %THD ของกระแสส่วนใหญ่จะน้อยกว่า 5% ส่วน %THD ของแรงดันโดยทั่วไปจะไม่เกิน 2%
- ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ มักใช้ไฟจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง
- อินเวอร์เตอร์จะอยู่ในช่วง On-line condition (ช่วงปฏิบัติงาน) ก็ต่อเมื่อกำลังงานที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องไม่น้อยกว่า 2% ของขนาดพิกัดของอินเวอร์เตอร์
- กระแสด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ จะมีการกระเพื่อมอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$
- สามารถทนแรงดันทั้งด้านอินพุท และเอาต์พุทได้ถึง 2000 Vrms

การป้องกันที่มีในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยทั่วไป เช่น

- การป้องกันการเปิดวงจรที่ขั้วต่อของระบบ
- การป้องกันการลัดวงจรทั้งทางด้านอินพุท และเอาต์พุท
- การป้องกันการสลับขั้วของอินพุทที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- การป้องกันแรงดันที่สูง และต่ำเกิน ทั้งทางด้านอินพุท และเอาต์พุท
- การปรับการทำงานของระบบในกรณีที่ ระบบของการไฟฟ้าทำงานผิดปกติ
- การป้องกันอุณหภูมิที่สูงเกินของชุดอินเวอร์เตอร์
- การป้องกันผลกระทบจากค่าเสิร์จฟ้าผ่า

### 2.7.5 อุปกรณ์ควบคุม

สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ที่มีการประจุกลับได้นั้น จำเป็นต้องมีการป้องกันสำหรับปัญหาเหล่านี้

1. ความเสียหายของสายไฟหรือการเกิดไฟไหม้สายไฟ ที่เกิดจากการลัดวงจร
2. การเกิดปล่องประจุที่มากเกินไปของแบตเตอรี่
3. การชาร์จที่มากเกินไปของแบตเตอรี่

CONTROL UNIT (CU) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับป้องกันแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสถานะการทำงานของระบบทั้งหมด และสามารถตัดต่อวงจรได้ด้วย การตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ควบคุมมาใช้ สิ่งที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงคือ ราคา ความเชื่อถือได้ และความง่ายในการใช้งาน

**ความปลอดภัยเบื้องต้นที่ระบบควรมี อันได้แก่**

#### 1. การป้องกันสายไฟ

ทำได้โดยการใส่ฟิวส์ใกล้กับแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันสายไฟ หลีกเลียงการเกิดสายไหม้ หรืออาจจะใช้ miniature circuit-breaker (MCB) แทนฟิวส์ก็ได้ ซึ่ง MCB มีคุณสมบัติในการเปิดวงจรได้เร็วกว่าฟิวส์เมื่อเทียบที่กระแสเท่ากัน เนื่องจากฟิวส์ต้องอาศัยการหลอมตัว

#### 2. การป้องกันเครื่องใช้ไฟฟ้าและแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในเครื่องใช้บางชนิดอาจจะใช้ฟิวส์ต่างหากเพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในอุปกรณ์ แต่ต้องตระหนักด้วยว่า ฟิวส์จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม เล็กน้อยสำหรับอุปกรณ์นั้นๆ หรือใช้ฟิวส์แบบพิเศษ (extra fuse) แต่ควรจะใช้สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้ามีความเสี่ยงในการเกิดการลัดวงจรสูงเท่านั้น ส่วนบล็อกกิ้งไดโอด ต่อไว้เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลย้อนกลับเข้าไปสู่แผงเซลล์ได้

#### 3. การป้องกันความเสียหายซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าใกล้ๆ สายไฟ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในสายไฟ ซึ่งสามารถทำลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในชุดควบคุม และ อินเวอร์เตอร์ได้ MOV (Metal Oxide Varistor) เป็นอุปกรณ์ให้สำหรับป้องกันกระแสรบกวนในวงจร ซึ่งเกิดจากการเกิดฟ้าผ่าได้

#### 4. ข้อควรระวังในการต่อขั้วแบตเตอรี่

การต่อขั้วของแบตเตอรี่และเครื่องใช้ไฟฟ้า ต้องระวังการต่อสลับขั้วกัน เพราะถ้ามีการต่อกลับขั้วกัน เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงบางชนิดจะไม่ทำงาน หรือบางชนิดอาจจะเสียหายได้ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเป็นไม่สามารถอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ได้

## 2.8 บทสรุป

พลังงานแสงอาทิตย์นับวันจะมีความสำคัญต่อรูปแบบการใช้พลังงานในอนาคต เพราะเป็นพลังงานที่ใช้ไม่หมดเปลือง สามารถใช้แก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน ซึ่งแทบทุกประเทศกำลังประสบปัญหาอยู่ทั้งทางด้านการขาดแคลนพลังงาน และราคาค่าพลังงานสูงขึ้นได้ หากได้รับการร่วมมือ สนับสนุน ศึกษาค้นคว้าอย่างจริงจังแล้ว ก็อาจนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ในบางส่วน อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์นับว่าเป็น พลังงานสะอาด (Clean Energy) สามารถแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ อันเกิดจากการผลิตและการใช้พลังงานที่ทั่วโลกกำลังวิตกอยู่ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประเทศไทยยังตั้งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นอย่างดี

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับโฟโตไดโอด และใช้หลักการโฟโตโวลตาอิกเหมือนกัน โดยเมื่อมีแสงตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกับไดโอดทั่วไปทุกประการแตกต่างกันเพียงแต่ ชั้นของสารกึ่งตัวนำทางด้านที่รับแสง ต้องมีความบางมากๆ จนแสงส่องทะลุไปถึงรอยต่อและสารกึ่งตัวนำด้านที่เป็นฐานรองได้ เพราะฉะนั้นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกแสงจะมีลักษณะเหมือนไดโอดทุกประการ

การสร้างระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะไม่ใช่แผงเซลล์ใหญ่เพียงแผงเดียว แต่จะใช้โมดูลย่อยซึ่งมีระดับแรงดันมาตรฐานมาต่ออนุกรม/ขนาน หรือขนาน/อนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าตามที่ระบบต้องการ นอกจากนี้ยังมีการนำเซลล์จำนวนหนึ่งมาต่ออนุกรม และขนานอยู่ในแผงเซลล์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูงเพียงพอต่อการใช้งานในระบบขนาดเล็กสำหรับโพลดภาระที่มีพิกัดไม่สูงมากนัก

## บทที่ 3

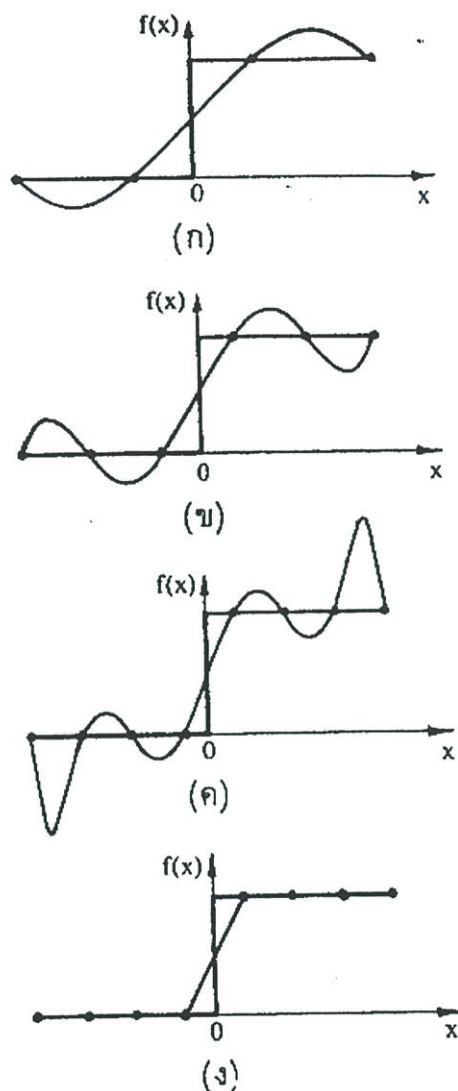
# การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

### 3.1 กล่าวนำ

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับโหลดที่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง พบปัญหาเมื่อมีการใช้งานระบบเป็นระยะยาว ไม่สามารถทำงานเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ทางผู้วิจัยหาวิธีการหรือเครื่องมือที่จะมาแก้ไข หรือลดปัญหาข้างต้นให้น้อยลงในระดับที่ยอมรับได้(ทำให้การใช้งานในระยะยาว สำหรับโหลดที่ทำงานอย่างต่อเนื่องนั้นมี สมรรถนะและความน่าเชื่อถือได้สูงกว่า)จากการศึกษาหาเครื่องมือและรูปแบบวิธีการในการแก้ปัญหาพบว่า ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข(Numerical Method) นั้นสามารถใช้งานในการแก้ปัญหาดังกล่าวและยังตอบสนองต่อการใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้เป็นอย่างดีอีกด้วย[15]

### 3.2 การหาค่าแทรกแบบสไปไลน์ (Spline Interpolation)

เป็นที่ทราบกันว่า โพลีโนเมียลอันดับที่  $n$  ใช้สำหรับหาค่าแทรกระหว่างข้อมูล  $n + 1$  จุด ตัวอย่างเช่น เมื่อข้อมูลมีทั้งหมดแปดจุดแล้ว ย่อมสามารถหาโพลีโนเมียลอันดับที่เจ็ด ซึ่งวกเวียนไปมาผ่านจุดทุกจุด[16] อย่างไรก็ตามอาจมีกรณีที่ฟังก์ชันเหล่านี้นำไปสู่ข้อผิดพลาดได้ การศึกษาอีกวิธีหนึ่งคือ การประยุกต์โพลีโนเมียลอันดับต่ำกว่าต่อเซตย่อย (Subset) ของจุดข้อมูล (data points) โพลีโนเมียลเชื่อมต่อแบบนี้ คือ สไปไลน์ ฟังก์ชัน (Spline functions) ตัวอย่างเช่น โค้งอันดับที่สามใช้เชื่อมต่อจุดข้อมูลแต่ละคู่ เราเรียกว่า สไปไลน์กำลังสาม (Cubic splines) ฟังก์ชันเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างสมการกำลังสาม (Cubic equations) เรียบ เมื่อดูผิวเผินแล้วจะเห็นว่าการประมาณของสไปไลน์อันดับที่สามนั้นดีกว่าการใช้โพลีโนเมียลอันดับที่เจ็ด รูป 3.1 แสดงถึงสถานะที่สไปไลน์กระทำได้ดีกว่าโพลีโนเมียลอันดับสูงกว่า นี่เป็นกรณีที่ฟังก์ชันเรียบแต่เราได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ณ บริเวณที่สนใจ ( $x = 0$ ) โดยรูป 3.1 (ก) ถึงรูป 3.1(ค) แสดงถึงว่าโพลีโนเมียลอันดับสูงกว่า มีการแกว่งอย่างมากในอาณาบริเวณของการเปลี่ยนแปลงฉับพลันในทางตรงข้าม สไปไลน์ก็เชื่อมจุดด้วยเหมือนกัน แต่เราได้ถูกจำกัดแค่การเปลี่ยนแปลงอันดับสามเท่านั้น ฉะนั้น การแกว่งจึงได้น้อยมากด้วยเหตุนี้ สไปไลน์จึงใช้ประมาณพฤติกรรมของฟังก์ชันได้ดีกว่า



รูปที่ 3.1 สถานะที่สไปพล์ดีกว่า โพลีโนเมียลการหาค่าแทรกอันดับสูงกว่าฟังก์ชันได้รับการปรับที่ การเพิ่มขึ้นฉับพลันที่ ( $x = 0$ )

เมื่อพิจารณารูป 3.1(ก) ถึงรูป 3.1 (ค) จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ก่อให้เกิดการแกว่งของโพลีโนเมียลการหาค่าแทรก ตรงกันข้ามเนื่องจากการจำกัดเพียงโค้งอันดับที่สาม พร้อมกับมีการเคลื่อนไปอย่างสม่ำเสมอแล้ว สไปพล์กำลังสาม (cubic spline) (ง) ให้การประมาณที่ยอมรับได้ดีกว่า

### 3.2.1 สไปพล์เชิงเส้น (Linear Splines)

การเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดที่ง่ายที่สุด คือ เส้นตรงสไปพล์อันดับที่หนึ่ง สำหรับกลุ่มของจุดข้อมูลที่ให้อันดับ [17] อาจนิยามเป็นเซตของฟังก์ชันเชิงเส้นเชื่อมต่อจุด ดังนี้

$$f(x) = f(x_0) + m_0(x - x_0) \quad x_0 \leq x \leq x_1$$

$$f(x) = f(x_1) + m_1(x - x_1) \quad x_1 \leq x \leq x_2$$

$$\begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array}$$

$$f(x) = f(x_{n-1}) + m_{n-1}(x - x_{n-1}) \quad x_{n-1} \leq x \leq x_n$$

เมื่อ  $m_i$  เป็นความชันของเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุด

$$m_i = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

สมการเหล่านี้ อาจใช้หาค่าของฟังก์ชันที่จุดใด ๆ ระหว่าง  $x_0$  และ  $x_n$  โดยระบุตำแหน่งที่จุดอยู่ภายในช่วง แล้วใช้สมการที่เหมาะสมหาค่าของฟังก์ชันภายในช่วง วิธีนี้จะเหมือนกับการหาค่าแทรกเชิงเส้น

ข้อเสียเปรียบของสไปพล์อันดับที่หนึ่งคือ โค้งที่ยังไม่เรียบพอ นอกจากนั้นที่จุดข้อมูลที่สองสไปพล์พบกัน (เรียกว่า knot) ความชันจะเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ปกติอนุพันธ์ของฟังก์ชันจะไม่ต่อเนื่องที่จุดนี้ ข้อบกพร่องนี้สามารถเอาชนะได้โดยใช้สไปพล์โพลิโนเมียลที่มีอันดับสูงกว่า ซึ่งจะประกันได้ว่า ความเรียบที่ปม (knot) เท่ากับอนุพันธ์ที่จุดเหล่านี้

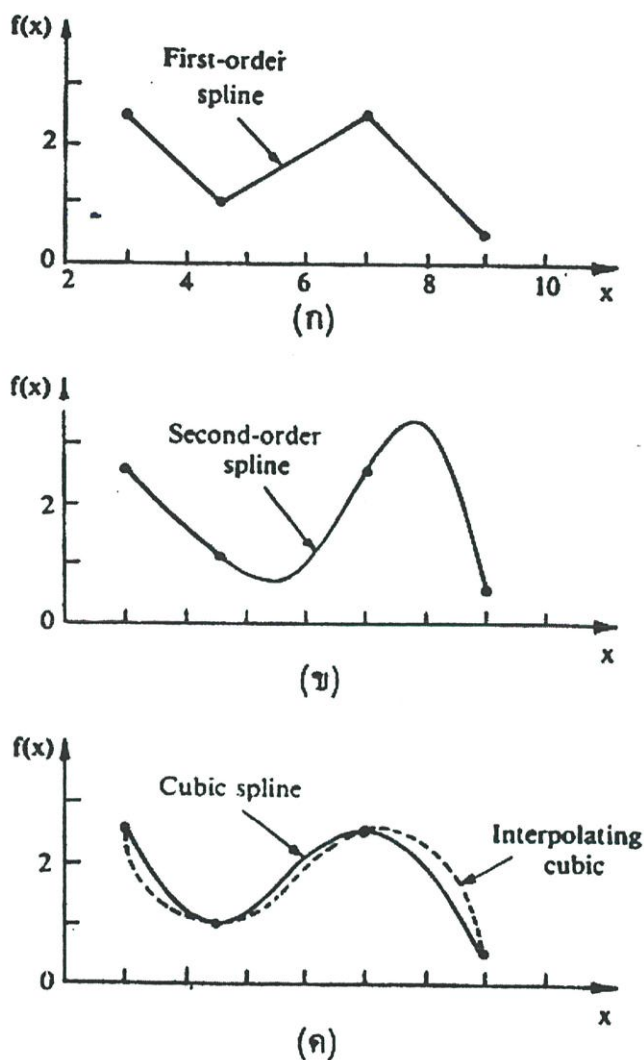
### 3.2.2 สไปพล์กำลังสอง (Quadratic Splines)

เพื่อยืนยันว่าอนุพันธ์อันดับที่  $m$  มีความต่อเนื่องที่ปม (knot) จะต้องใช้สไปพล์อย่างน้อยอันดับที่  $m+1$  โพลิโนเมียลอันดับที่สาม หรือสไปพล์กำลังสาม (cubic splines) ที่ยืนยันความต่อเนื่องของอนุพันธ์ที่หนึ่งและที่สอง ได้ใช้กันมากทางปฏิบัติ แม้ว่าอนุพันธ์อันดับสามและสูงกว่า อาจไม่ต่อเนื่องเมื่อใช้สไปพล์กำลังสามก็ตาม แต่ก็ไม่อาจตรวจจับด้วยตาได้ และมักจะไม่คำนึงถึง

แม้ว่าได้พาดพิงถึงที่มาของสไปพล์กำลังสามอยู่ด้วยก็ตาม แต่จะขอเข้าไปกล่าวไว้ในลำดับถัดไป ในที่นี้จะได้พูดถึงแนวความคิดของการหาค่าแทรกแบบสไปพล์ (Spline interpolation) โดยใช้โพลิโนเมียลอันดับที่สอง สไปพล์กำลังสอง (quadratic splines) เหล่านี้ ต่างมีอนุพันธ์อันดับต่อเนื่องที่จุดปม (knot) แม้ว่าสไปพล์กำลังสองจะไม่รับประกันการเท่ากันของอนุพันธ์อันดับที่สองที่จุดปมก็ตาม แต่ก็ให้ขั้นปฏิบัติการที่ดีสำหรับการพัฒนาสไปพล์อันดับสูงกว่า

จุดประสงค์ของสไปพล์กำลังสอง คือ การหาโพลิโนเมียลอันดับที่สองสำหรับแต่ละช่วงระหว่างจุดข้อมูล โพลิโนเมียลสำหรับแต่ละช่วงสามารถแทนด้วยรูปทั่วไป ดังนี้

$$f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 สไปไลน์การปรับชุดของข้อมูลสี่จุด

- ก) สไปไลน์เชิงเส้น
- ข) สไปไลน์กำลังสอง (Quadratic Splines)
- ค) สไปไลน์กำลังสามพร้อมกับโพลีโนเมียลการหาค่าแทรกกำลังสาม

รูปที่ 3.3 ได้แสดงกราฟของฟังก์ชันเหล่านี้ ไว้ในแต่ละช่วงถ้ามีข้อมูล  $n+1$  จุด ( $i=0,1,2,\dots,n$ ) แล้วจะมี  $n$  ช่วง ฉะนั้น จะมีตัวคงที่ไม่ทราบค่า (unknown Constant :  $a, b$  และ  $c$ ) ที่ต้องคำนวณอยู่  $3n$  ตัว ดังนั้นย่อมมี  $3n$  สมการ หรือเงื่อนไขที่ต้องการสำหรับหาค่าตัวไม่ทราบ เงื่อนไขที่จำเป็นเหล่านี้ มีดังนี้

- (1) ค่าของฟังก์ชันต้องเท่ากับที่จุดปมภายใน เงื่อนไขนี้สามารถแทนด้วย

$$a_{i-1}x_{i-1}^2 + b_{i-1}x_{i-1} + c_{i-1} = f(x_{i-1}) \quad (3.2)$$

$$a_i x_{i-1}^2 + b_i x_{i-1} + c_i = f(x_{i-1}) \quad (3.3)$$

สำหรับ  $i=2$  ถึง  $n$

เนื่องจากใช้เพียงจุดปมเท่านั้น ฉะนั้นสมการ (3.2) และ (3.3) แต่ละสมการจะมีเงื่อนไขอยู่  $n-1$  เงื่อนไข เมื่อรวมกันจะได้เท่ากับ  $2n-2$  เงื่อนไข

(2) ฟังก์ชันที่หนึ่งและฟังก์ชันสุดท้ายต้องผ่านจุดปลายสุด ( endpoints ) ฉะนั้น ต้องมีเงื่อนไขเพิ่มเติมอีก 2 เงื่อนไข คือ

$$a_1 x_0^2 + b_1 x_0 + c_1 = f(x_0) \quad (3.4)$$

$$a_n x_n^2 + b_n x_n + c_n = f(x_n) \quad (3.5)$$

ฉะนั้น จะมีทั้งหมดเท่ากับ  $2n-2+2 = 2n$  เงื่อนไข

(3) อนุพันธ์ที่หนึ่งที่จุดปมภายใน ( interior knots ) ต้องเท่ากัน อนุพันธ์ที่หนึ่งของสมการ

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

คือ  $f'(x) = 2ax + b$

ฉะนั้น เงื่อนไขทั่วไป คือ

$$2a_{i-1} + b_{i-1} = 2a_i x_i + b_i \quad (3.6)$$

เมื่อ  $i=2$  ถึง  $n$

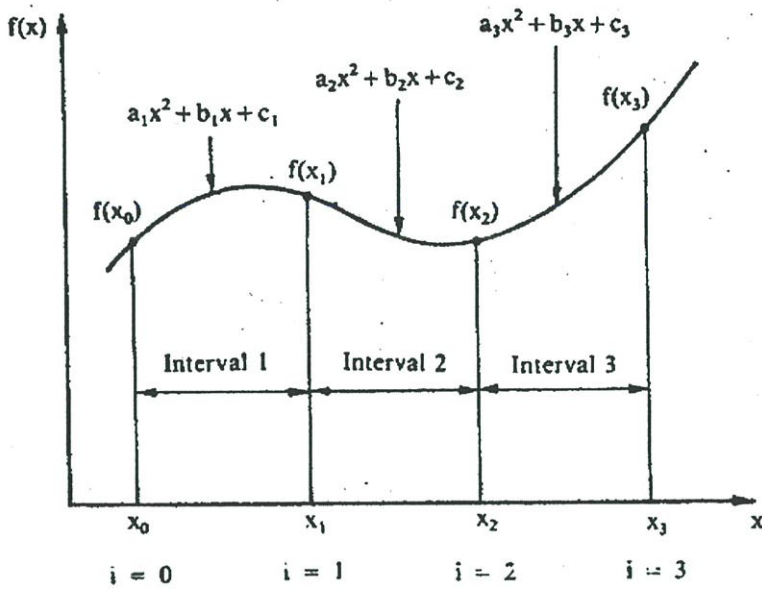
เงื่อนไขนี้ทำให้มีเงื่อนไขอื่นอีก  $n-1$  เงื่อนไข ฉะนั้น เงื่อนไขทั้งหมดเท่ากับ  $2n+n-1 = 3n-1$  เพราะว่า มีตัวไม่ทราบค่า  $3n$  ค่า ฉะนั้น จึงลดไปได้หนึ่งเงื่อนไข

จากรูปจะเห็นว่า มี  $n$  ช่วงและจุดข้อมูล  $n+1$  จุด ในรูปนี้ เป็นตัวอย่างในกรณีที่  $n=3$  และจะต้องทำการเลือกโดยไม่เจาะจง เพื่อให้การคำนวณตัวคงที่บรรลุผล แม้ว่า มีจำนวนการเลือกที่แตกต่างกันสามารถทำได้

(4) สมมุติว่าอนุพันธ์ครั้งที่สองเท่ากับศูนย์ ณ จุดที่หนึ่ง เพราะว่าอนุพันธ์อันดับที่สองสมการ (3.1) เท่ากับ  $2a_i$  เงื่อนไขนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปคณิตศาสตร์ เป็น

$$a_1 = 0 \quad (3.7)$$

ความหมายของเงื่อนไขนี้คือ สองจุดแรกจะต่อกันด้วยเส้นตรง



รูปที่ 3.3 การหาสโพล์กำลังสอง (quadratic splines) ในกรณีที่  $n = 3$

การปรับโค้งโดยสโพล์ทั้งหมด ได้แสดงไว้ในรูป 3.2 (ข) จะสังเกตเห็นว่า มีข้อบกพร่องอยู่สองอย่างที่ลดลงจากการปรับโค้งด้วยสโพล์เชิงเส้น คือ

- (1) เส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างสองจุดแรก
- (2) สโพล์กำลังช่วงสุดท้าย ดูเหมือนจะสูงเกินไป แต่สโพล์กำลังสามที่จะพูดถึงต่อไปนั้น จะไม่มีข้อบกพร่องเหล่านี้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นวิธีที่ดีกว่าสำหรับการหาค่าแทรกแบบสโพล์

### 3.2.3 สโพล์กำลังสาม (Cubic Splines)

จุดประสงค์ของสโพล์กำลังสาม คือ การหาโพลีโนเมียลอันดับสามสำหรับแต่ละช่วงระหว่างปม (knot) [18] รูปต่อไปนี้

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (3.8)$$

ดังนั้น สำหรับจุดข้อมูล  $n+1$  จุด ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) แล้ว ย่อมมี  $n$  ช่วง และมีตัวคงที่ไม่ทราบค่า  $4n$  ตัวที่ต้องการหา และเงื่อนไข  $4n$  เงื่อนไข ที่ต้องการสำหรับหาตัวไม่ทราบค่า มีดังนี้

1. ค่าของฟังก์ชันต้องเท่ากันที่ปมภายใน (interior knots) จำนวน  $(2n-2)$  เงื่อนไข
2. ฟังก์ชันที่หนึ่งและฟังก์ชันสุดท้าย ต้องผ่านจุดปลาย (มีสองเงื่อนไข)
3. อนุพันธ์ครั้งที่หนึ่งที่ปมภายใน (interior knots) ต้องเท่ากัน (มี  $n-1$  เงื่อนไข)
4. อนุพันธ์ครั้งที่สองที่จุดปมภายในต้องเท่ากัน (มี  $n-1$  เงื่อนไข)

5. อนุพันธ์อันดับที่สอง ที่จุดปลายจุด (end knots) มีค่าเป็นศูนย์ (มีอยู่ 2 เงื่อนไข)

การแปลความหมายของเงื่อนไขทั้งห้าที่เห็นได้ คือ ฟังก์ชันจะกลายเป็นเส้นตรงที่จุดปลายจุด (end knots) ข้อกำหนดของเงื่อนไข ณ จุดปลายเช่นนี้ นำไปสู่คำว่า สไปไลน์ธรรมชาติ ที่ให้ชื่อแบบนี้ก็เพราะว่า สไปไลน์วาดรูป (drafting spline) มีพฤติกรรมตามธรรมชาติแบบนี้ ถ้าค่าของอนุพันธ์อันดับที่สองที่จุดปลายจุดไม่เป็นศูนย์ (นั่นคือมีความโค้งบ้าง) ข้อมูลนี้อาจใช้เพื่อจัดให้มีเงื่อนไขจำเป็นสองเงื่อนไข

เงื่อนไขห้าแบบข้างบนเป็นผลให้มีสมการทั้งหมด  $4n$  สมการ สำหรับหาตัวสัมประสิทธิ์  $4n$  ค่า ด้วยเหตุนี้ย่อมเป็นไปได้ในการพัฒนาสไปไลน์กำลังสามรูปแบบนี้ ฉะนั้น จะได้เสนอเทคนิคอีกแบบหนึ่งที่ต้องการ คำตอบของสมการ  $n-1$  สมการเท่านั้น แม้ว่าที่มาของวิธีนี้จะค่อนข้างตรงไปตรงมาน้อยกว่าสไปไลน์กำลังสองก็ตาม แต่ได้ผลคุ้มค่า

ที่มาของสไปไลน์กำลังสาม (Cubic Splines) ชั้นแรกในการหา (derivation) นั้น ขึ้นอยู่กับข้อสังเกตที่ปมแต่ละคู่ได้ต่อกันด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (cubic) ฉะนั้น อนุพันธ์อันดับที่สองภายในแต่ละช่วง จึงเป็นเส้นตรง อาจทำการหาอนุพันธ์สมการ(3.8) เพื่อพิสูจน์ข้อสังเกตนี้บนพื้นฐานอนุพันธ์อันดับสองสามารถแทนด้วยโพลิโนเมียลการหาค่าแทรกอันดับที่หนึ่ง (the first-order Lagrange interpolating polynomial)

$$f_i''(x) = f''(x_{i-1}) \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} + f''(x_i) \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $f_i''(x)$  เป็นค่าของอนุพันธ์อันดับสองที่จุด  $x$  ใดๆภายในช่วงที่  $i$  ดังนั้น สมการนี้เป็นเส้นตรงที่เชื่อมต่ออนุพันธ์อันดับสองที่ปมที่หนึ่ง (first knot)  $f''(x_{i-1})$  กับอนุพันธ์อันดับสองที่ปมที่สอง  $f''(x_i)$  ต่อไป เมื่ออินทิเกรตสมการ (3.9) สองครั้ง จะได้นิพจน์ของ  $f(x_i)$  อย่างไรก็ตาม นิพจน์นี้ยังคงมีตัวคงที่ไม่ทราบค่าจากการอินทิเกรตอยู่สองค่า ตัวคงที่เหล่านี้สามารถหาได้โดยการใช้เงื่อนไขการเท่ากันของฟังก์ชัน กล่าวคือ  $f(x)$  ต้องเท่ากับ  $f(x_{i-1})$  ที่  $x_{i-1}$  และ  $f(x)$  ต้องเท่ากับ  $f(x_i)$  ที่  $x_i$  จากการหาค่าเหล่านี้ จะได้สมการกำลังสาม (cubic equation) ดังนี้

$$\begin{aligned} f_i(x) &= \frac{f''(x_{i-1})}{6(x_i x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f''(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 \\ &+ \left[ \frac{f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) \\ &+ \left[ \frac{f(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1}) \quad (3.10) \end{aligned}$$

จะเห็นว่าความสัมพัทธ์นี้เป็นนิพจน์ที่สลับซับซ้อนมาก สำหรับสโพล์กำลังสาม (cubic splines) สำหรับช่วงที่  $i$  ยิ่งกว่าสมการ (3.8) อย่างไรก็ตาม จะพบว่าสมการนี้มีสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่าเพียงสองตัวเท่านั้น กล่าวคือ อนุพันธ์อันดับสองที่จุดเริ่มต้น และจุดปลายสุดของช่วง นั่นคือ  $f''(x_{i-1})$  และ  $f''(x_i)$

ดังนั้น ถ้าสามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ถูกต้องที่แต่ละปม (knot) แล้วสมการ (3.10) คือ โพลีโนเมียลอันดับสามที่สามารถใช้หาค่าแทรกภายในช่วงได้

อนุพันธ์อันดับสองสามารถหาได้จากการใช้เงื่อนไขที่ว่า อนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ปมต้องมีความต่อเนื่อง กล่าวคือ

$$f'_{i-1}(x) = f'_i(x_i) \quad (3.11)$$

เราสามารถหาอนุพันธ์ของสมการ(3.10) เพื่ออนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ถ้าทำเช่นนี้ทั้งที่ช่วง  $(i = 1)$  และ  $(i)$  แล้วจัดผลลัพธ์ที่ได้ทั้งสองให้เท่ากัน ตามสมการ(3.11) จะได้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} (x_i - x_{i-1})f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1})f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i)f''(x_{i+1}) \\ = \frac{6}{(x_{i+1} - x_i)} [f(x_{i+1}) - f(x_i)] \\ = \frac{6}{(x_i - x_{i-1})} [f(x_{i-1}) - f(x_i)] \end{aligned} \quad (3.12)$$

ถ้าสมการ (3.11) ได้เขียนเพื่อปมอยู่ภายในทั้งหมดแล้ว ย่อมมีสมการหลายชั้น  $(n-1)$  สมการพร้อมกับอนุพันธ์อันดับสองที่ไม่ทราบค่า  $n+1$  ค่า อย่างไรก็ตาม โดยธรรมชาติของสโพล์กำลังสาม, อนุพันธ์อันดับที่สองในปมปลายสุด (end knots) ต่างมีค่าเป็นศูนย์หมด ฉะนั้นปัญหาจึงลดลงเหลือเป็น  $(n-1)$  สมการ ซึ่งมีตัวไม่ทราบค่า  $(n-1)$  ค่า นอกจากนั้นขอให้สังเกตว่าระบบของสมการจะเป็นสามเส้นทแยงมุม (tridiagonal) ฉะนั้น ไม่เพียงแต่เป็นการลดจำนวนของสมการเท่านั้น แต่ยังเป็นการจัดรูปให้ง่ายต่อการแก้ปัญหาอีกด้วย

ผลลัพธ์ที่ได้ สรุปไว้ในรูป 3.2 จะสังเกตเห็นการปรับโค้งยิ่งยวดขึ้น ขณะที่เรากระทำจากเชิงเส้นไปเป็นสมการกำลังสอง (Quadratic) และเปลี่ยนเป็นการใช้สโพล์กำลังสาม (cubic splines) นอกจากนี้ ยังได้เพิ่มโพลีโนเมียลการหาค่าแทรกกำลังสาม (a cubic interpolating polynomial) ในรูป 3.2 (ค) แม้สโพล์กำลังสามประกอบด้วยอนุกรมของโค้งอันดับสาม (a splines of third-order curves) ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับโค้งก็ต่างไปจากการใช้โพลีโนเมียลอันดับที่สาม ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก

จากความจริงที่ธรรมชาติของสโพลีโนมีนั้น อนุพันธ์อันดับสองเป็นศูนย์ที่ปมปลายสุด ขณะที่โพลีโนเมียลกำลังสามไม่มีเงื่อนไขเช่นนั้น

### 3.3 การปรับโค้ง (Curve Fitting)

บ่อยครั้งที่นักวิทยาศาสตร์ และนักวิทยาศาสตร์ทางสังคม ต้องการปรับโค้งให้เหมาะสมกับข้อมูลจากการทดลอง เมื่อมีข้อมูลอยู่  $n+1$  จุด ย่อมสามารถใช้โพลีโนเมียลการหาค่าแทรกองศา  $n$  แต่ถ้า  $n$  ใหญ่มากแล้ว โพลีโนเมียลแบบนี้ก็ไม่เหมาะสม[19] การที่จะให้ได้ผลดีกว่านี้ อาจทำได้โดยการใช้โพลีโนเมียลเป็นขั้น ๆ (piecewise polynomial) นั่นคือ ปรับโพลีโนเมียลองศาต่ำกว่าผ่านเซตย่อยของจุดข้อมูล (data points) รูปแบบการปรับโค้งที่ค่อนข้างแตกต่างกันออกไป และมีประสิทธิภาพสูงกว่า คือ least square ซึ่งเป็นการหาโพลีโนเมียลองศาต่ำที่เหมาะสมที่สุดผ่านจุดที่กำหนดให้

เราอาจเชื่อได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชัน  $y=f(x)$  แต่ค่าของ  $y$  ที่หาได้จากการทดลองนั้น จะผูกพันกับความผิดพลาด (หรือ noise) ฉะนั้น ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของกรณีนี้ คือ

$$f(x_i) = y_i + \mathcal{E}_i, \quad (i=1,2,\dots,n \text{ เมื่อมีจุดสังเกต } n \text{ จุด})$$

ในที่นี้  $f(x_i)$  เป็นค่าเชิงฟังก์ชันของ  $y$  ที่สมนัยกับค่าของ  $x_i$  ที่ใช้อยู่ในการทดลอง และ  $\mathcal{E}_i$  เป็นความผิดพลาดทางการทดลอง ซึ่งรวมอยู่ในการวัดของตัวแปร  $y$  ณ จุดนั้น ๆ ดังนั้น ความผิดพลาดใน  $y$  ที่จุดสังเกตเป็น  $\mathcal{E}_i = f(x_i) - y_i$

ปัญหาของการปรับโค้ง คือการใช้ข่าวสารของข้อมูลที่สุ่มมาเพื่อหาโค้งที่เหมาะสม นั่นคือ หาฟังก์ชันเหมาะสม  $f(x)$  ดังนั้น สมการ  $y=f(x)$  สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์  $(x,y)$  โดยหวังว่า การทำนายที่ได้จากสมการนี้ จะไม่เกิดความผิดพลาดมากเกินไป

#### 3.3.1 การศึกษาปัญหาทั่วไป

การตอบคำถามว่าจะเลือกฟังก์ชันแบบใดนั้น ขอให้พิจารณาความเป็นไปได้ของวิธีต่อไปนี้ ให้ชุดของค่าที่สังเกตมาได้มีค่าเป็น  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  เมื่อนำฟังก์ชันที่ทราบแล้ว ยกเว้นค่าของพารามิเตอร์  $k+1$  ตัว คือ  $a_0, a_1, \dots, a_k$  และสามารถแทนฟังก์ชันนี้ด้วย  $y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_k)$

เราจะเลือกค่าของพารามิเตอร์ ซึ่งจะให้ค่าความผิดพลาดที่วัด ณ. จุด  $(x_i, y_i)$  มีค่าน้อยที่สุด และจะได้เสนอแนะวิธีการทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยสุด ในหัวข้อถัดไป

ตัวอย่างของฟังก์ชันที่ใช้ได้แก่

$$(1) y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_kx^k \quad (\text{โพลีโนเมียล})$$

$$(2) y = a_0 \cos wx + a_1 \cos 2wx + \dots + a_k \cos kwx \quad (\text{คอมบิเนชันของฟังก์ชันโคไซน์})$$

$$(3) y = a_0 \sin wx + a_1 \sin 2wx + \dots + a_k \sin kwx \quad (\text{คอมบิเนชันของฟังก์ชันไซน์})$$

$$(4) y = a_1 \phi_1(x) + a_2 \phi_2(x) + \dots + a_k \phi_k(x)$$

เมื่อฟังก์ชัน  $\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_k(x)$  เป็นชุดของฟังก์ชันที่เลือกขึ้นมาก่อน

ใน (1) ชุดของฟังก์ชัน คือ  $\{1, x, x^2, \dots, x^k\}$

ในสมการ (2) ชุดของฟังก์ชัน คือ  $\{\cos wx, \cos 2wx, \dots, \cos kwx\}$

ส่วนในสมการ (3) ชุดของฟังก์ชัน คือ  $\{\sin wx, \sin 2wx, \dots, \sin kwx\}$

สำหรับฟังก์ชันแบบอื่นที่นำมาใช้ในการปรับโค้ง ได้แก่ เอ็กซ์โพเนนเชียล ฟังก์ชันเบสเซลโพลิโนเมียล Legendre และโพลิโนเมียลเชอพิเชฟ

### 3.3.2 ความผิดพลาดต่ำสุด

หัวข้อนี้จะพูดถึงการเลือกฟังก์ชันที่ทำให้การวัดความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด สมมติว่าโค้งที่ต้องการจะปรับ สามารถเขียนอยู่ในรูปเชิงเส้นทั่วไป โดยมีชุดของฟังก์ชันที่รู้ค่าแล้วเป็น  $\{\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_k(x)\}$  ความผิดพลาด  $\mathcal{E}_i = y - y_1$  ที่ข้อมูล  $n$  จุด ดังต่อไปนี้

$$\mathcal{E}_1 = c_1 \phi_1(x_1) + c_2 \phi_2(x_1) + \dots + c_k \phi_k(x_1) - y_1$$

$$\mathcal{E}_2 = c_1 \phi_1(x_2) + c_2 \phi_2(x_2) + \dots + c_k \phi_k(x_2) - y_2$$

$$\mathcal{E}_3 = c_1 \phi_1(x_3) + c_2 \phi_2(x_3) + \dots + c_k \phi_k(x_3) - y_3$$

.....

$$\mathcal{E}_n = c_1 \phi_1(x_n) + c_2 \phi_2(x_n) + \dots + c_k \phi_k(x_n) - y_n$$

ถ้าจำนวนจุดของข้อมูล (data-point) น้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนพารามิเตอร์ หรือ  $n \leq k$  แล้ว ย่อมทำให้หาค่าของ  $\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$  ที่ทำให้ความผิดพลาด  $\mathcal{E}_i$  เป็นศูนย์ ถ้า  $n < k$  แล้ว จะมี  $\{c_i\}$  เป็นคำตอบจำนวนที่ไม่จำกัด ที่ทำให้ความผิดพลาดทั้งหมดเป็นศูนย์ ในกรณีนี้ไม่สามารถหาได้ครบถ้วน เนื่องจากต้องการข้อมูลมากขึ้นอีก จึงจะเลือกโค้งได้เหมาะสม

ถ้า  $n > k$  เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ ฉะนั้น ความผิดพลาดจะไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ทั้งหมด โดยการเลือก  $\{c_i\}$  มีปฏิบัติการที่เป็นไปได้อยู่สามวิธี ดังต่อไปนี้

(1) เลือกเซต  $\{c_i\}$  ซึ่ง minimize ความผิดพลาดสมบูรณ์ทั้งหมด นั่นคือ minimize ผล

$$\text{บวก} \sum_{i=1}^n |\mathcal{E}_i|$$

(2) เลือกเซต  $\{c_i\}$  ซึ่ง minimize ความผิดพลาดสมบูรณ์สูงสุด นั่นคือ minimize  $\max \{|\mathcal{E}_i|\}$

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

(3) เลือกเซต  $\{c_i\}$  ที่ minimize ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาด (Sum of Square of Errors) นั่นคือ

$$\text{minimize } S = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i^2$$

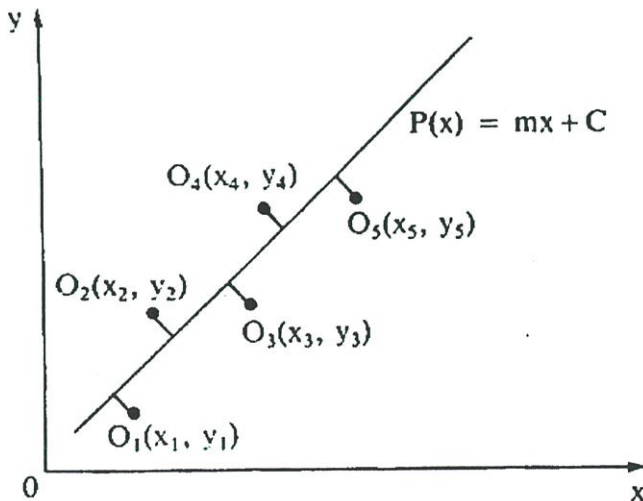
ปฏิบัติการ (1) และ (2) โดยทั่วไปแล้ว ยากต่อการนำมาใช้ ส่วนปฏิบัติในข้อ (3) นั้น นำไปสู่ระบบสมการเชิงเส้นที่สามารถหาเซต  $\{c_i\}$  วิธีการเช่นนี้ เรียกว่าหลักของ least square และนิยมใช้กันมาก

### 3.3.3 วิธีของ Least Square

กำหนดให้  $y = f(x)$  ฉะนั้น ค่าที่เกิดขึ้น  $n$  ค่า ณ  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  คือ

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$$

เราสามารถประมาณฟังก์ชันที่ไม่ทราบ  $f(x)$  ด้วยโพลิโนเมียลองศา  $n$  ถ้า  $n$  มีค่าตั้งแต่สี่ขึ้นไปแล้ว การหาโพลิโนเมียลรูปสมบูรณ์ผ่านจุดทั้งหมด ทำได้ค่อนข้างยาก ฉะนั้น จำเป็นต้องประมาณฟังก์ชัน  $f(x)$  ด้วยโพลิโนเมียลองศาน้อยกว่า  $n$  เช่น ประมาณฟังก์ชัน  $f(x)$  ที่ผ่านจุดสังเกตมาได้ 5 จุด ด้วยโพลิโนเมียลองศา 1



รูปที่ 3.4 การประมาณฟังก์ชันจากจุดสังเกต 5 จุด ด้วยโพลิโนเมียลองศา 1

นี่แสดงว่า จะพยายามหาเส้นตรงที่ลากผ่านจุดทั้ง 5 จุดนี้ ซึ่งย่อมทำไม่ได้ง่ายนัก แต่อาจหาเส้นตรงที่ลากผ่านใกล้จุดเหล่านี้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยยึดหลักว่า เส้นตรงใดก็ตามที่

ผ่านใกล้จุดทั้ง 5 จุดนี้แล้ว ข้อมทำให้ “ผลบวกกำลังสองของผลต่างที่แต่ละจุดระหว่างค่าที่กำหนดมาให้กับค่าที่เกิดจากการคำนวณ” หรือผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด วิธีการเช่นนี้เรียกว่า วิธีของ Least Square

วิธีของ Least Square นี้ อาจนำไปใช้ในการหาโค้งผ่านจุดต่าง ๆ ได้ดีที่สุด เช่น ในการทดลองการวัดค่าต่าง ๆ อาจคลาดเคลื่อนจากความจริง

สรุปแล้วปัญหาของ Least Square คือ การหาค่าของค่าต่าง ๆ กล่าวคือ  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$  ของโพลิโนเมียลองศา  $k$

$$P_k(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_kx^k$$

ซึ่งผ่านจุดต่าง ๆ  $n$  จุด คือ  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  เมื่อ  $n > k$

การทำให้กำลังสองของผลต่างระหว่าง  $f(x)$  และ  $P_k(x)$  ณ จุดต่าง ๆ มีค่าน้อยที่สุดนั้น ต้องเลือกสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, \dots, a_k$  ขึ้นมา เพื่อให้ผลบวกของความผิดพลาดกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

เนื่องจากความผิดพลาดหรือค่าเบี่ยงเบน เป็นผลต่างระหว่างค่าของ  $y$  ที่กำหนดขึ้น หรือค่าที่ได้จากการทดลองหรือค่าที่สังเกตมาได้ กับค่าที่เกิดจากการคำนวณของโพลิโนเมียลองศา  $k$  ที่  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  นั่นคือ

$$\mathcal{E}_i = f(x_i) - P_k(x_i) ; i = 1, 2, \dots, n$$

ฉะนั้น ความผิดพลาดกำลังสอง คือ

$$\mathcal{E}_i^2 = \{f(x_i) - P_k(x_i)\}^2$$

และผลบวกของความผิดพลาดกำลังสอง คือ

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - P_k(x_i)]^2$$

$$\text{หรือ } S = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_k) - y_i]^2$$

การหาค่าตัวคงที่ที่ทำให้ผลบวกของความผิดพลาดกำลังสอง มีค่าต่ำสุด ทำได้โดยหาอนุพันธ์ย่อยของ  $S$  เทียบพารามิเตอร์แต่ละตัว แล้วจัดให้เท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = 0$$

....

....

....

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0$$

การแก้สมการที่มีอยู่  $m+1$  สมการ เพื่อหา  $a_0, a_1, \dots, a_k$  ที่ทำให้ผลบวกของความผิดพลาดกำลังสองมีค่าต่ำสุด จุดของสมการข้างบนนั้น มีชื่อว่า สมการปกติ (normal equation)

ต่อไปเป็นการศึกษาถึงการนำโพลิโนเมียลองศาต่างๆ มาประมาณฟังก์ชัน  $f(x)$

กรณีที่ 1 : เมื่อ  $k=1$  แล้ว ต้องหาสมการ  $y = a_0 + a_1x$  ซึ่งเป็นโพลิโนเมียลองศาหนึ่ง ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสอง

$$S = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - P_1(x_i)]^2 \quad \text{มีค่าต่ำสุด}$$

ถ้าใช้วิธีของ least square แล้ว ต้องหาค่าของ  $a_0, a_1$  ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองมีค่าต่ำสุด ซึ่งทำดังนี้

$$\text{จาก } S(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - P_1(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1x_i]^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (f(x_i) - a_0 - a_1x_i) = 0$$

$$\text{และ } \frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (f(x_i) - a_0 - a_1x_i) = 0$$

$$\text{หรือ } \sum_{i=1}^n (f(x_i) - a_0 - a_1x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i (f(x_i) - a_0 - a_1x_i) = 0$$

เมื่อหาค่าผลบวก และเทอมใหม่แล้ว สมการทั้งสองจะกลายเป็น

$$(n+1)a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i)$$

เพื่อให้การคำนวณสะดวกยิ่งขึ้น จึงควรสร้างตารางช่วยคำนวณ หลังจากนั้นให้นำค่าที่ได้ แทนลงในสมการปกติ เสร็จแล้วให้แก้สมการหาค่า  $a_0$  และ  $a_1$  เมื่อแทน  $a_0, a_1$  ลงในพหุนามเมียบลองศาหนึ่ง จะได้สมการสำหรับปรับโค้งตามต้องการ

ตารางที่ 3.1 ตารางช่วยคำนวณสำหรับการปรับโค้งด้วยพหุนามเมียบลองศา 1

$i$	$x_i$	$x_i^2$	$f(x_i)$	$f(x_i)(x_i)$
1	$x_1$	$x_1^2$	$f(x_1)$	$f(x_1)(x_1)$
2	$x_2$	$x_2^2$	$f(x_2)$	$f(x_2)(x_2)$
3	$x_3$	$x_3^2$	$f(x_3)$	$f(x_3)(x_3)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$n$	$x_n$	$x_n^2$	$f(x_n)$	$f(x_n)(x_n)$
	$\sum x_i$	$\sum x_i^2$	$\sum f(x_i)$	$\sum f(x_i)(x_i)$

กรณีที่ 2 : เมื่อ  $k=2$  แสดงว่าเราปรับโค้งด้วยพหุนามเมียบลองศา 2

$P_2(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$  โดยลากผ่านข้อมูลจุดได้กระชับที่สุด การหาค่าของ  $a_0, a_1$  และ  $a_2$  สามารถทำได้โดยวิธีของ least square

$$\begin{aligned} \text{จาก } S(a_0, a_1, a_2) &= \sum_{i=1}^n [f(x_i) - P_2(x_i)]^2 \\ &= \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2]^2 \end{aligned}$$

เมื่อหาอนุพันธ์เทียบกับ  $a_0, a_1$  และ  $a_2$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_0} &= -2 \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2] = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} &= -2 \sum_{i=1}^n x_i [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2] = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_2} &= -2 \sum_{i=1}^n x_i^2 [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2] = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i [f(x_i) - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 [f(x_i) - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2] &= 0 \end{aligned}$$

เมื่อแก้สมการทั้งสามนี้แล้ว จะได้สมการปกติ ดังนี้

$$\begin{aligned} (n+1)a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n f(x_i) \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 &= \sum_{i=1}^n f(x_i)x_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 &= \sum_{i=1}^n f(x_i)x_i^2 \end{aligned}$$

เพื่อความสะดวกในการแก้สมการหา  $a_0, a_1$  และ  $a_2$  ควรสร้างตารางช่วยการคำนวณดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางช่วยคำนวณสำหรับการปรับโค้งด้วยพหุนามเมียร์สององศา 2

$i$	$x_i$	$x_i^2$	$x_i^3$	$x_i^4$	$f(x_i)$	$f(x_i)(x_i)$	$f(x_i)x_i^2$
1	$x_1$	$x_1^2$	$x_1^3$	$x_1^4$	$f(x_1)$	$f(x_1)(x_1)$	$f(x_1)x_1^2$
2	$x_2$	$x_2^2$	$x_2^3$	$x_2^4$	$f(x_2)$	$f(x_2)(x_2)$	$f(x_2)x_2^2$
3	$x_3$	$x_3^2$	$x_3^3$	$x_3^4$	$f(x_3)$	$f(x_3)(x_3)$	$f(x_3)x_3^2$
4	$x_4$	$x_4^2$	$x_4^3$	$x_4^4$	$f(x_4)$	$f(x_4)(x_4)$	$f(x_4)x_4^2$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
$n$	$x_n$	$x_n^2$	$x_n^3$	$x_n^4$	$f(x_n)$	$f(x_n)(x_n)$	$f(x_n)x_n^2$
	$\sum x_i$	$\sum x_i^2$	$\sum x_i^3$	$\sum x_i^4$	$\sum f(x_i)$	$\sum f(x_i)(x_i)$	$\sum f(x_i)x_i^2$

กรณีที่ 3 : ถ้า  $k=3$  แสดงว่าต้องการลากเส้นโค้ง หรือโพลิโนเมียลองศาสาม

$P_3(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$  ให้ผ่านจุด  $n$  จุด เมื่อใช้วิธีของ least square แล้ว ต้องหา  $a_0, a_1, a_2$  และ  $a_3$  ที่ทำให้

$$S(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - P_3(x_i)]^2$$

มีค่าต่ำสุด

การหาค่าของ  $a_0, a_1, a_2$  และ  $a_3$  ทำได้ดังนี้

$$\text{จาก } S(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - a_3x_i^3]^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - a_3x_i^3]$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - a_3x_i^3]$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^2 [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - a_3x_i^3]$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_3} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^3 [f(x_i) - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 - a_3x_i^3]$$

เมื่อจัดให้  $\frac{\partial S}{\partial a_0}$ ,  $\frac{\partial S}{\partial a_1}$ ,  $\frac{\partial S}{\partial a_2}$  และ  $\frac{\partial S}{\partial a_3}$  เท่ากับศูนย์ และจัดเทอมเสียใหม่ จะได้สม

การปกติ สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองค่าน้อยที่สุด ดังนี้

$$\sum_{i=1}^n a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i f(x_i)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n x_i^2 f(x_i)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^5 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^3 f(x_i)$$

ถ้ากำหนดให้  $y = f(x_i)$ ,  $x = x_i$ ,  $\sum_{i=1}^n = \Sigma$

แล้ว เมื่อเขียนสมการปกติข้างบนอยู่ในรูปของแมทริกซ์ จะมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \sum a_0 & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \\ \sum x^3 y \end{bmatrix}$$

กรณีที่ 4 : ถ้า  $k = n$  แล้ว แสดงว่าต้องการลากเส้นโค้ง

$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$$

ผ่านชุดของข้อมูล  $n$  จุด ให้กระชับที่สุดนั้น การหาสมการปกติและแก้สมการเพื่อหาตัวพารามิเตอร์ ที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองมีค่าต่ำสุด ก็ทำแบบเดียวกับกรณีที่ผ่านมา และเมื่อเขียนสมการปกติให้อยู่ในรูปของแมทริกซ์ จะได้ผลลัพธ์ตามรูปต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{n+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \sum x_i^{n+2} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f(x_i) \\ \sum x_i f(x_i) \\ \sum x_i^2 f(x_i) \\ \dots \\ \sum x_i^n f(x_i) \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $\sum$  หมายถึง  $\sum_{i=1}^n$

การใช้วิธีของ least square เท่าที่กล่าวมาแล้วนั้น ไม่จำเป็นต้องปรับโค้งด้วยพหุนามเมียร์ก็ได้ อาจปรับข้อมูลที่สังเกตได้ หรือโจทย์ให้มาด้วยโค้งรูปอื่น โดยถือหลักว่าจำนวนพารามิเตอร์ของโค้งที่ต้องการนำมาปรับ ต้องน้อยกว่า  $n$  เสมอ เช่น อาจใช้ไฮเปอร์โบลา  $y = a_0 + \frac{a_1}{x}$  ลากผ่านจุด  $n+1$  จุด ฉะนั้น จึงต้องหาค่าของ  $a_0$  และ  $a_1$  ที่ทำให้ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นคือ ต้องหา  $\alpha_0$  และ  $\alpha_1$  ที่ทำให้

$$\begin{aligned}
 S(\alpha_0, \alpha_1) &= \sum_{r=1}^n [f_r - y_r]^2 \\
 &= \sum_{r=1}^n \left| f - \alpha - \frac{\alpha_1}{x_r} \right|^2
 \end{aligned}$$

มีค่าน้อยที่สุด

นอกจากนั้น บางครั้งมีความจำเป็นต้องปรับข้อมูล ด้วยโค้งที่มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล หรือฟังก์ชันกำลัง (power function) เช่น

$$y = Ae^{\alpha x} \quad \text{และ} \quad y = ax^n$$

### 3.4 อินทิเกรชันเชิงตัวเลข

ปัญหาทั่วไปของการอินทิเกรตเชิงตัวเลข อาจกล่าวได้ดังต่อไปนี้ กำหนดเขตของจุดข้อมูล  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  ของฟังก์ชัน  $y = f(x)$  ที่ไม่ทราบ  $f(x)$  แน่ชัด[20] สำหรับการคำนวณค่าของอินทิกรัลจำกัดเขต

$$I = \int_a^b y dx \quad (3.13)$$

ก็ทำได้เช่นเดียวกับกรณีของการหาอนุพันธ์เชิงตัวเลข คือต้องแทน  $f(x)$  ด้วยพหุนามเมื่อยล ค่าแทรก  $\phi(x)$  แล้วทำการอินทิเกรตหาค่าประมาณของอินทิกรัลจำกัดเขต ดังนั้นสูตรการอินทิเกรตแบบต่าง ๆ อาจหาได้โดยขึ้นอยู่กับการใช้สูตรการหาค่าแทรกสูตรใดสูตรหนึ่งในหัวข้อนี้ ชั้นแรกจะหาสูตรทั่ว ๆ ไปของการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้สูตรของนิวตันแบบ forward

.ในช่วง  $[a, b]$  ถูกแบ่งออกเป็น  $n$  ช่วงเท่าๆ กัน ซึ่ง

$$a = x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_n = b$$

ฉะนั้น อินทิกรัลจะกลายเป็น

$$I = \int_{x_0}^{x_n} y dx$$

เมื่อประมาณ  $y$  ด้วยสูตรของนิวตัน forward (Newton's difference formula) แล้วจะได้

$$I = \int_{x_0}^{x_n} \left[ y_0 + u\Delta y_0 + \frac{u(u-1)}{2!} \Delta^2 y_0 + \frac{u(u-1)(u-2)}{3!} \Delta^3 y_0 + \dots \right] dx$$

เนื่องจาก  $x = x_0 + uh, dx = hdu$  ฉะนั้น อินทิกรัลข้างบนจะกลายเป็น

$$I = h \int_0^n \left[ y_0 + u \Delta y_0 + \frac{u(u-1)}{2!} \Delta^2 y_0 + \frac{u(u-1)(u-2)}{3!} \Delta^3 y_0 + \frac{u(u-1)(u-2)(u-3)}{4!} \Delta^4 y_0 + \dots \right] dx$$

เมื่อทำให้ง่ายแล้วจะได้

$$\int_{x_0}^{x_n} y dx = h \left[ n y_0 + \frac{n^2}{2} \Delta y_0 + \left( \frac{n^3}{3} - \frac{n^2}{2} \right) \frac{\Delta^2 y_0}{2!} + \left( \frac{n^4}{4} - n^3 + n^2 \right) \frac{\Delta^3 y_0}{3!} + \dots \right] \quad (3.14)$$

สมการ (3.14) นี้เรียกว่า general quadrature formula หรือ general formula จากสูตรทั่วไปนี้สามารถหาสูตรการอินทิเกรตรูปต่าง ๆ กันได้ โดยแทน

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

### 3.4.1 กฎ Trapezoidal

แทน  $n = 1$  ลงในสมการ (3.14) และไม่คิดเทอมความแตกต่างที่มีอันดับสองและสูงกว่า

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+h} y dx &= h \left[ y_0 + \frac{1}{2} \Delta y_0 \right] \\ &= h \left[ y_0 + \frac{y_1 - y_0}{2} \right] \\ &= h \left( \frac{y_0 + y_1}{2} \right) \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} \int_{x_0+h}^{x_0+2h} y dx &= h \left[ y_1 + \frac{1}{2} \Delta y_1 \right] \\ &= h \left( \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \end{aligned}$$


---

$$\int_{x_0+n-1h}^{x_0+nh} y dx = h \left( \frac{y_{n-1} + y_n}{2} \right)$$

บวกอินทิกรัลเหล่านี้เข้าด้วยกันจะได้

$$\int_{x_0}^{x_n} y dx = \frac{h}{2} [(y_0 + y_n) + 2(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1})] \quad (3.15)$$

นี่คือกฎของ Trapezoidal

นัยสำคัญเชิงเรขาคณิตของกฎนี้ คือ โคนิ่ง  $y = f(x)$  จะถูกแทนด้วยเส้นตรง  $n$  เส้นเชื่อมระหว่าง  $(x_0, y_0)$  กับ  $(x_1, y_1)$  ;  $(x_1, y_1)$  กับ  $(x_2, y_2)$  , ...,  $(x_{n-1}, y_{n-1})$  กับ  $(x_n, y_n)$  แล้วพื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยโคนิ่ง  $y = f(x)$ , เส้นตั้งที่  $x = x_0$  และ  $x = x_n$  และแกน  $x$  จะมีค่าประมาณเท่ากับผลบวกของพื้นที่ของ  $n$  trapezium

ความผิดพลาดของสูตร trapezoidal สามารถหาได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

ให้  $y = f(x)$  เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง และมีอนุพันธ์ต่อเนื่องในช่วง  $[x_0, x_n]$  เมื่อกระจาย  $y$  ออกเป็นอนุกรมเทย์เลอร์รอบ  $x = x_0$  จะได้

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_1} y dx &= \int_{x_0}^{x_1} \left[ y_0 + (x-x_0)y_0' + \frac{(x-x_0)^2}{2} y_0'' + \dots \right] dx \\ &= hy_0 + \frac{h^2}{2!} y_0' + \frac{h^3}{3!} y_0'' + \dots \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\text{แต่ } y_1 = y_{0+h} = y_0 + hy_0' + \frac{h^2}{2!} y_0'' + \frac{h^3}{3!} y_0''' + \dots$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{h}{2} [y_0 + y_1] &= \frac{h}{2} \left[ y_0 + hy_0' + \frac{h^2}{2} y_0'' + \frac{h^3}{6} y_0''' + \dots \right] \\ &= hy_0 + \frac{h^2}{2} y_0' + \frac{h^3}{4} y_0'' + \frac{h^4}{12} y_0''' + \dots \end{aligned} \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.16) และ (3.17) จะได้

$$\int_{x_0}^{x_1} y dx - \frac{h}{2} [y_0 + y_1] = -\frac{1}{12} h^3 y_0'' + \dots \quad (3.18)$$

ซึ่งเป็นความผิดพลาดในช่วง  $[x_0, x_1]$  โดยการกระทำในลักษณะเดียวกัน จะได้ความผิดพลาดในช่วงย่อยที่เหลือ กล่าวคือ  $[x_1, x_2], [x_2, x_3], \dots$  และ  $[x_{n-1}, x_n]$  ดังนั้นจะได้

$$E = -\frac{1}{12} h^3 [y_0'' + y_1'' + \dots + y_{n-1}''] \quad (3.19)$$

เมื่อ  $E$  เป็นความผิดพลาดทั้งหมด สมมติว่า  $y''(\bar{x})$  เป็นค่าใหญ่ที่สุดของ  $n$  ปริมาณทางด้านขวามือของสมการ (3.19) ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} E &\approx -\frac{1}{12} h^3 n y''(\bar{x}) \\ &= -\frac{(b-a)}{12} h^2 y''(\bar{x}) \end{aligned} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $nh = (b-a)$

### 3.4.2 กฎของ Simpson

กฎนี้หาได้โดยการแทน  $n = 2$  ลงในสมการ (3.14) นั่นคือโดยแทนที่โค้งด้วย  $\frac{n}{2}$  arc ของพหุนามเมียบลองศาสองหรือพาราโบลา

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+2h} y dx &= h \left[ 2y_0 + 2(y_1 - y_0) + \frac{(8/3-2)}{2} (y_2 - 2y_1 + y_0) \right] \\ &= \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + y_2) \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกัน

$$\int_{x_0+2h}^{x_0+4h} y dx = \frac{h}{3}(y_2 + 4y_3 + y_4)$$

$$\int_{x_0+(n-2)h}^{x_0+nh} y dx = \frac{h}{3}(y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n)$$

เมื่อ  $n$  เป็นเลขคู่

เมื่อบวกอินทิกรัลเหล่านี้เข้าด้วยกัน จะได้

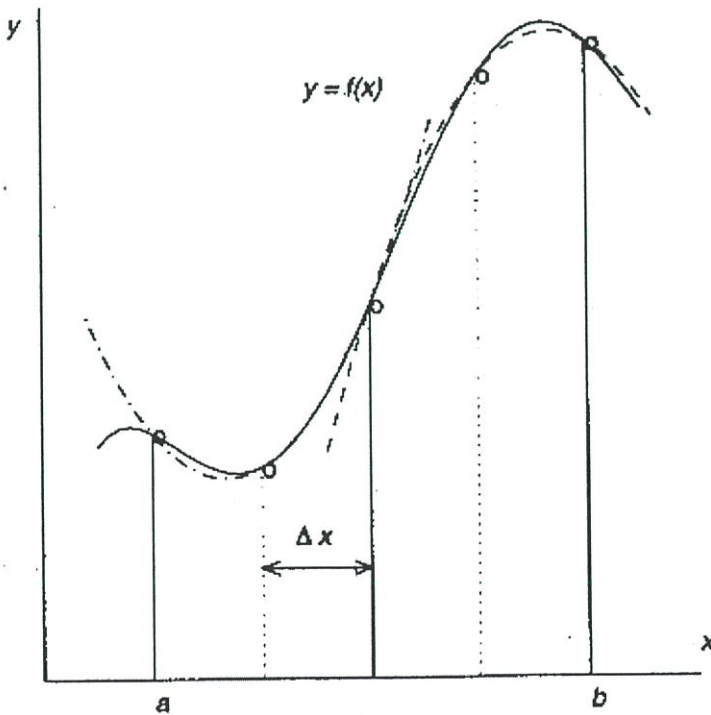
$$\int_{x_0}^{x_0+nh} y dx = \frac{h}{3}[(y_0 + y_n) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{n-1}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{n-2})]$$

นี่คือสูตรของ Simpson's one third หรือบางทีเรียกง่าย ๆ ว่า กฎ simpson จะสังเกตเห็นว่า กฎนี้ต้องการการแบ่งพิสัยทั้งหมดออกเป็นช่วงย่อย ๆ ที่มีความกว้าง  $h$  จำนวนคู่

สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมด คือ

$$E = -\frac{(b-a)}{180} h^4 y^{(iv)}(\bar{x})$$

เมื่อ  $y^{(iv)}(\bar{x})$  เป็นค่าใหญ่ที่สุด ของอนุพันธ์อันดับที่สี่



รูปที่ 3.5 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีการของ Simpson

### 3.4.3 กฎของ Simpson สามส่วนแปด (three-eight)

สูตรนี้หาได้จากการแทน  $n = 3$  ลงในสมการ (3.14) และไม่คิดเทอมที่มีความแตกต่างตั้งแต่อันดับสูงกว่าสามขึ้นไป ดังนั้น

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+3h} y dx &= h \left[ 3y_0 + \frac{9}{2}(y_1 + y_0) + \frac{9}{4}(y_2 + 2y_1 + y_0) + \frac{3}{8}(y_3 - 3y_2 + 3y_1 - y_0) \right] \\ &= \frac{3h}{8} [y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3] \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกัน

$$\int_{x_0+3h}^{x_0+6h} y dx = \frac{3h}{8} (y_3 + 3y_4 + 3y_5 + y_6)$$

เมื่อบวกพื้นที่ย่อยทั้งหมดภายในช่วง  $x_0$  กับ  $x_n$  เมื่อ  $n$  เป็น multiple ของสามจะได้

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+nh} y dx &= \frac{3h}{8} \left[ (y_0 + y_n) + 3(y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + \dots + y_{n-1}) \right. \\ &\quad \left. + 2(y_3 + y_6 + \dots + y_{n-3}) \right] \end{aligned}$$

นี่คือสูตรของ Simpson สามส่วนแปด

เมื่อพิจารณาสูตรนี้เป็นสองเท่าตัวแล้ว จะได้

$$\int_0^6 u_x dx = \frac{3}{8} h [(u_0 + u_6) + 3(u_1 + u_2 + u_4 + u_5) + 2u_3]$$

ในที่นี้ ไม่ได้คิดเทอมที่มีความแตกต่าง อันดับสูงกว่าสามขึ้นไป ซึ่งเท่ากับเราได้สมมติว่า  $y$  เป็นพหุนามเมียบลองศาสาม นั่นคือ  $y$  มีรูปเป็น  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$

### 3.4.4 กฎของ Weddle

แทน  $n = 6$  ลงในสมการ(3.14) และไม่คิดเทอมความแตกต่างตั้งแต่อันดับสูงกว่าหกแล้ว เราจะได้

$$\int_{x_0}^{x_0+6h} y dx = h \left[ 6y_0 + 18\Delta y_0 + 27\Delta^2 y_0 + 24\Delta^3 y_0 + \frac{123}{10}\Delta^4 y_0 + \frac{33}{10}\Delta^5 y_0 + \frac{41}{140}\Delta^6 y_0 \right]$$

ถ้าแทนเทอมสุดท้ายด้วย  $\frac{3}{10}\Delta^6 y_0$  แล้ว ข้อมผิดพลาดไป  $\frac{h}{140}\Delta^6 y_0$  ซึ่งสามารถตัดทิ้งได้

ถ้าค่าของ  $h$  น้อย โดยการสมมติเช่นนี้ เราจะแทนเทอมสุดท้ายด้วย  $\frac{3}{10}\Delta^6 y_0$

ฉะนั้น

$$\int_{x_0}^{x_0+6h} y dx = \frac{3h}{10} [y_0 + 5y_1 + y_2 + 6y_3 + y_4 + 5y_5 + y_6]$$

ทำนองเดียวกัน

$$\int_{x_0+6h}^{x_0+12h} y dx = \frac{3h}{10} [y_6 + 5y_7 + y_8 + 6y_9 + y_{10} + 5y_{11} + y_{12}]$$

---


$$\int_{x_0+(n-6)h}^{x_0+nh} y dx = \frac{3h}{10} [y_{n-6} + 5y_{n-5} + y_{n-4} + 6y_{n-3} + y_{n-2} + 5y_{n-1} + y_n]$$

ถ้า  $n$  เป็น multiple ของ 6

เมื่อบวกพื้นที่ย่อยเข้าด้วยกัน จะได้

$$\int_{x_0}^{x_0+nh} y dx = \frac{3h}{10} [y_0 + 5y_1 + y_2 + 6y_3 + y_4 + 5y_5 + 2y_6 + 5y_7 + y_8 + \dots]$$

นี่คือสูตรของ Weddle ที่มีความแม่นยำสูงกว่ากฎของ Simpson แต่ต้องใช้ค่าของฟังก์ชันน้อยอย่างน้อยเจ็ดค่า และในที่นี้เราได้สมมติว่า

$$y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g$$

ฉะนั้น ถ้า  $f(x)$  เป็นพหุนามเมียบelowศาห้าหรือต่ำกว่าแล้วกฎของ Weddle ก็จะทำให้ผลลัพท์ถูกต้อง

### 3.4.5 ความผิดพลาดในสูตรการหาอินทิเกรตแบบ Trapezoidal และ Simpson

#### 3.4.5.1 ความผิดพลาดในสูตรของ Trapezoidal

การหาพื้นที่จากการใช้สูตร Trapezoidal เป็นเพียงการหาพื้นที่โดยถือว่า ฟังก์ชันที่ต้องการหาพื้นที่เป็นเส้นตรง แต่ถ้าฟังก์ชันที่ต้องการหาพื้นที่ไม่ใช่เส้นตรง ย่อมเกิดความผิดพลาด ส่วนความผิดพลาดจะมากน้อยเพียงใดนั้น จะได้วิเคราะห์ต่อไป

ถ้าต้องการหาพื้นที่ด้วยสูตรของ Trapezoidal จากฟังก์ชัน  $y = f(x)$  ในช่วง  $x_{i-1}$  กับ  $x_i$  โดยแบ่งเป็นช่วงย่อย ๆ ซึ่งกว้าง  $h = \frac{b-a}{n}$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนช่องที่ต้องการแบ่ง  $(a, b)$  ซึ่งเป็นลิมิตส่วนบนและล่างตามลำดับ

เนื่องจากค่าที่ถูกต้องของพื้นที่ใต้โค้ง  $y = f(x)$  ในช่วง  $x_{i-1}$  ถึง  $x_i$  หาได้จาก

$$I_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx = F(x_i) - F(x_{i-1}) \quad (3.21)$$

ส่วนค่าพื้นที่คำนวณได้จากการใช้สูตร Trapezoidal คือ

$$A = \frac{h}{2} [f(x_{i-1}) + f(x_i)]$$

ฉะนั้น ความผิดพลาดในการหาพื้นที่เมื่อใช้สูตร Trapezoidal รูปที่  $i$  คือ

$$E_i = A_i - I_i \quad (3.22)$$

ถ้าใช้อนุกรม Taylor กระจาย  $f(x_{i-1})$  รอบจุด  $x = x_i$  จะได้

$$\begin{aligned} f(x_{i-1}) &= f(x_i) + f'(x_i)(x_{i-1} - x_i) + \frac{f''(x_i)}{2!}(x_{i-1} - x_i)^2 \\ &\quad + \frac{f'''(x_i)}{3!}(x_{i-1} - x_i)^3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

ฉะนั้น

$$\begin{aligned} f(x_{i-1}) &= f(x_i) + f'(x_i)(-h) + \frac{f''(x_i)}{2!}(-h)^2 + \dots \\ &= f(x_i) - hf'(x_i) + \frac{h^2 f''(x_i)}{2!} - \frac{h^3 f'''(x_i)}{3!} + \dots \end{aligned} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $h = x_i - x_{i-1}$  หรือ  $-h = x_{i-1} - x_i$

แทน  $f(x_{i-1})$  ลงยัง

$$A_i = \frac{h}{2} [f(x_{i-1}) + f(x_i)]$$

จะได้

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{h}{2} \left[ f(x_i) - f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)h^2}{2!} - \frac{f'''(x_i)h^3}{3!} + f(x_i) \right] \\ &= \frac{h}{2} \left[ 2f(x_i) - f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)h^2}{2!} - \frac{f'''(x_i)h^3}{3!} + \dots \right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

และเมื่อกระจาย  $F(x_{i-1})$  รอบจุด  $x = x_i$  จะได้

$$\begin{aligned} F(x_{i-1}) &= F(x_i) + F'(x_i)(x_{i-1} - x_i) + \frac{F''(x_i)}{2!}(x_{i-1} - x_i)^2 + \frac{F'''(x_i)}{3!}(x_{i-1} - x_i)^3 + \dots \\ &= F(x_i) + F'(x_i)h + \frac{F''(x_i)h^2}{2!} - \frac{F'''(x_i)h^3}{3!} + \dots \end{aligned} \quad (3.26)$$

แทน (3.26) ลงยัง (3.21) จะได้

$$\begin{aligned} I_i &= F(x_i) + F(x_{i-1}) \\ &= F(x_i) - \left[ F(x_i) - F'(x_i)h + \frac{F''(x_i)h^2}{2!} - \frac{f'''(x_i)h^3}{3!} \right] \\ &= F'(x_i)h - \frac{F''(x_i)h^2}{2!} + \frac{F'''(x_i)h^3}{3!} \end{aligned} \quad (3.27)$$

เนื่องจาก  $F(x)$  ได้มาจากการอินทิเกรตฟังก์ชัน  $f(x)$  ฉะนั้น

$$\begin{aligned} f(x) &= F'(x) \\ f'(x) &= F''(x) \\ f''(x) &= F'''(x) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned}$$

ดังนั้น สมการ (3.27) จะกลายเป็น

$$I_i = f(x_i)h - \frac{f'(x_i)h^2}{2!} + \frac{f''(x_i)h^3}{3!} + \dots \quad (3.28)$$

แทน (3.25) และ (3.28) ลงยังสมการ (3.22) จะได้

$$\begin{aligned} E_i &= A_i - I_i \\ &= \left[ f(x_i)h - \frac{f'(x_i)h^2}{2!} + \frac{f''(x_i)h^3}{2 \cdot 2!} + \dots \right] \\ &\quad - \left[ f(x_i)h - \frac{f'(x_i)h^2}{2!} + \frac{f''(x_i)h^3}{3!} + \dots \right] \\ &= \frac{f''(x_i)h^3}{4} - \frac{f''(x_i)h^3}{6} + \text{เทอมที่มี } h \text{ กำลังสูงกว่าขึ้นไป} \\ &= \left[ \frac{1}{4} - \frac{1}{6} \right] f''(x_i)h^3 + \text{เทอมที่มีกำลังสูงกว่า} \\ &= \frac{1}{12} f''(x_i)h^3 + \text{เทอมที่มีกำลังสูงกว่า} \end{aligned}$$

ถ้า  $h$  มีค่าน้อยแล้วย่อมสามารถตัดเทอมที่มีกำลังสูงกว่า  $h^4$  ที่ทิ้งได้ ดังนั้น

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{h^3}{12} f''(x_i) \\ &= \frac{1}{12} \left( \frac{b-a}{n} \right) h^2 f''(x_i) \end{aligned}$$

เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดจากการหาพื้นที่ ตามวิธีของ Trapezoidal ณ รูปที่  $i$  สามารถประมาณได้ โดยสมมติให้

$$|f''(x)| \leq M \quad \text{สำหรับ } x \text{ ทุกๆ ค่าในพิสัย } a \leq x \leq b$$

$$\text{แล้ว } |E_i| \leq \frac{h^3}{12} M$$

เมื่อรวมความผิดพลาดของพื้นที่ทั้งหมด  $n$  รูป เข้าด้วยกันจะได้ความผิดพลาดทั้งหมดเป็น

$$\begin{aligned} E_i &\leq \frac{nh^3}{12} M \\ &= nh \frac{h^2}{12} M \\ &= (b-a) \frac{h^2}{12} M \end{aligned}$$

ดังนั้น ความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้สูตร Trapezoidal ย่อมเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ  $h^2$

### 3.4.5.2 ความผิดพลาดจากการใช้สูตร Simpson

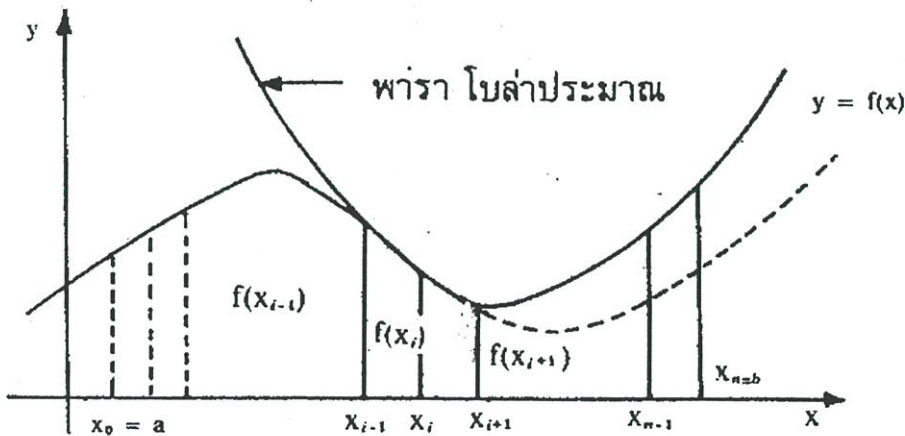
ก่อนที่จะศึกษาความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้สูตรของ Simpson เศษหนึ่งส่วนสามขอให้อุตัวอย่างการอินทิเกรท

$$A = \int_{-h}^h x^3 dx = \left[ \frac{x^4}{4} \right]_{-h}^h = 0$$

และถ้าใช้สูตร Simpson จะได้

$$\begin{aligned} A &= \frac{h}{3} [f_0 + 4f_1 + f_2] \\ &= \frac{h}{3} [ -(-h)^3 + 4(0)^3 + (h)^3 ] \\ &= 0 \end{aligned}$$

นี่แสดงว่าการหาพื้นที่ตามวิธีของ Simpson ย่อมมีความถูกต้องเมื่อสมการที่ต้องการหาพื้นที่ที่เป็นสมการกำลังสาม (cubic) เท่านั้น การหาความผิดพลาดจากการใช้สูตรของ Simpson ขอให้อุรูปที่ 3.6 ซึ่งแบ่งช่วง  $(a, b)$  ออกเป็นช่วงย่อยๆ เท่ากัน  $n$  ช่วง



รูปที่ 3.6 การหาความผิดพลาดตามวิธีการของ Simpson

ถ้าหาพื้นที่ด้วยสูตรของ Simpson ที่แบ่งเป็นสองช่วง คือ จาก  $x_{i-1}$  ถึง  $x_i$  และจาก  $x_i$  ถึง  $x_{i+1}$  ความผิดพลาดที่เกิดจากการหาพื้นที่ใน ช่วงทั้งสอง คือ

$$E_i = A_i - I_i$$

เมื่อ  $A_i$  เป็นพื้นที่ซึ่งหาจากสูตรของ Simpson หรือ

$$A_i = \frac{h}{3} [f(x_{i-1}) + 4f(x_i) + f(x_{i+1})] \quad (3.29)$$

ส่วน  $I_i$  เป็นพื้นที่จริงซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตฟังก์ชัน  $y = f(x)$  จาก  $x_{i-1}$  ถึง  $x_{i+1}$   
หรือ

$$I_i = \int_{x_{i-1}}^{x_{i+1}} f(x) dx = F(x_{i+1}) - F(x_{i-1}) \quad (3.30)$$

ถ้าใช้อนุกรม Taylor กระจาย  $f(x_{i-1})$  รอบจุด  $x = x_i$  จะได้

$$\begin{aligned} f(x_{i-1}) &= f(x_i) - f'(x_i)(x_{i-1} - x_i) \\ &\quad + \frac{f''(x_i)}{2!}(x_{i-1} - x_i)^2 + \frac{f'''(x_i)}{3!}(x_{i-1} - x_i)^3 + \dots \end{aligned}$$

หรือ

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) - hf'(x_i) + \frac{f''(x_i)h^2}{2!} + \frac{f'''(x_i)h^3}{3!} \quad (3.31)$$

และถ้ากระจาย  $f(x_{i+1})$  ด้วยอนุกรม Taylor รอบจุด  $x = x_i$  จะได้

$$\begin{aligned} f(x_{i+1}) &= f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + \frac{f''(x_i)}{2!}(x_{i+1} - x_i)^2 \\ &\quad + \frac{f'''(x_i)}{3!}(x_{i+1} - x_i)^3 + \frac{f^{(4)}(x_i)}{4!}(x_{i+1} - x_i)^4 + \dots \end{aligned}$$

หรือ

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)h + \frac{f''(x_i)h^2}{2!} + \frac{f'''(x_i)h^3}{3!} + \dots \quad (3.32)$$

แทน (3.31) และ (3.32) ยังสมการ (3.29)

$$A_i = \frac{h}{3} [f(x_{i-1}) + 4f(x_i) + f(x_{i+1})]$$

จะได้

$$\begin{aligned}
 A_i &= \frac{h}{3} \left[ 6f(x_i) + 2 \frac{f''(x_i)h^2}{2!} + \frac{2f^{(4)}(x_i)h^4}{4!} + \dots \right] \\
 &= 2f(x_i)h + \frac{2f''(x_i)h^3}{3!} + \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{3 \cdot 4!} + \dots
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

ต่อไปทำสมการ (3.30) ให้อยู่ในรูปกระทัดรัดยิ่งขึ้น ด้วยการใช้ออนุกรม Taylor กระจาย  $F(x_{i-1})$  รอบจุด  $x = x_i$  ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned}
 F(x_{i-1}) &= F(x_i) + F'(x_i)(x_{i-1}-x_i) + \frac{F''(x_i)}{2!}(x_{i-1}-x_i)^2 \\
 &\quad + \frac{F'''(x_i)}{3!}(x_{i-1}-x_i)^3 + \frac{F^{(4)}(x_i)}{4!}(x_{i-1}-x_i)^4 + \dots \\
 &= F(x_i) - F'(x_i)h + \frac{F''(x_i)h^2}{2!} + \frac{F'''(x_i)h^3}{3!} \\
 &\quad + \frac{F^{(4)}(x_i)h^4}{4!} + \dots
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

ทำนองเดียวกัน ถ้ากระจาย  $F(x_{i+1})$  รอบ  $x = x_i$  จะได้

$$\begin{aligned}
 F(x_{i+1}) &= F(x_i) + F'(x_i)h + \frac{F''(x_i)h^2}{2!} + \frac{F'''(x_i)h^3}{3!} \\
 &\quad + \frac{F^{(4)}(x_i)h^4}{4!} + \frac{F^{(5)}(x_i)h^5}{5!} + \dots
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

ดังนั้น  $I_i = F(x_{i+1}) - F(x_{i-1})$  จะกลายเป็น

$$I_i = 2F'(x_i)h + \frac{2F'''(x_i)h^3}{3!} + \frac{2F^{(5)}(x_i)h^5}{5!} + \dots \tag{3.36}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned}
 F'(x) &= f(x) \\
 F''(x) &= f'(x) \\
 F'''(x) &= f''(x)
 \end{aligned}$$

$$F^{(4)}(x) = f'''(x)$$

.

.

.

ฉะนั้น สมการ (3.36) จะกลายเป็น

$$I_i = 2f(x_i)h + \frac{2f''(x_i)h^3}{3!} + \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{5!} + \dots \quad (3.37)$$

เมื่อแทน  $A_i$  และ  $I_i$  ลงยังสมการ

$$E_i = A_i - I_i$$

จะได้

$$\begin{aligned} E_i &= \left[ 2f(x_i)h + \frac{2f''(x_i)h^3}{3!} + \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{3 \cdot 4!} + \dots \right] \\ &\quad - \left[ 2f(x_i)h + \frac{2f''(x_i)h^3}{3!} + \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{5!} + \dots \right] \\ &= \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{3 \cdot 4!} - \frac{2f^{(4)}(x_i)h^5}{5!} + \text{เทอมที่มี } h \text{ กำลังสูงกว่า } 7 \end{aligned}$$

ถ้า  $h$  มีค่าน้อยแล้ว ก็สามารถตัดเทอมที่  $h^7$  และสูงกว่าทิ้งไปได้ ดังนั้น ความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณหาพื้นที่ของรูปเหลี่ยมที่  $i$  คือ

$$E_i \approx f^{(4)}(x_i)h^5 \left| \frac{2}{3 \cdot 4!} - \frac{2}{5!} \right| = \frac{1}{90} f^{(4)}(x_i)h^5$$

$$\text{ถ้าให้ } |f^{(4)}(x_i)| \leq M$$

$$\text{แล้ว } |E_i| \leq \frac{h^5}{90} M$$

ถ้าช่วงการหาพื้นที่เริ่มจาก  $a$  ถึง  $b$  แบ่งช่วง  $(a,b)$  ออกเป็น  $n$  ช่วงย่อยๆ เท่ากันและระยะห่างระหว่าง ordinate เท่ากับ  $h$  แล้ว แสดงว่าได้มีการหาพื้นที่ของฟังก์ชันในช่วง  $(a,b)$  เท่ากับ  $n/2$  ครั้ง

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad |E| &\leq \frac{n}{2} \cdot \frac{h^5}{90} M \\
 &\leq \frac{hnh^4}{2 \times 90} M \\
 &\leq \frac{(b-a)}{180} h^4 M
 \end{aligned}$$

นี่แสดงว่า ความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้กฎของ Simpson เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ  $h^4$

### 3.4.6 รอมเบอร์กอินทิเกรชัน (Romberg integration)

วิธีที่ใช้หาค่าประมาณของอินทิกรัลจำกัดเขตกันอย่างกว้างขวางอีกวิธีหนึ่ง คือ Romberg integration วิธีนี้ประกอบด้วยกระบวนการหาค่าแทรก ที่เริ่มต้นจากกฎของ Trapezoidal นั่นคือ

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{2} \left[ f(a) + f(b) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(x_j) \right]$$

เมื่อ  $h = (b-a)/m$  และ  $x = a + jh$  และเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ความผิดพลาดจากการลดทอน (truncation error) จะลดลงขณะที่ค่าของ  $m$  เพิ่มขึ้น และการเพิ่มของ  $m$  จะมีลักษณะเป็น

$$m = 2^{k-1} \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

เมื่อ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ค่าของ  $h$  ในกระบวนการนี้ต้องลดลงในลักษณะของ

$$h_k = \frac{b-a}{2^{k-1}} \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

เพื่อความสะดวก จะเขียนผลลัพธ์ประมาณของอินทิกรัลเป็น  $R_{k,1}$  ซึ่ง

$$R_{1,1} = \frac{h_1}{2} [f(a) + f(b)]$$

$$R_{2,1} = \frac{h_2}{2} [f(a) + f(b) + 2f(a+h_2)]$$

$$R_{3,1} = \frac{h_3}{2} [f(a) + f(b) + 2\{f(a+h_3) + f(a+2h_3) + f(a+3h_3)\}]$$

โดยทั่วไปแล้ว สามารถเขียนเทอมเหล่านี้ได้ในรูป

$$R_{k,1} = \frac{1}{2} \left[ R_{k-1,1} + h_{k-1} \sum_{i=1}^{2^{k-2}} (f(a) + (i-0.5)h_{k-1}) \right]$$

$$\text{เมื่อ} \quad k = 2, 3, \dots, n$$

ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้เร่งความเร็วของการคำนวณ  $R_{k,1}$  แต่ละตัว แม้ว่าขณะที่  $k$  เพิ่มขึ้น ความเที่ยงตรงของ  $R_{k,1}$  จะเพิ่มขึ้นด้วยก็ตาม แต่ว่าการเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องของอินทิกรัลซ้ำ การเร่งกระบวนการเข้าสู่ให้เร็วยิ่งขึ้น อาจใช้การหาค่าแทรกของ Richardson

$$R_{ij} = \frac{2^{2(i-1)} R_{i,j-1} - R_{i-1,j-1}}{2^{2(i-1)} - 1}$$

สำหรับ  $i = 2, 3, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, i$

ดังนั้น ผลลัพธ์ประมาณของวิธี Romberg โดยทั่วไปเขียนอยู่ในรูปของสามเหลี่ยมต่อไปนี้

$$\begin{array}{ccccccc} R_{1,1} & & & & & & \\ R_{2,1} & R_{2,2} & & & & & \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} & & & & \\ R_{4,1} & R_{4,2} & R_{4,3} & R_{4,4} & & & \\ \cdot & & & & & & \\ \cdot & & & & & & \\ \cdot & & & & & & \\ R_{n,1} & R_{n,2} & \dots & \dots & \dots & \dots & R_{n,n} \end{array}$$

โดยเป็นการแสดงว่าเทอมแนวเส้นทแยงมุมเข้าสู่ค่าของอินทิกรัลได้รวดเร็วกว่าเทอม  $R_{n,1}$  ปกติแล้วในการหาค่าประมาณตามวิธีของ Romberg มักจะดำเนินการกระทำซ้ำจนตารางไปจนได้ค่าในแต่ละแถว ซึ่งเกิดผลต่างระหว่าง  $R_{n,n}$  กับ  $R_{n-1,n-1}$  น้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ตั้งไว้

### 3.4.7 สูตรของ Newton-Cotes

สูตรที่เป็นโพลิโนเมียลอันดับหนึ่งหรือสองที่เคยเห็นมา อาจขยายให้เป็นโพลิโนเมียลอันดับสูงกว่า (higher-order) ผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปทั่วไป คือ

$$\int_a^b f(x) dx = C_0 h \sum_{i=0}^n W_i f_i + C_1 h^{k+1} f^{(k)}(x^*)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนของแถบย่อย,  $k$  เป็นอันดับของโพลิโนเมียลที่ใช้,  $x^*$  เป็นจุดบางจุดอยู่ภายในช่วง  $[a, b]$ ,  $f^{(k)}(x^*)$  เป็นอนุพันธ์อันดับที่  $k$  ของฟังก์ชัน  $f(x)$  ซึ่งหาค่าที่  $x^*$  และ  $h$  เป็นความกว้างของช่วงข้อมูล สัมประสิทธิ์  $C_0, C_1$  และ  $W_i$  ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ในแต่ละแถวของตาราง 3.3 แทนไซเคิลของแถบ (strip)  $k$  รวมทั้งจุด pivotal  $(k+1)$  จุด เพื่อให้ได้โพลิโนเมียลอันดับที่  $k$  ถ้าการใช้ข้อมูลนี้กับปัญหาที่มีไซเคิล (cycle) มากกว่าหนึ่ง (เช่น  $k=2$  และ  $n=6$ ) แล้ว สัมประสิทธิ์ที่ได้จะเกิดจากการนำค่าปลายมาบวกกัน ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะซ้อนกัน (overlap) ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์สำหรับสูตรของ Newton - Cotes

$k$	$C_0$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$	$C_1$
1	$\frac{1}{2}$	1	1								$\frac{1}{12}$
2	$\frac{1}{3}$	1	4	1							$\frac{1}{90}$
3	$\frac{3}{8}$	1	3	3	1						$-\frac{3}{80}$
4	$\frac{2}{45}$	7	32	12	32	7					$-\frac{8}{945}$
5	$\frac{5}{288}$	19	75	50	50	75	19				$-\frac{275}{12096}$
6	$\frac{1}{140}$	41	216	27	272	27	216	41			$-\frac{9}{1400}$
7	$\frac{7}{17280}$	751	3577	1323	2989	2989	1323	3577	751		$-\frac{8183}{518400}$
8	$\frac{4}{14175}$	989	5888	-928	10946	-4540	10946	-928	5888	989	$-\frac{2368}{467775}$

ตารางที่ 3.4 ลำดับการพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักที่มีการซ้อนกัน

	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
	1	4	1				
			1	4	1		
					1	4	1
sum	1	4	2	4	2	4	2

ดังนั้น จะได้

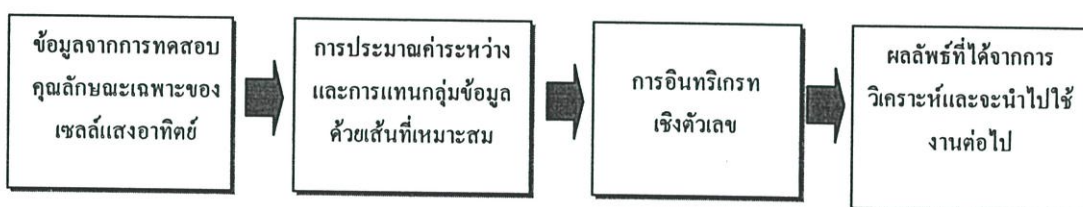
$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + 4y_5 + y_6] + C_1 h^3 f^{(2)}(x^*)$$

ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้เคยเสนอไว้ สำหรับเทอมสุดท้ายในสูตรของ Newton-Cotes คือ  $C_1 h^{k+1} f^{(k)}(x^*)$

เป็นเทอมที่บอกขนาดของความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่า และจะเห็นได้ชัดเจนว่า ขณะที่  $h$  มีค่าน้อยลงแล้ว  $h^{k+1}$  จะยิ่งน้อยมากขึ้น แต่ยังคงค้ำึงถึง เนื่องจากความผิดพลาดนั้น ย่อมขึ้นอยู่กับ  $f^{(k)}(x^*)$  ด้วยเหมือนกันเพราะมีบางฟังก์ชันที่อนุพันธ์อันดับสูงของมันมีค่าสูงมาก ฉะนั้น ฟังก์ชันเหล่านี้ความผิดพลาดอาจจะไม่ลดลง เมื่อเพิ่มค่าของ  $k$

### 3.5 บทสรุป

การนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 3.7 อัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

โดยการนำรูปแบบ และวิธีการของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขข้างต้นไปใช้งาน สำหรับจำลองการทำงาน และการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในหัวข้อต่างๆ เช่น

- นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านการจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เมื่อมีรูปแบบการติดตั้ง และมุมเอียงในการติดตั้งที่มีลักษณะต่างกัน
- วิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนจุดกำลังสูงสุดและการดึงพลังงานสูงสุดของระบบฯ เมื่อมีการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบอนุกรม และขนาน
- ช่วยในการออกแบบหาปริมาณการจ่ายกระแสของระบบฯ สำหรับโหลดที่มีการใช้งานต่อเนื่อง
- การพิจารณาปริมาณกระแสขณะดำเนินการ อัคประจุ และปล่อยประจุของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า

เป็นต้น

## บทที่ 4

# ระเบียบวิธีการวิจัย

### 4.1 กล่าวนำ

ในโครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการพัฒนารูปแบบ และนำเสนอเนื้อหาวิธีการวิเคราะห์ในอีกรูปแบบหนึ่งตามรายงานการวิจัย ที่จะเป็นการพัฒนาในส่วนของการพิจารณาด้านพลังงาน และการออกแบบระบบเพื่อให้การใช้งานของระบบมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด อันเนื่องมาจากในการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีการออกแบบระบบพลังงานสำรองที่ไม่เหมาะสมก็มักจะมีปัญหาในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์และสมรรถนะของระบบเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งขนาดของระบบจะต้องใหญ่จนเกินความจำเป็นเพื่อที่จะให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานได้

### 4.2 การวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วยกราฟคุณลักษณะ

การออกแบบของระบบสุริยะ โดยมีพื้นฐานจากการทำดุลพลังงานระหว่างระบบย่อยทั้งหลายที่รวมเป็นระบบที่กำลังศึกษาอยู่ การวิเคราะห์ที่ได้ทำไปจัดว่าเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินระบบในขั้นต้น และสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ง่าย ๆ มาช่วยทำงาน อย่างไรก็ตามการทำเช่นนั้นก็มีข้อจำกัด เพราะที่ใช้สมมุติฐานว่าตัวเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่พอเหมาะกับค่าเฉลี่ยของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละวัน และเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ตลอดทั้งคืน ถ้าหากเราต้องการวิเคราะห์ระบบที่มีความจุการสะสมพลังไฟต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเก็บสะสมใน 1 วัน หรือถ้าเราต้องการทราบว่ามิอะะไรเกิดขึ้นบ้างภายใน 1 วัน ในแง่ของการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างระบบย่อยต่าง ๆ เหล่านี้วิธีการทำดุลพลังงานจะใช้ไม่ได้ผล

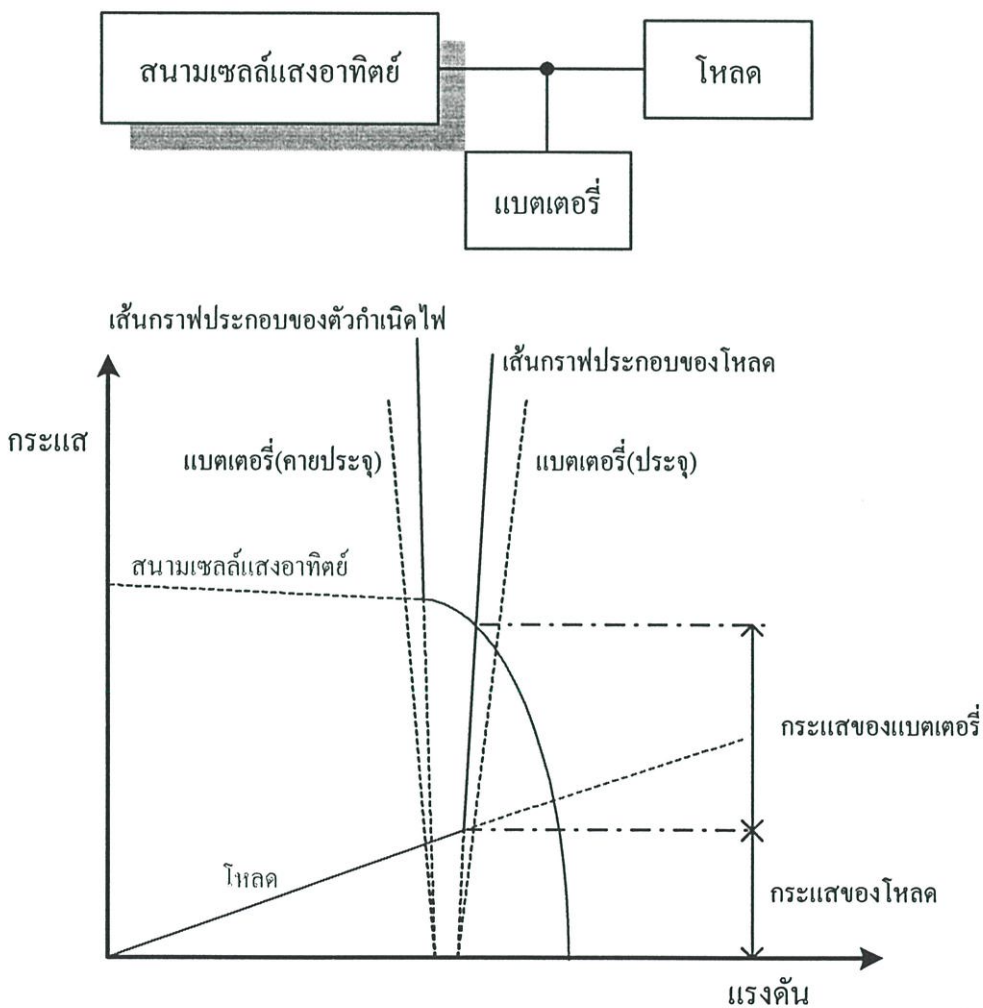
นอกจากนี้ยังมีกรณีอื่น ๆ อีกที่น่าสนใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันระหว่างระบบย่อย เช่น กรณีที่จำเป็นต้องพิจารณาถึงแรงดันในการทำงานของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ และความคู่ควรกันของเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

#### 4.2.1 ความคู่ควรกันระหว่างสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

พิจารณารูปแบบระบบอย่างง่ายอย่างในรูป 4.1 แบตเตอรี่ต่อขนานอยู่กับโหลดและสนามเซลล์แสงอาทิตย์ โดโอดที่ต่ออนุกรมกับสนามเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สำหรับกั้นมิให้กระแสไฟจากแบตเตอรี่ไหลย้อนกลับเข้ามายังเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะที่แรงดันสูงสุดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าของแบตเตอรี่ (เช่น ในช่วงกลางคืน) การทำงานของระบบขึ้นกับภาวะความสมดุลของกระแสที่จุดต่อร่วมของระบบ โดยแรงดันจะอยู่ได้อธิติพลของแบตเตอรี่

$$I_{PV} = I_{Battery} + I_{Load} \quad (4.1)$$

กระแสแบตเตอรี่คิดเป็นบวกถ้ามันไหลเข้าแบตเตอรี่ และเป็นลบเมื่อไหลออกจากแบตเตอรี่ ในทางปฏิบัติอาจนับว่าแบตเตอรี่คล้ายกับเป็นโหลดตัวหนึ่งที่ต่อขนานกับโหลดจริง ๆ ถ้ามันกำลังอยู่ในสถานะการประจุ บางครั้งอาจพิจารณาว่าเป็นตัวกำเนิดไฟ ถ้ามันกำลังคายประจุให้โหลดอยู่



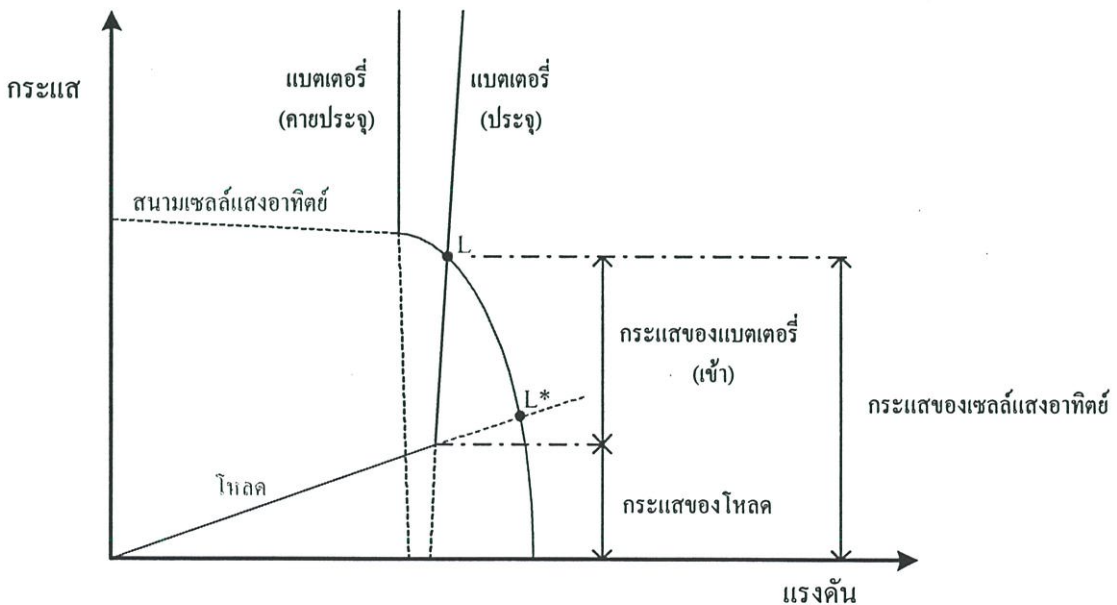
รูปที่ 4.1 การใช้กราฟวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่

เนื่องจากสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่อาจเป็นไปได้ทั้งสองแบบ จึงสมควรที่จะรวมเส้นกราฟ I-V ของตัวกำเนิดไฟและโหลดทั้งหลาย แล้วใช้เส้นกราฟ I-V ของแบตเตอรี่ทั้งตอนกำลังประจุและคายประจุ การสร้างกราฟดังกล่าวแสดงในรูป 4.1 ลักษณะเฉพาะประกอบของ

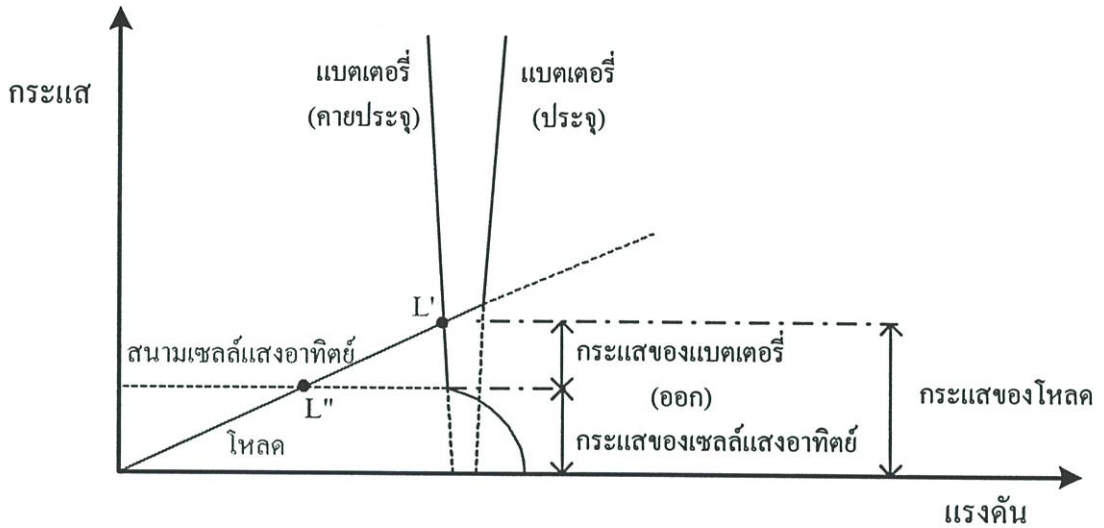
โหลดหาได้จากการรวมกระแสโหลด  $I_L$  และกระแสจากการประจุแบตเตอรี่  $I_B$  (คิดในแต่ละค่าแรงดัน) ผลของการพล็อตขึ้นกับความต้องการของโหลดขณะแรงดันต่ำกว่าแรงดันวงจรเปิดของแบตเตอรี่ ส่วนที่แรงดันสูงกว่ามันจะขึ้นกับเส้นกราฟ I-V ของแบตเตอรี่ ในทำนองเดียวกันเราอาจพล็อตเส้นกราฟ I-V ประกอบของตัวกำเนิดไฟ โดยการรวมกระแสของสนามเซลล์แสงอาทิตย์  $I_{PV}$  กับกระแสจากการคายประจุของแบตเตอรี่ (คิดในแต่ละค่าแรงดัน)

จุดตัดที่เกิดจากกราฟของตัวกำเนิดตัดกับกราฟของโหลด เรียกว่า “จุดทำงาน” ของระบบ สำหรับแต่ละภาวะของรังสีแสงอาทิตย์ และสถานะของการประจุแบตเตอรี่ ในรูป 4.1 แสดงถึงกรณีที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟมีกำลังสูงเกินกว่าความต้องการของโหลด และกำลังไฟส่วนเกินจะสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ในรูป 4.3 กำลังไฟที่โหลดต้องการใช้สูงเกินกว่าที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายไฟชดเชยให้โหลดแทน

แรงดันคล่อมโหลดก่อนข้างจะคงตัวจุด  $L$  ในรูป 4.2 และจุด  $L$  ในรูป 4.3 ถ้าปราศจากแบตเตอรี่แรงดันโหลดจะแปรจากจุด  $L^*$  (รูป 4.2) ไปยังจุด  $L^*$  (รูป 4.3) ดังนั้นแบตเตอรี่ในระบบพอจะยอมรับแรงดันของโหลดที่ยังคงค่าอยู่ในช่วงขีดจำกัดการแปรปรวนของแรงดันแบตเตอรี่ ยิ่งกว่านี้ถ้าหากเลือกขนาดแบตเตอรี่ได้พอเหมาะก็จะทำให้การใช้ประโยชน์จากกำลังไฟที่สนามเซลล์ผลิตได้สมบูรณ์ขึ้นไม่ว่าจะเป็นตอนกลางคืน หรือในวันที่มีเมฆมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการออกแบบขนาดของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.2 ระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ การสร้างกราฟเพื่อหาจุดทำงานขณะที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่ และจ่ายให้โหลดในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 4.3 จุดทำงานของระบบที่ประกอบด้วยสนามเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ขณะที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ

เมื่อพิจารณาการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยการวิเคราะห์ห้วงจรง่าย ๆ ที่มีแบตเตอรี่ชนิดอุดมคติคือเส้นกราฟ I-V อยู่ในแนวตั้ง (แรงดันไม่ตกเมื่ออยู่ในสถานะประจุหรือคายประจุ) สมมุติว่ามีโหลดคงตัว  $14 \Omega$  สนามเซลล์ประกอบด้วยแผงเซลล์ 4 แผงขนานกัน แบตเตอรี่มีแรงดัน 16 V ดังนั้นจุดทำงานไม่ว่าจะมีความรับอาบรังสีเท่าใดจะอยู่ใกล้ ๆ กับโลกัสของจุดกำลังสูงสุด จากสมมุติฐานว่าอุณหภูมิของเซลล์คงตัวเราจะได้เส้นกราฟ I-V ชั่วโมงต่อชั่วโมง และได้แผนภาพรายชั่วโมงของกระแสโหลดและแบตเตอรี่ โดยหากจากกราฟในรูป 4.4 แผนภาพเหล่านี้แสดงในรูป 4.5 จะเห็นได้ว่ากระแสที่สนามเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้สูงเกินกว่าที่โหลดต้องการระหว่างเวลา 6.40 น. และ 17.00 น. ในช่วงเวลานั้นกระแสแบตเตอรี่เป็นบวก (ประจุ) นอกเวลานั้นกระแสแบตเตอรี่เป็นลบ (คายประจุ) จนกระทั่งดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้ากระแสจะคงอยู่ที่ค่าสูงสุดตามที่โหลดต้องการ

เราจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่า

- 1) แบตเตอรี่สามารถจ่ายไฟให้โหลดได้ตลอดคืน
- 2) ช่วงกลางวันสนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเก็บไว้ในแบตเตอรี่ได้เพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดในช่วงคืนนับรวมการสูญเสียด้วย

เงื่อนไข ข้อ 1) เป็นการแสดงขนาดของแบตเตอรี่เพราะว่ามันจะต้องมีความจุไฟอย่างน้อยเท่ากับผลคูณของกระแสโหลดกับเวลาในช่วงกลางคืน (เป็นชั่วโมง) ในทางปฏิบัติความยาวในช่วงเวลากลางคืนเปลี่ยนแปลงตลอดปี ให้ใช้ช่วงกลางคืนที่ยาวที่สุด (เพื่อให้หมดปัญหากรณี

เลวร้ายที่สุด) เมื่อเลือกขนาดความจุแบตเตอรี่ได้ แล้วต่อไปจะต้องออกแบบขนาดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้รับพลังงานเพียงพอในตอนกลางวันเข้าประจุแบตเตอรี่ สำหรับการวิเคราะห์ในวันที่แสดงในรูป 4.4 จะมีสนามเซลล์เพียงขนาดเดียวเท่านั้นที่ยอมรับให้พื้นที่ของการพล็อตกระแสบวกของแบตเตอรี่เท่ากับกระแสลบพอดี แต่ความรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ไม่คงตัวตลอดปี ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณถูกต้องจะต้องทำตลอดทั้งปีแล้วจึงเลือกขนาดของสนามเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่จากการประเมินนั้น

การใช้แบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้การทำงานของสนามเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับพฤติกรรมของส่วนประกอบ (โหลด + แบตเตอรี่) ระหว่างโหลดกับเส้นกราฟ I-V ซึ่งอาจเลือกให้ใกล้กับจุดโลกัสของจุดกำลังสูงสุด ตำแหน่งของลักษณะเฉพาะของโหลดบนเส้น I-V ของสนามเซลล์จะขึ้นกับแรงดันแบตเตอรี่เป็นสำคัญ สารสำคัญคือจะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบตเตอรี่ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะการประจุของมัน และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่พอเหมาะของสนามเซลล์แสงอาทิตย์ขณะอุณหภูมิเซลล์สูงสุด และความรับอาบรังสีสูงสุด

#### 4.2.2 ระบบซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี

เมื่อมีตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซีแทรกระหว่างสนามเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ และถ้าใช้วงจรควบคุมแบบลอจิกที่เหมาะสมจะทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันเข้าและออกเปลี่ยนไปในลักษณะที่ยังคงรักษาการทำงานของสนามเซลล์ให้อยู่ที่กำลังสูงสุดเสมอ แสดงการทำงานของตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี ซึ่งตอนนี้จะเขียนเป็น

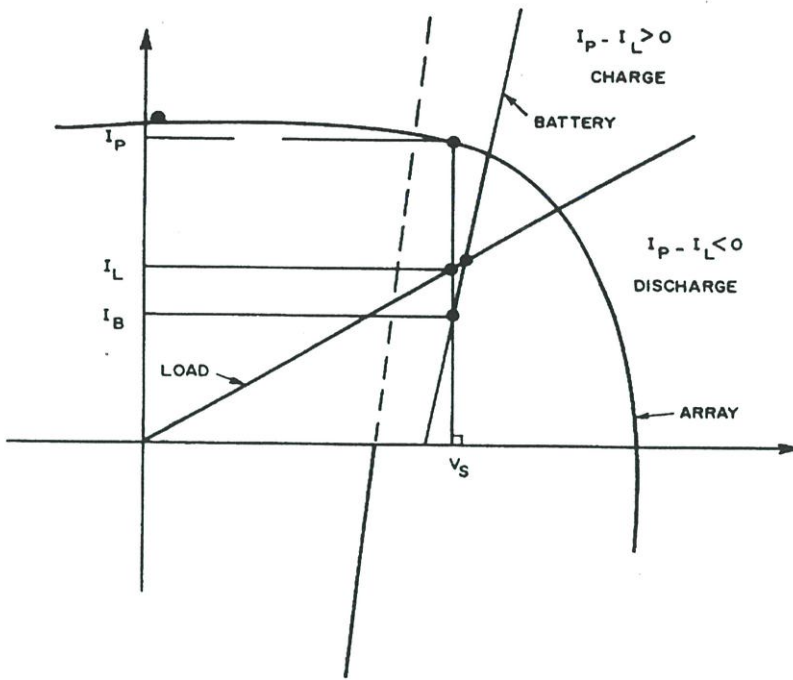
$$I_O = P_{P.V.} n_C(p) / V_B \quad (4.2)$$

ซึ่ง  $V_B$  เป็นแรงดันแบตเตอรี่และเป็นฟังก์ชันของสถานะการประจุ  $Q/Q_{max}$  และกระแส  $I_B$

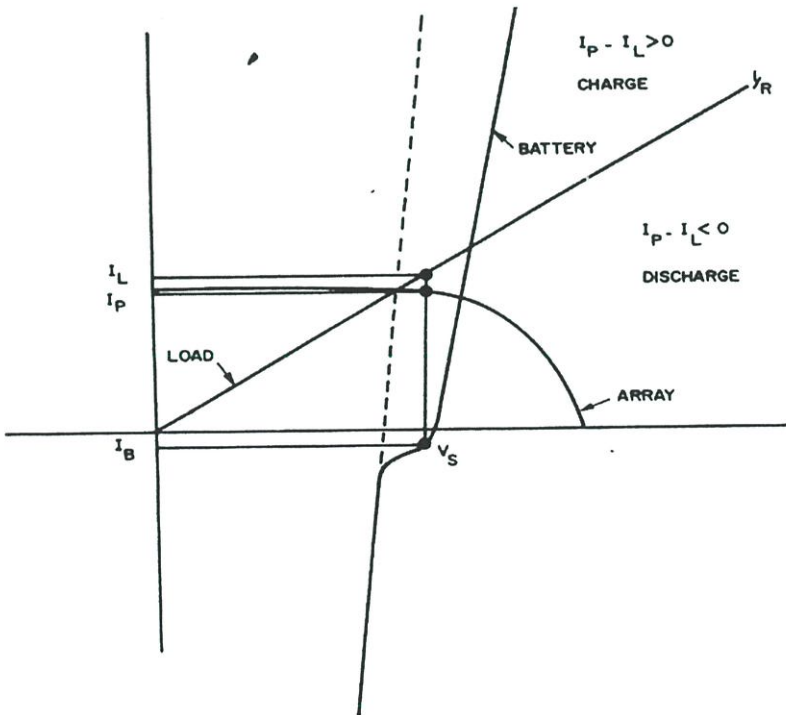
$$V_B = f\left(\frac{Q}{Q_{max}}, I_B\right) \quad (4.3)$$

และในโหลดมีกระแสไหล  $I_L$

$$I_L = \frac{V_B}{R} \quad (4.4)$$



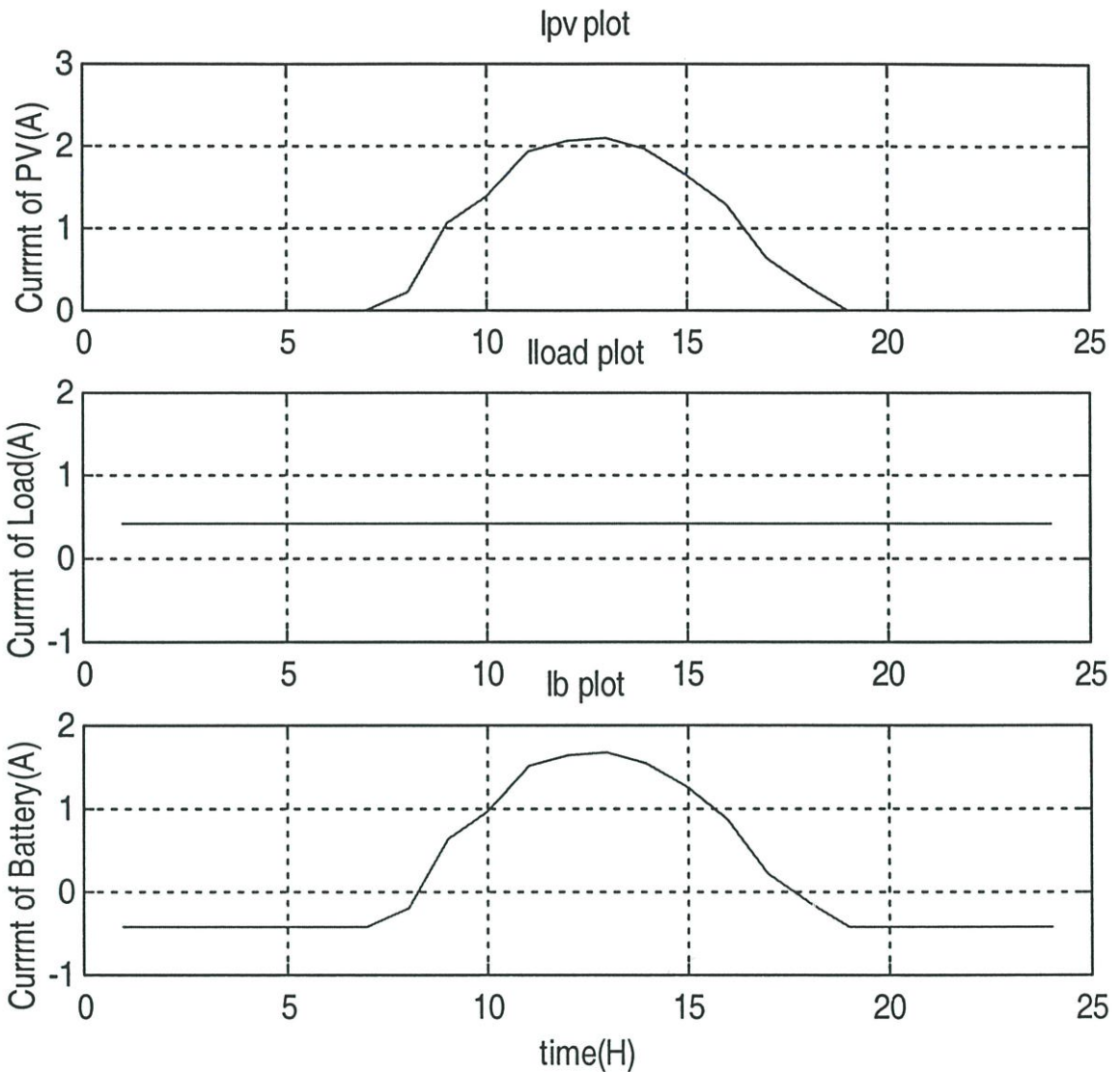
(ก)



(ข)

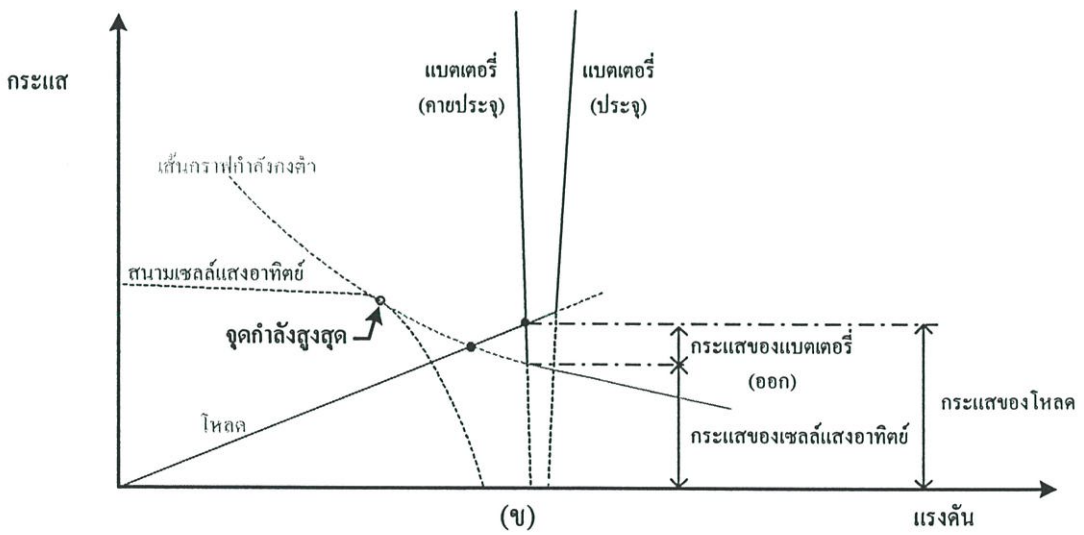
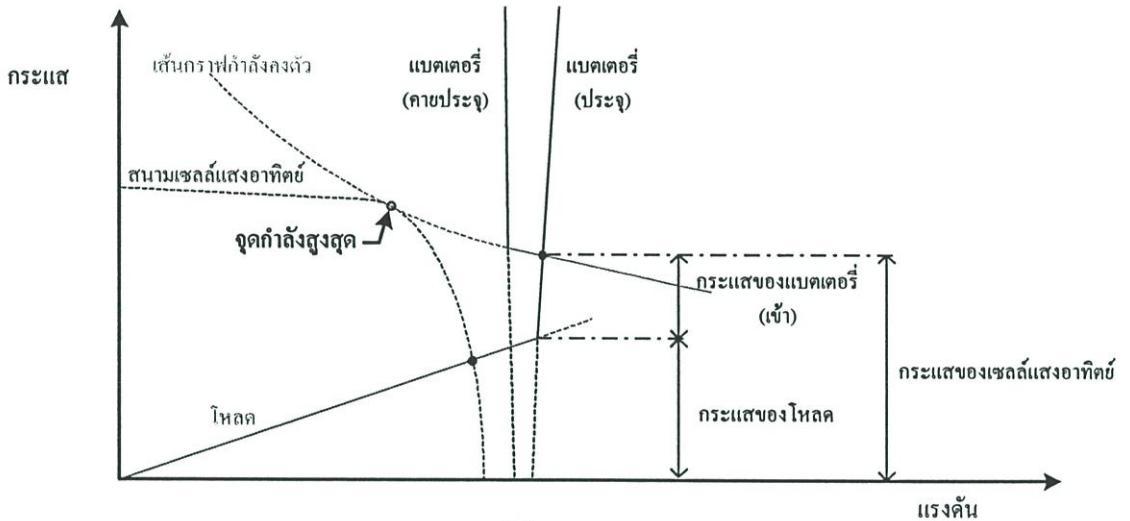
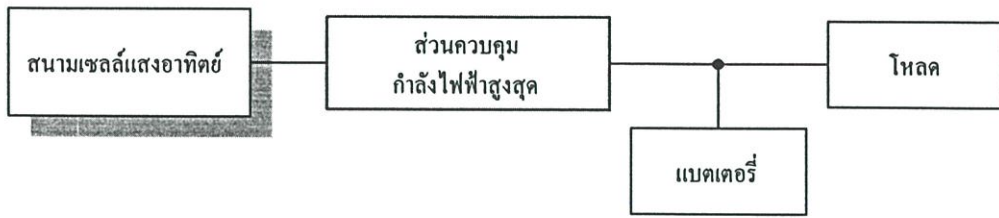
รูปที่ 4.4 การหาจุดทำงานของระบบที่มีแบตเตอรี่อุดมคติ

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สวมเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สวมเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด



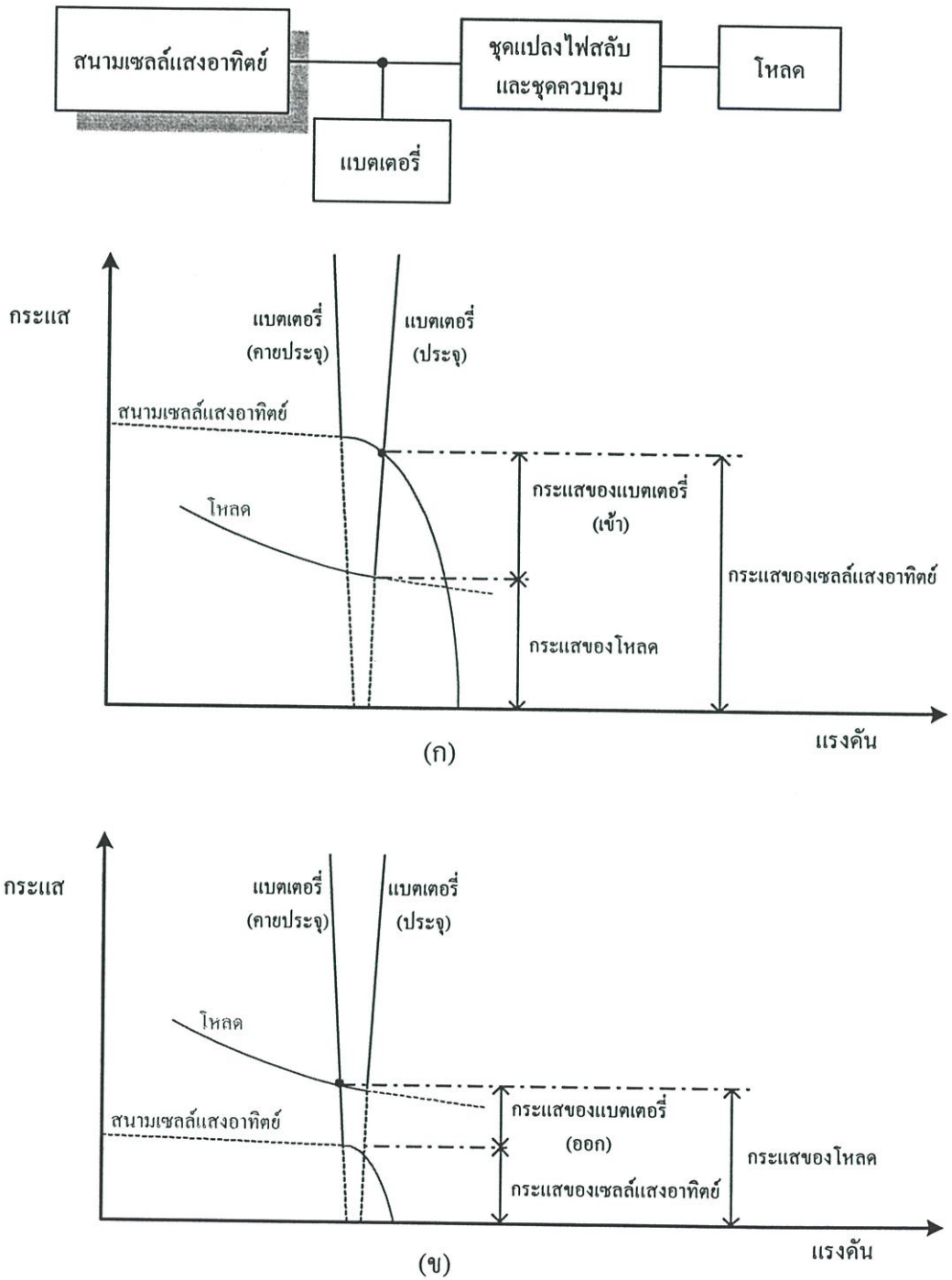
รูปที่ 4.5 แผนภาพรายชั่วโมงของกระแสโหลด และแบตเตอรี่ตลอด 24 ชั่วโมง

เงื่อนไขการสมดุลระหว่างกระแสที่จุดต่อร่วมของระบบ เขียนไว้ในรูป 4.6 ส่วนขั้นตอนอื่น ๆ จะคล้ายกับที่ได้บรรยายไว้ในตอนที่แล้ว ในกรณีนี้กราฟที่ประกอบกันของตัวกำเนิดไฟได้มาจากการรวมกระแสของแบตเตอรี่ (การคายประจุ) และกระแสออกของตัวเปลี่ยนไฟดิซี-ดิซี ที่แต่ละแรงดัน เช่น กราฟไฮเปอร์โบล่าในระนาบ I-V ลักษณะเฉพาะประกอบของโหลดคล้ายกับที่แสดงในตอนก่อน จุดตัดระหว่างเส้นกราฟทั้งสองแสดงจุดการทำงานที่แท้จริง



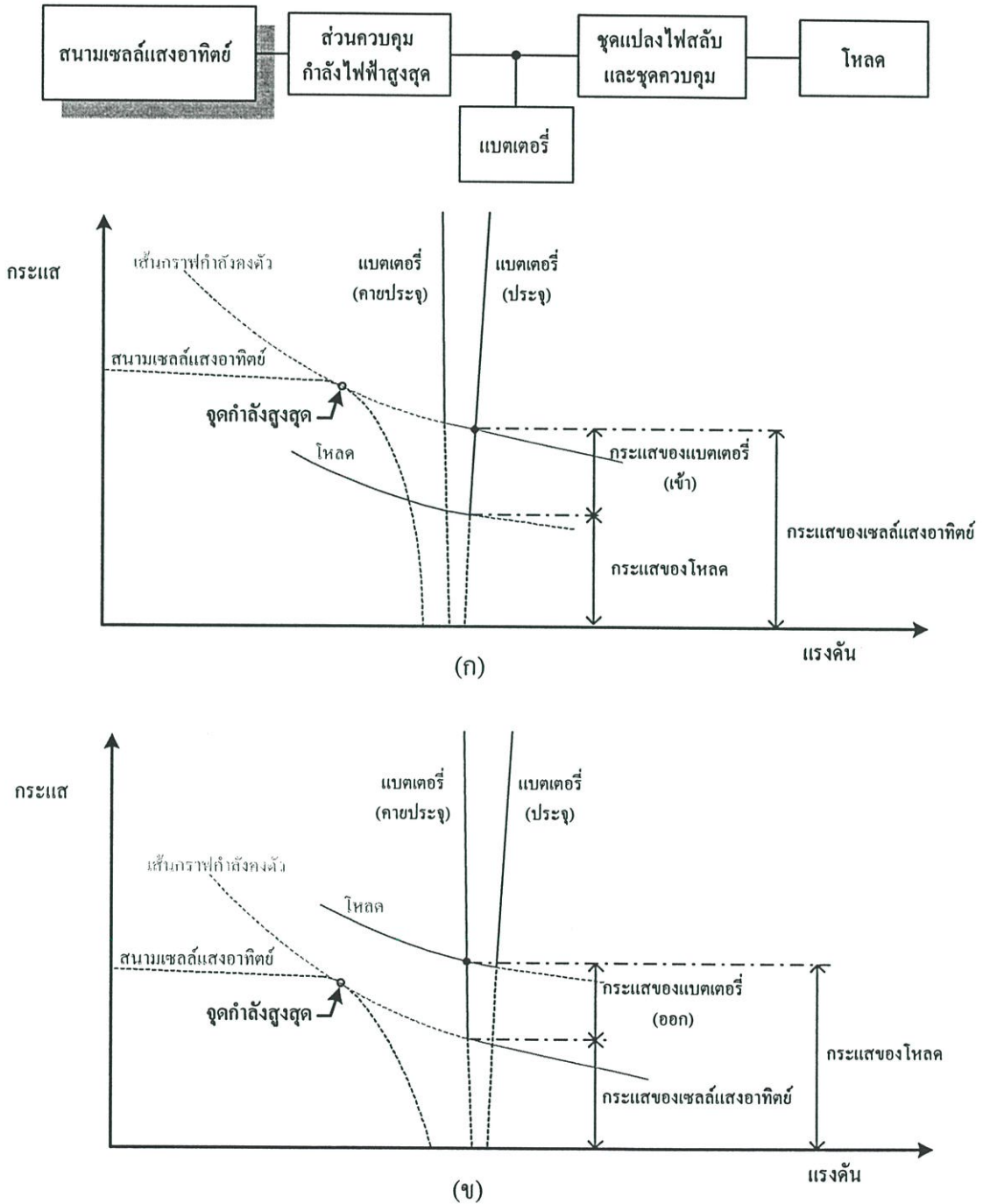
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ระบบที่ประกอบด้วยตัวติดตามควบคุมการทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (maximum power tracker)

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ในระบบที่มีตัวคุมค่าแรงดันออก

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สนามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ในระบบที่มีแบตเตอรี่ ตัวติดตามควบคุมจุดกำลังสูงสุด และตัวคุมค่าแรงดันออก

- ก) รังสีแสงอาทิตย์สูง สนามเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟเข้าประจุแบตเตอรี่และโหลด
- ข) รังสีแสงอาทิตย์ต่ำ สนามเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลด แบตเตอรี่ต้องคายประจุให้โหลด

### 4.2.3 ระบบประกอบด้วยตัวคุมค่าแรงดันบนโหลด

ถ้าโหลดมีตัวคุมค่าแรงดันเพื่อรักษาระดับแรงดันคงตัวตลอดเวลา หรือถ้ามีตัวเปลี่ยนไฟสลับคั่นอยู่ระหว่างเบตเตอร์และโหลดซึ่งมีการคุมค่าแรงดันออกของโหลด การพิจารณาโหลดจะคิดจากกำลังไฟที่โหลดได้ใช้ไปเท่านั้น ส่วนตัวคุมค่าแรงดันแสดงด้วยประสิทธิภาพ  $\eta_{VR}$  ในการทำงานของมันประสิทธิภาพจะเป็นฟังก์ชันของกำลังส่งผ่าน และในเส้นกราฟนี้เรายังสามารถพิจารณาประสิทธิภาพของตัวทำไฟสลับได้อีกด้วย (ถ้ามีตัวทำไฟสลับอยู่)

รูปแบบระบบที่เป็นไปได้สองแบบแสดงในรูป 4.7 และ 4.8 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันกับตอนก่อน ๆ เพียงแต่มีความแตกต่างกันในเส้นกราฟของโหลดที่ประกอบกัน ซึ่งขณะนี้ให้คิดเป็นกำลังคงตัว  $P_L$  ที่โหลดต้องการ ดังความสัมพันธ์

$$I_L = P_L / n_{VR}(P_L) / V_B \quad (4.5)$$

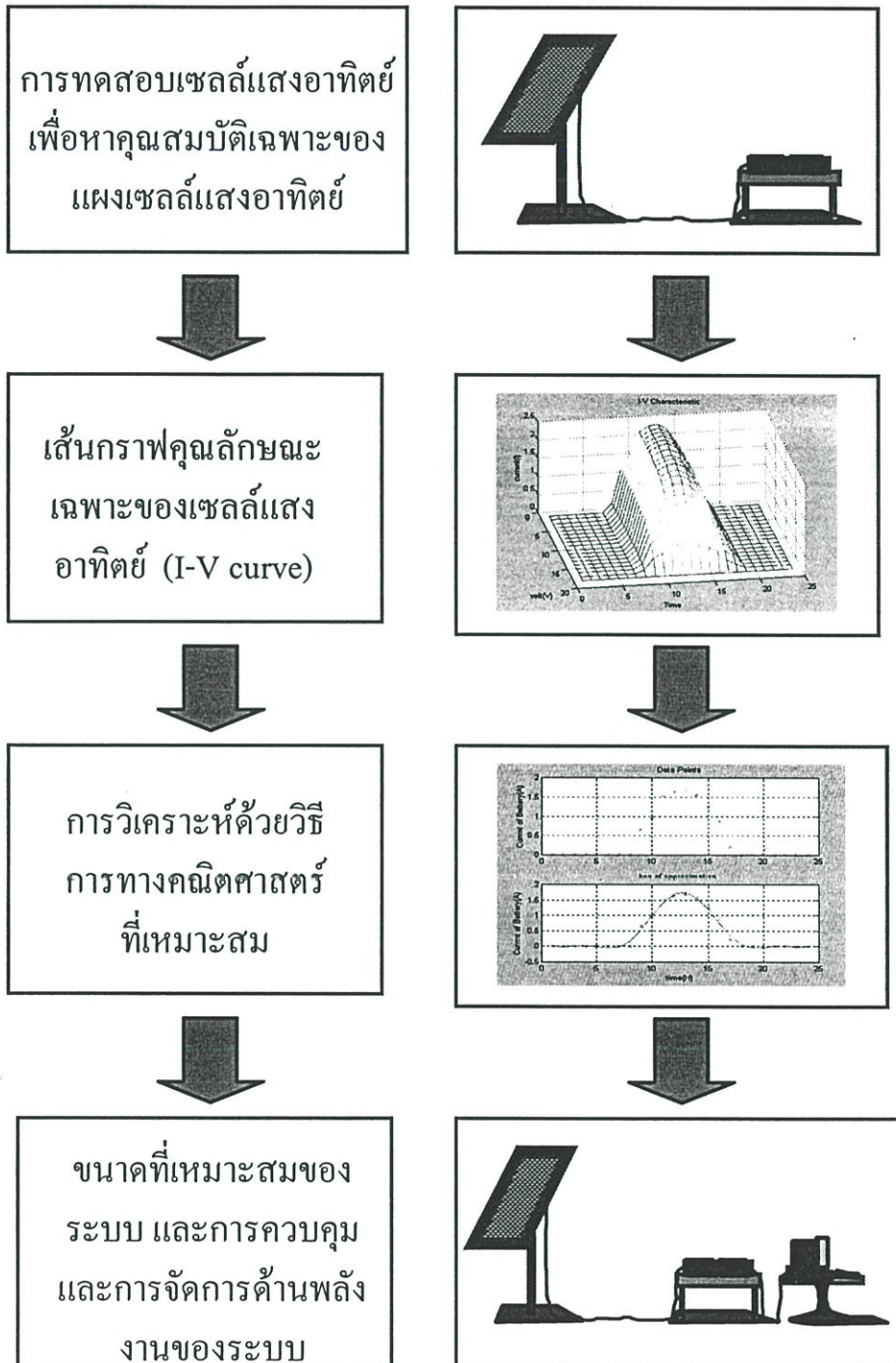
ซึ่งต้องรวม  $I_L$  เข้ากับกระแสเบตเตอร์  $I_B$  จุดตัดของเส้นกราฟประกอบของโหลดกับเส้นกราฟของตัวกำเนิดให้จุดทำงานดังเช่นเคย การสร้างกราฟแสดงในรูป 4.7 สำหรับระบบที่ปราศจากตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี และรูป 4.8 สำหรับระบบที่มีตัวเปลี่ยนไฟดีซี-ดีซี

## 4.3 การสร้าง และทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

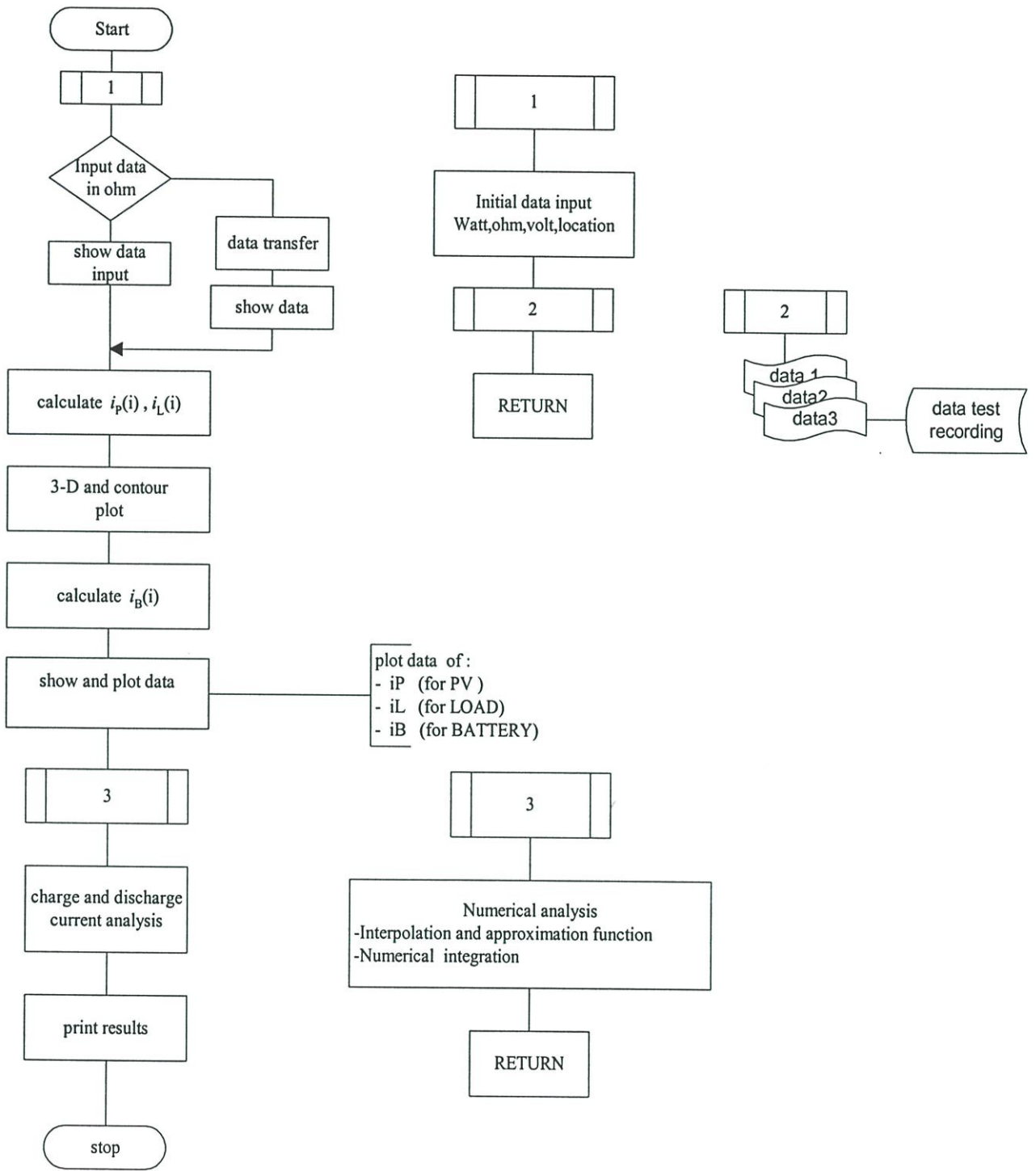
### 4.3.1 การทำงานของโปรแกรม

การคิดคำนวณของโปรแกรมจะอาศัยระบบฐานข้อมูลของ กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า จากการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เก็บบันทึกไว้มาทำการวิเคราะห์ และคำนวณค่า โดยแสดงขั้นตอนการดำเนินการในแต่ละส่วนไว้ในรูปที่ 4.9 [21] และสามารถแสดงลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 4.10 สำหรับกรณีที่เป็นการทำงานจำลองระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยพิจารณาผลของโหลดการะร่วมด้วยนั้น[22] เมื่อเริ่มทำงานโปรแกรมจะให้ผู้ใส่ป้อนค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจำลองการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ อันได้แก่ ขนาดพิกัดของโหลดการะ และ ระดับแรงดันใช้งาน เป็นต้น

ส่วนกรณีที่เป็นการทำงานจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ไม่มีการพิจารณาผลของโหลดการะผู้ใส่จะป้อนค่าเฉพาะ ระดับแรงดันใช้งานของระบบเท่านั้น

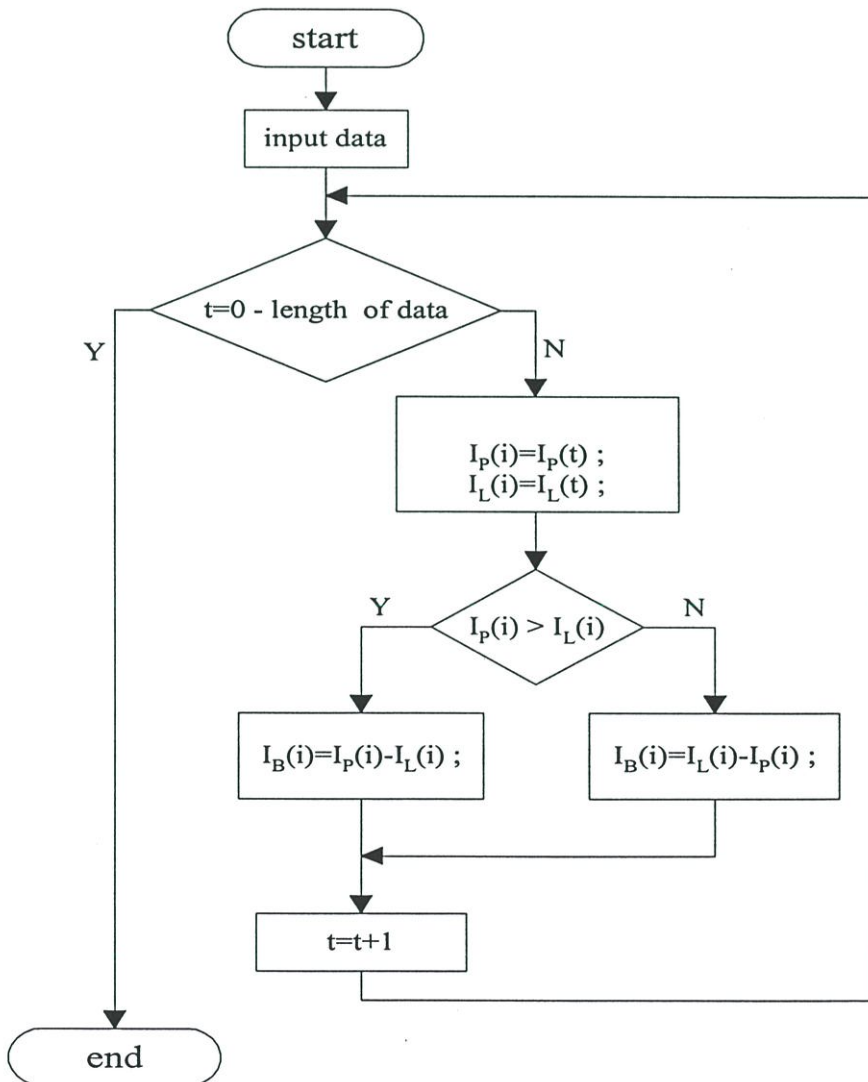


รูปที่ 4.9 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละส่วนสำหรับวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามวิธีการที่นำเสนอ

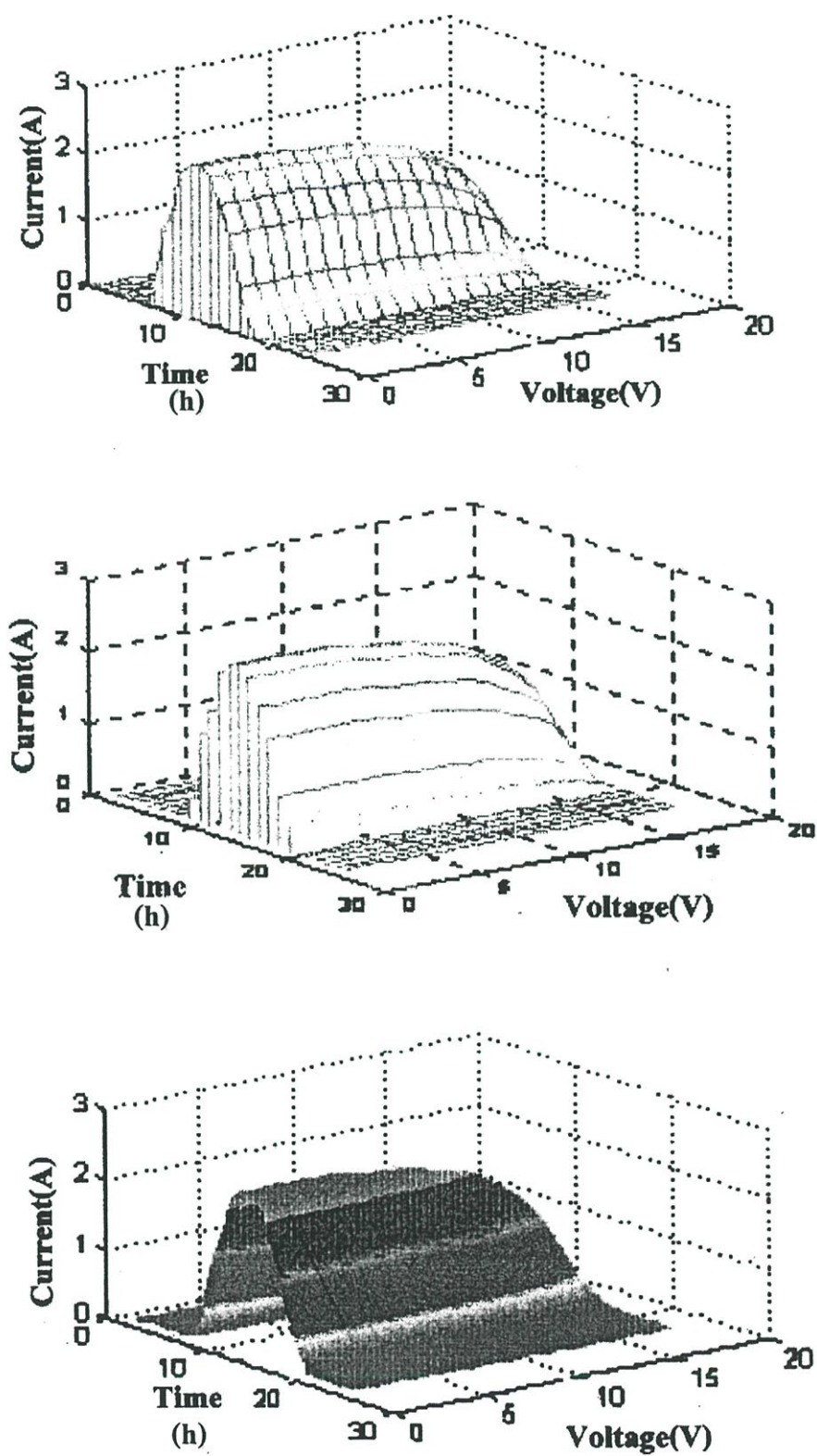


รูปที่ 4.10 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

เมื่อรับเป็นค่าอินพุตสำหรับคำนวณการจำลองระบบเข้ามาแล้ว โปรแกรมจะทำการอ่านค่าอินพุตดังกล่าว พร้อมทำการปรับเปลี่ยนค่า และจัดรูปแบบที่เหมาะสมให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่อไปได้ จากนั้นเมื่อมีการจัดรูปแบบและปรับเปลี่ยนค่าแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{PV(i)}$ ) และกระแสไฟฟ้าของโหลดภาระ ( $I_{L(i)}$ ) ที่แต่ละค่าในแต่ละช่วงเวลา  $\Delta t$  ที่จุดแรงดันใช้งานของระบบ โดยจะทำการวนรอบการทำงานตามจำนวนข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกค่าไว้จนครบทุกช่วงเวลา(ดูการทำงานได้จากรูปที่ 4.11) จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงค่าข้อมูลที่ได้รับมา[23] ซึ่งได้มาจากการทดสอบและเก็บข้อมูลไว้แสดงออกทางจอภาพในลักษณะของรูปพื้นผิวร่างแหแบบ 3 มิติ (3-D mesh plot) และพล็อตเป็นเส้นโครงร่าง(contour) ออกมา ดังรูปที่ 4.12



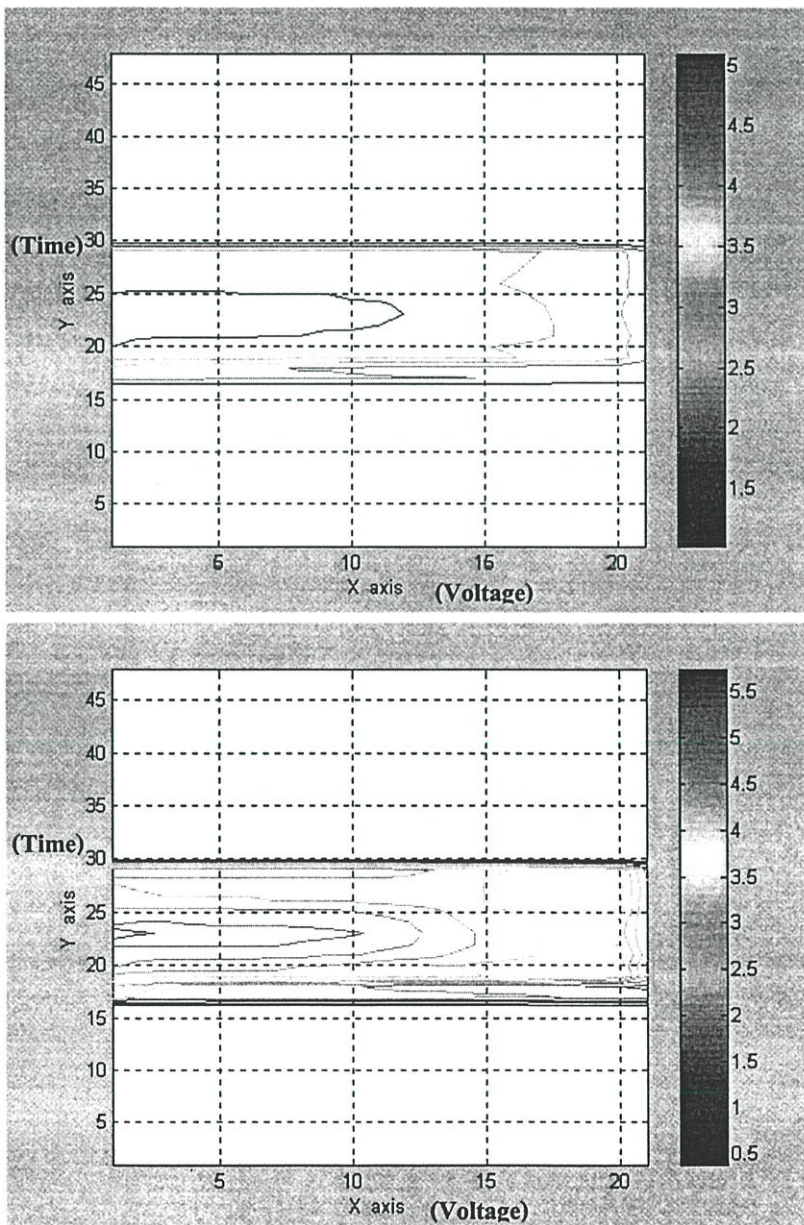
รูปที่ 4.11 ลำดับขั้นตอนการคำนวณค่ากระแสที่แต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.12 ผลการแสดงผลในลักษณะรูปพื้นผิวโครงร่าง 3 มิติ ในลักษณะต่างๆจากข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะเปลี่ยนมุมมองในการมองภาพ และแสดงภาพไปที่ค่าต่าง ๆ ได้ด้วยการกำหนดมุมกวาด (Azimuth) สำหรับมุมมองทวนเข็ม (+) หรือตามเข็ม(-) นาฬิกา และกำหนดเป็นมุมยก (Elevation) สำหรับการยกภาพขึ้น (+) และกดภาพลง(-) สำหรับกรณีของการplotแบบพื้นผิวร่างแห (mesh)

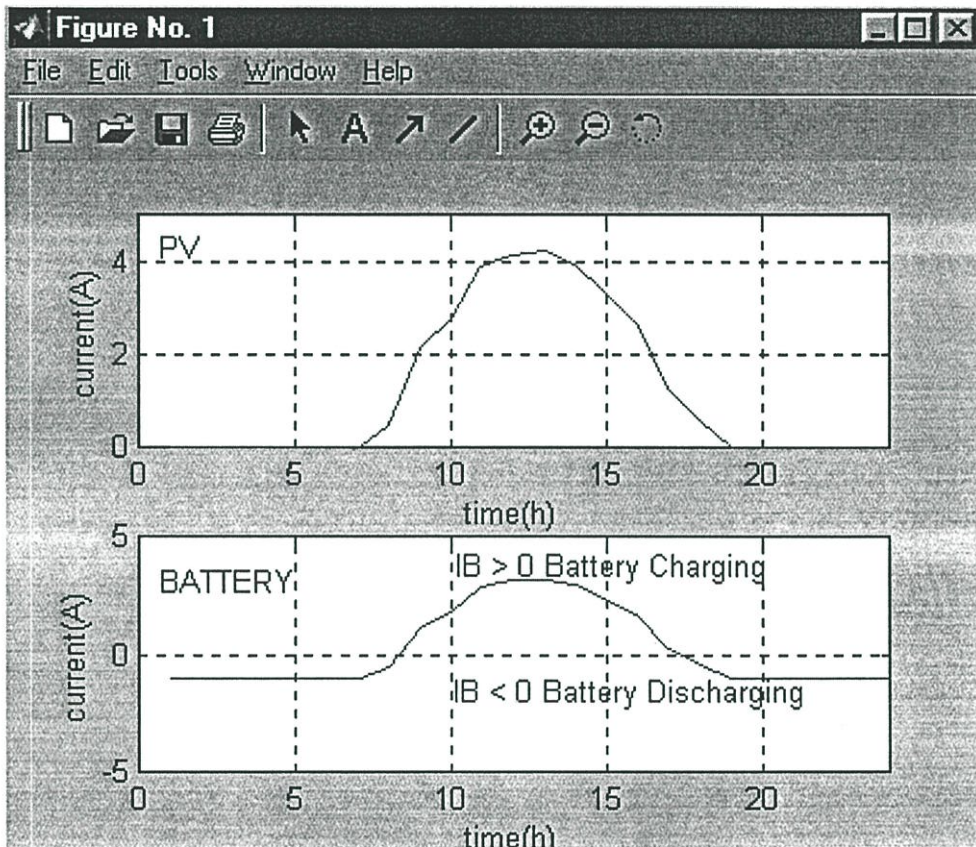
ส่วนการplotเป็นเส้นโครงร่าง (Contour) ที่แสดงดังรูปที่ 4.13 ผู้ใช้ก็สามารถกำหนดจำนวนเส้นเพื่อจุดผลต่างที่แต่ละระดับของการแสดงเป็นเส้นโครงร่างได้เช่นกัน



รูปที่ 4.13 ผลการแสดงผลค่าในลักษณะของเส้นโครงร่าง

จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงค่าต่าง ๆ และพล็อตรูปกราฟเพื่อแสดงถึงการทำงานของระบบย่อยต่าง ๆ อันได้แก่ กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{PV}$ ) กระแสไฟฟ้าของโหลดภาระ ( $I_L$ ) และการดำเนินการของแบตเตอรี่ที่เวลาต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาของวันออกมาดังรูปที่

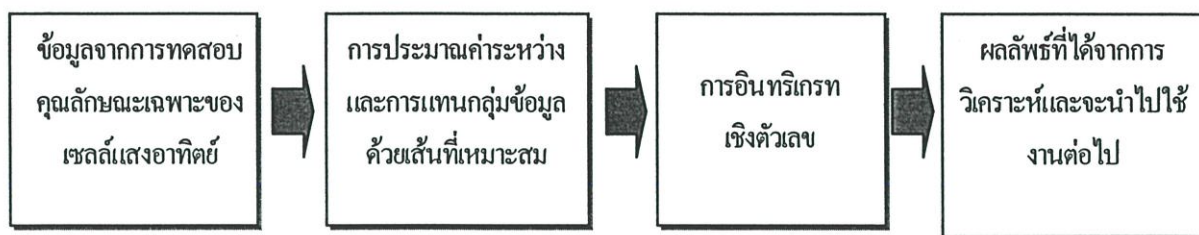
4.14



รูปที่ 4.14 ผลการแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

#### 4.3.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

หลังจากที่โปรแกรมทำการแสดงค่าผลลัพธ์ต่างในรูปของกราฟแล้ว โปรแกรมจะทำการนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยมีลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ด้วยการนำค่าที่ได้ไปทำการหาค่าแทรก และทำการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม (Interpolation and approximation function) ซึ่งความละเอียดถูกต้องก็ขึ้นกับจำนวนข้อมูล และอัตราการซีกค่าของข้อมูล (Sampling Date) ด้วยเช่นกัน ต่อจากนั้นโปรแกรมจะทำการอินทิเกรตด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Integration) เพื่อทำการหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งก็คือปริมาณกระแสไฟฟ้า หรือพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบดังต่อไปนี้ [24]



รูปที่ 4.15 ลำดับขั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

การใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณต่อไป ค่าที่ได้จากการทดลองมักจะมีค่าที่จุดใดจุดหนึ่ง หรือหลายๆ จุด ซึ่งอาจไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการคำนวณ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อเปลี่ยนข้อมูลที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของจุดออกมาให้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีความต่อเนื่อง การเปลี่ยนข้อมูลเป็นฟังก์ชันสามารถกระทำได้โดยหลักใหญ่ๆ 2 กรณีคือการหาค่าแทรก และการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม (Interpolation and approximation function) ข้อแตกต่างของทั้ง 2 วิธีคือ สำหรับ interpolation นั้นฟังก์ชันจะผ่านทุกจุดของข้อมูล แต่ approximation function ไม่จำเป็นต้องเป็นเช่นนั้น นั่นคือค่าฟังก์ชัน อาจจะไม่ผ่านหรือผ่านจุดข้อมูลทุกจุดก็ได้แต่ควรจะเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง และมีค่าใกล้เคียงกับทุกจุดมากที่สุด หรืออาจเป็นเส้นกราฟที่เหมาะสมที่สุดกับกลุ่มข้อมูลก็ได้ สำหรับวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้ทั้งสองกรณีนี้มีหลายวิธีดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะบางกรณีที่มีการใช้งานในโปรแกรม Matlab ดังต่อไปนี้

1. การหาค่าแทรก วิธีที่ Matlab ใช้เป็นหลักคือ การหาค่าแทรกด้วยพหุนาม โดยเป็นการเชื่อมต่อข้อมูล 2 จุดที่อยู่ติดกันด้วยเส้นโค้งหรือเส้นตรงตามแต่ที่กำหนด ในกรณีที่กำหนดให้เป็นเส้นตรงจะเรียก Linear interpolation และ Cubic-Spline interpolation จะเป็นเส้นโค้งที่ได้จากพหุนามอันดับ 3 ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด 2 จุด ที่อยู่ติดกันและนอกจากนั้นแล้วยังให้ ความชันของเส้น โค้งสองเส้นที่บรรจบกันที่จุดข้อมูลมีค่าเท่ากันหรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือเส้น โค้งจะราบเรียบที่จุดต่อทั้งสองเส้นนั่นเอง
2. การปรับ โค้ง วิธีที่ Matlab ใช้คือ Least-Square Curve Fitting โดยจะเป็นวิธีที่เลือกเส้น โค้งที่เป็นพหุนามซึ่งมีอันดับ ตามที่ผู้ใช้ต้องการ โดยเส้น โค้งจะผ่านกลุ่มข้อมูล โดยให้ผลรวมของระยะห่างจากข้อมูลแต่ละจุดห่างจากเส้น โค้งนี้น้อยที่สุด

สำหรับ linear interpolation จะเป็นการเชื่อมต่อจุดข้อมูลที่อยู่ติดกันด้วยเส้นตรง ดังนั้นการหาค่าของข้อมูลที่อยู่ระหว่างจุดทั้งสองก็จะใช้สมการเชิงเส้นของเส้นตรงที่เชื่อมจุดนั้นเป็นตัวกำหนด เหมือนกับที่เราใช้ในการเปิดตารางต่างๆ ทางวิศวกรรม สำหรับคำสั่งที่ใช้กับ Matlab จะใช้คำสั่ง interp1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

`interp1(x, y, s)` เป็นการหา linear interpolation ของชุดข้อมูล  $x$  และ  $y$  เมื่อ  $y = y(x)$  โดยจะให้คำตอบเป็นค่าของ  $y(s)$  โดย  $x$  และ  $y$  เป็นเวกเตอร์ ขนาดเท่ากัน ในกรณีที่  $s$  เป็นเวกเตอร์ จะให้ค่าเป็นเวกเตอร์ ขนาดเท่า  $s$

ข้อมูลที่ใช้ใน `interp1` ต้องมีการเรียงค่าของ  $x$  และ Matlab แนะนำให้เรียงค่า  $x$  จากน้อยไปหามาก ในกรณีที่  $x$  และ  $y$  เป็นเมตริกซ์ ที่มีขนาดเท่ากัน Matlab จะจับคู่ของข้อมูลในลักษณะคอลัมน์ต่อ คอลัมน์ ดังนั้นในการใส่ข้อมูลจะต้องให้ความระมัดระวังด้วย

สำหรับกรณี Cubic Interpolation จะคล้ายกับ `spline` แต่ที่จุดต่อของเส้นโค้งไม่จำเป็นต้องราบเรียบ รูปแบบจะเป็นดังนี้

`interp1(x, y, s, 'cubic')` โดย  $x, y$  และ  $s$  จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'cubic' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการทำ cubic interpolation

สำหรับ `spline interpolation` จะมีรูปแบบฟังก์ชันเป็น

`interp1(x, y, s, 'spline')` ค่า  $x, y$  และ  $s$  จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'spline' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการใช้วิธี cubic spline interpolation

สำหรับการเรียกใช้ `spline` นี้อาจจะใช้ได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

`spline(x, y, s)` ซึ่งจะให้ผลเหมือน `interp1(x, y, s, 'spline')` เพียงแต่คำสั่ง `spline` รับแต่เฉพาะ  $x$  และ  $y$  ที่เป็นเวกเตอร์ เท่านั้น

`spline(x, y)` จะให้ 'piecewise polynomial' ที่ได้จากการหาค่าแทรกของชุดข้อมูล  $(x, y)$  โดยพหุนามจะอยู่ในรูป  $y = y(x)$  ซึ่งเรียกพหุนามที่ได้ว่ามีรูปเป็น pp-form polynomial และหากต้องการหาค่าฟังก์ชันที่จุดใดอาจใช้คำสั่ง `ppvalue`

การประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนาม ที่เหมาะสม (polynomial approximation function) คือ การหาสมการพหุนามอันดับ  $n$  ที่เหมาะสมกับชุดกลุ่มข้อมูลที่สุ่ม แม้ว่ากราฟนี้จะไม่ผ่านทุกจุดของข้อมูลแต่กราฟจะเป็นกราฟเพียงเส้นเดียว นั่นคือมีสมการกราฟเพียงสมการเดียวตลอดช่วงที่กำหนดให้ ซึ่ง พหุนาม จะมีรูปแบบเป็น

$$p(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (4.6)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $a$  จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่สุ่ม สำหรับการปรับโค้งด้วยค่ากำลังสองน้อยที่สุด เป็นการเลือกพหุนามในองศาที่กำหนด เพื่อที่จะผ่านกลุ่มข้อมูลที่กำหนด สำหรับหลักการที่ใช้ในการเลือกสัมประสิทธิ์  $a_i$  นั้นจะเลือกค่าที่ให้กราฟที่ได้มีลักษณะที่มีผลรวมกำลังสองของระยะทางจากจุดต่างๆห่างจากเส้นกราฟน้อยที่สุด รายละเอียดของขั้นตอนการเลือก

สัมประสิทธิ์สามารถดูได้ในหัวเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในบทที่ 3 ประกอบด้วย สำหรับคำสั่งใน Matlab จะมีรูปแบบคำสั่งเป็นดังนี้

`polyfit(x,y,n)` โดย  $x,y$  เป็นจุดข้อมูลที่ต้องการปรับโค้งด้วยพหุนามอันดับ  $n$  ซึ่ง Matlab จะให้สัมประสิทธิ์ของ พหุนาม  $y = f(x)$  คืนมาโดยเรียงจากสัมประสิทธิ์ของกำลังมากไปหาน้อย

เมื่อได้ฟังก์ชันการประมาณค่าที่เหมาะสมแล้ว โปรแกรมจะทำการอินทิเกรตด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Integration) เพื่อทำการหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งก็คือปริมาณกระแสไฟฟ้า หรือ พลังงานไฟฟ้าที่แต่ละส่วนของระบบ ได้แก่ พลังงานที่สามารถผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานที่โหลดภาระได้รับ และปริมาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงการดำเนินการของแบตเตอรี่ ด้วยวิธีของ Simpson's และ higher-order Newton-Cotes ดังที่ได้กล่าวในรายละเอียด และแสดงการเปรียบเทียบของแต่ละวิธีการไว้ในบทที่ 3 ข้างต้น สำหรับคำสั่ง และเงื่อนไขการใช้งานในโปรแกรม Matlab สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

การอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) นั้นมีวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในสองกรณีคือ

- 1) ในกรณีที่เราได้ข้อมูลมาเป็นชุดของข้อมูล ซึ่งเราอาจจะต้องการอินทิเกรตโดยตรง โดยไม่ต้องทำการหาค่าแทรก หรือ ปรับโค้งของข้อมูลก่อนแล้วจึงนำมาอินทิเกรตด้วยวิธีปกติ
- 2) ในกรณีที่มีฟังก์ชันที่ยุ่งยากต่อการอินทิเกรต ด้วยวิธี analytical แบบธรรมดาที่ใช้กันทั่วไป

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขบนเครื่องคอมพิวเตอร์ความยุ่งยากในการหาผลลัพธ์จะลดน้อยลงไปกว่าวิธีการอินทิเกรตแบบปกติ เพราะการอินทิเกรต ก็คือการรวมขนาดของชิ้นส่วนเล็กๆ เข้าด้วยกันนั่นเอง สำหรับการอินทิเกรตใน Matlab สามารถทำได้ทั้งสองกรณีข้างต้น เพราะว่าในกรณีที่ 2 หากว่าจะใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลข ก็จะเหมือนกันกับวิธีแรกคือจะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันออกมาเป็นจุดๆก่อน ซึ่งความละเอียดของผลที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับความห่างของข้อมูลในแต่ละจุด

อย่างไรก็ตามสำหรับ Matlab แล้วหากเรามีข้อมูลแบบที่เป็นจุดซึ่งไม่ทราบค่าฟังก์ชันที่แท้จริง เราจะสามารถใช้ การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธี Trapezoidal ซึ่งถือว่ามีค่าความละเอียดไม่มากนัก แต่ว่าหากเราทราบฟังก์ชันที่จะอินทิเกรต เราจะสามารถใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ให้ความละเอียดมากกว่า เช่น Simpson's Rule แต่วิธีการใช้แบบหลังนี้อาจจะยุ่งยากกว่าบ้างเพราะต้องมีการเขียนฟังก์ชันไฟล์เพิ่มเติมขึ้นมา

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธี Trapezoidal นั้น Matlab จะใช้ ฟังก์ชัน trapz โดยการกำหนดค่าเวกเตอร์ หรือ เมตริกซ์  $x$  และ  $y$  เป็นการกำหนดข้อมูลแต่ละจุด ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

`trapz(x,y)` จะเป็นการ อินทิเกรต  $\int y(x)dx$  โดย  $x$  และ  $y$  เป็น column vector ถ้า  $x$  และ  $y$  เป็นเมตริกซ์ จะคำนวณแต่ละคอลัมน์ของเมตริกซ์นั้น ถ้า  $x$  เป็น column vector และ  $y$  เป็นเมตริกซ์ จะเทียบแต่ละคอลัมน์ของ  $y$  เทียบกับ  $x$

การอินทิเกรตแบบ Quadrature คือวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้หาพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชัน สำหรับ Matlab จะมีฟังก์ชันให้เลือกได้ 2 ฟังก์ชัน ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะใช้วิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ฟังก์ชันที่กล่าวถึงนั้นคือ ฟังก์ชัน `quad` และ `quad8` อย่างไรก็ตามการใช้ฟังก์ชันทั้งสองนี้ผู้ใช้จะต้องเขียนฟังก์ชันไฟล์ขึ้นมา โดยฟังก์ชันไฟล์ นั้นจะต้องบรรจุฟังก์ชัน  $y = f(x)$  ที่ต้องการอินทิเกรตไว้ แล้วใช้คำสั่ง `quad` หรือ `quad8` คำนวณหาค่าอินทิเกรต โดยมีรูปแบบของคำสั่งทั้งสองเป็น

`quad('function',a,b)` หรือ  
`quad('function',a,b,tol,trace)` หรือ  
`quad('function',a,b,tol,trace,p1,p2...)`

โดย 'function' คือชื่อฟังก์ชันไฟล์ที่เขียนไว้ก่อนหน้านี้นี้  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่สำหรับกำหนดจุดเริ่มอินทิเกรตจาก  $a$  ถึง  $b$  ส่วนที่เหลือจากนี้คือ `tol`, `trace`, `p1`,... จะมีหรือไม่มีก็ได้ สำหรับ `tol` เป็นค่าที่กำหนด relative error ของการอินทิเกรต ถ้าไม่กำหนด Matlab จะตั้งค่านี้ไว้ที่ 0.001 ส่วน `trace` คือฟังก์ชันที่จะใช้พล็อตจุด และ `p1`, `p2` คือค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะส่งไปให้กับ Matlab ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากคำสั่ง `help quad` สำหรับคำสั่งนี้ Matlab จะใช้วิธีการของ Simpson's ในการหาค่าอินทิเกรต

`quad8('function',a,b)` หรือ  
`quad8('function',a,b,tol,trace)` หรือ  
`quad8('function',a,b,tol,trace,p1,p2...)`

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะเหมือนฟังก์ชัน `quad` เพียงแต่การคำนวณจะละเอียดมากกว่าโดยจะใช้วิธีการของ Newton-Cotes 8 panel ในการหาค่าอินทิเกรต (สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในบทที่ 3 ข้างต้น) ซึ่งจะเหมาะกว่า `quad` ในด้านความละเอียดและหาค่าอินทิเกรตของฟังก์ชันที่มี singularity อยู่ในช่วงที่ต้องการอินทิเกรต

### 4.3.3 การทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์

#### 4.3.3.1 การประมาณค่าระหว่าง และการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม

ในที่นี้จะใช้วิธี Polynomial regression ในการพิจารณาถึงอันดับที่เหมาะสม และหาฟังก์ชันพหุนามอันดับ  $m$  ( $m^{\text{th}}$  order polynomial) ของเส้นที่เหมาะสมดังกล่าว โดยมีวิธีการเป็นดังนี้ สมการ  $m^{\text{th}}$  degree polynomial

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (4.7)$$

ซึ่งมีรูปแบบทั่วไปเป็น

$$y = a_0z_0 + a_1z_1 + a_2z_2 + \dots + a_mz_m + e \quad (4.8)$$

เมื่อ  $z_0, z_1, \dots, z_m$  คือฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณ  
ทำการจัดรูปของสมการที่(4.8) ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} y(x) &= a_0z_0(x) + a_1z_1(x) + a_2z_2(x) + \dots + a_mz_m(x) + e \\ &= \sum_{j=0}^m a_jz_j(x) + e \end{aligned} \quad (4.9)$$

#### ■ เกณฑ์เพื่อหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหนึ่งในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุดคือ ทำให้ผลรวมของค่าผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด (minimize the sum of the squares of the residuals,  $S_r$ ) และสามารถพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_r &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \sum_{j=0}^m a_jz_j(x_i) \right]^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

ให้  $z_{ji} = z_j(x_i)$  จะได้

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji} \right] \quad (4.11)$$

หาค่า minimize

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j} = 0 \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[ y_i - \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} \right] z_{ji} \right\} = 0 \quad (4.12)$$

และ

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j} = 0 \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[ y_i - \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} \right] z_{ji} \right\} = 0 \quad (4.13)$$

ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} z_{ji} = \sum_{i=1}^n y_i z_{ji} \quad (j=0,\dots,m) \quad (4.14)$$

ซึ่งเป็น "Normal Equation" สำหรับ regression coefficients  $a_0 \dots a_m$  โดยที่ normal equations คือ  $(z^T z)A = z^T y$  และสามารถเขียน normal equations ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad z = \begin{bmatrix} z_{01} & \dots & z_{j1} & \dots & z_{m1} \\ z_{02} & & z_{j2} & & z_{m2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{0n} & & z_{jn} & & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

- Standard error of the estimate ( $S_{y/x}$ )

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-(m+1)}} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $m$  คือ อันดับของฟังก์ชันพหุนาม

- Sum of squares of residuals about the mean  $\bar{y}$  ( $S_t$ )

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.17)$$

- Coefficient of determination ( $r^2$ )

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (4.18)$$

- Correlation coefficient ( $r$ )

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (4.19)$$

โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาตัดสินใจเลือกค่าสำหรับเส้นที่เหมาะสมที่สุดเป็น  $S_r = 0$ ,  $r^2 = 1$  และ  $r = 1$  ซึ่งถ้าเป็นไปตามกรณีดังกล่าวจะแสดงว่าเส้นที่มีค่าต่อเนื่องที่ได้สามารถแทนข้อมูลได้ 100%

#### 4.3.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข

ในที่นี้อาศัยวิธีการของซิมป์สัน (Simpson's method) ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่ต้องการอินทิเกรต โดยวิธีของซิมป์สัน จะทำการประมาณเส้นโค้งที่ต้องการทราบค่าด้วยส่วนของพาราโบลา (parabola) เล็กๆต่อกัน ซึ่งจะทำการแบ่ง

ช่วงที่ต้องการอินทิเกรต  $[a, b]$  จาก  $a$  ถึง  $b$  เป็นระยะเท่า ๆ กันด้วยจำนวนคู่ โดยมี  $n$  เป็นช่วงที่ทำการแบ่ง และมีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} \left\{ f_0 + 4(f_1 + f_3 + f_5 + \dots + f_{2n-1}) + 2(f_2 + f_4 + \dots + f_{2n-2}) + f_{2n} \right\} \quad (4.20)$$

เมื่อ  $h = \frac{(b-a)}{2n}$

และ  $f_i = f(x_i)$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$S_k = \frac{1}{3} \Delta x_k \left[ f_a + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f_{(a+i\Delta x_k)} + 2 \sum_{i=2}^{n-2} f_{(a+i\Delta x_k)} + f_b \right] \quad (4.21)$$

โดยที่  $S_k$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันที่ต้องการทราบค่า

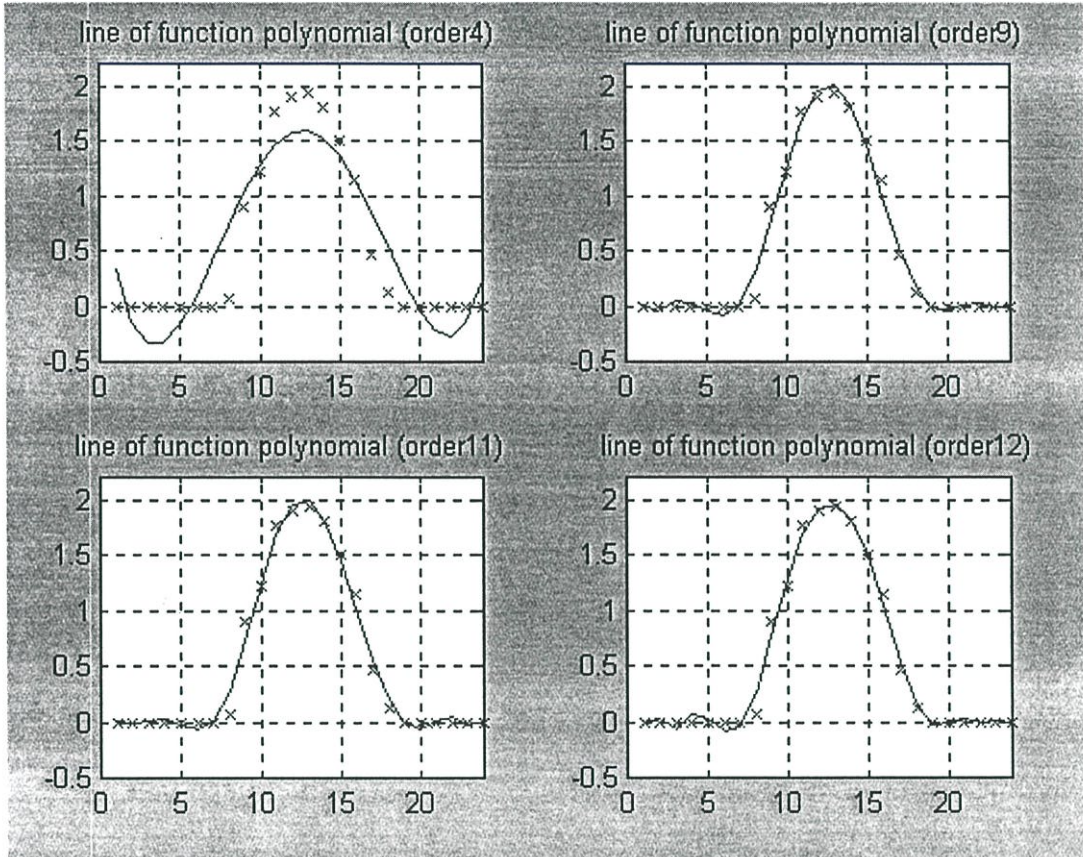
และ  $\Delta x_k = \frac{(b-a)}{2^k}$

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะนำอัลกอริทึมและวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อดูความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่างๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

#### 4.3.3.3 การทดสอบการประมาณค่าด้วยเส้นที่เหมาะสม

ใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ และทำการคำนวณหาผลลัพธ์ของการประมาณค่า ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยมีสมการจริงเป็น  $f(x) = x \cdot \sin(x)$  โดยใช้หลักที่ว่าเส้นกราฟที่ได้จากการประมาณค่าอาจไม่ผ่านจุดข้อมูลทุกจุด แต่จะต้องเป็นเส้นกราฟที่ทำให้เกิดความผิดพลาดจากกลุ่มของข้อมูลที่ทำกรทดสอบน้อยที่สุด จึงจะถือได้ว่ากราฟเส้นนั้นมีความเหมาะสมสามารถใช้แทนกลุ่มของข้อมูลนั้นได้และสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์

ระบบในประเด็นอื่นๆต่อไปได้ โดยพิจารณาจากตัวอย่างเส้นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า อันดับของฟังก์ชันพหุนามค่าต่างๆ ที่ใช้ในการประมาณจากรูปที่ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของข้อมูลตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่ากับฟังก์ชันตัวอย่างที่ทราบผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว

อันดับของฟังก์ชันพหุนาม ที่ใช้ในการประมาณค่า	Standard error of the estimate $(s_{y/x})$	Coefficient of determination $(r^2)$	Correlation coefficient $(r)$
อันดับที่ 1 (สมการเส้นตรง)	5.7549	0.4331	0.6581
อันดับที่ 2 (สมการพาราโบลา)	2.7158	0.5842	0.7643
อันดับที่ $m^{\text{th}}$	2.8284	0.9974	0.9987

จากตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณข้างต้นเมื่อทำการเพิ่มอันดับ(order)ของฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function)ที่ใช้ในการประมาณค่าให้มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณลดลง นั่นคือจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตามความเป็นจริงมากที่สุด แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดในส่วนอื่นอันได้แก่ ค่าผิดพลาดเพราะปัดเศษ (Round-off Error) และค่าผิดพลาดเพราะตัดปลาย (Truncation Error) ประกอบด้วย

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็นำอัลกอริทึมและวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อดูความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่าง ๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

#### 4.3.3.4 การทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจริง

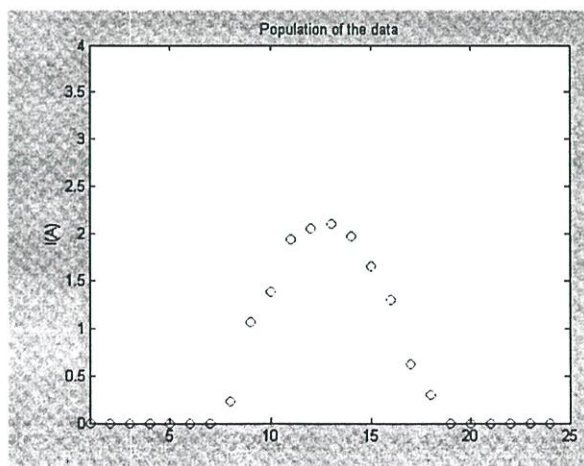
ทำการทดสอบใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการที่ได้นำเสนอกับวิธีการทำคุณลักษณะแบบปกติ หลังจากที่ได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์แล้ว โดยมีข้อมูลและรายละเอียดของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

ตำแหน่งการติดตั้งทดสอบ : Lat.  $13.0^{\circ}$  N, Long.  $100^{\circ}$  E

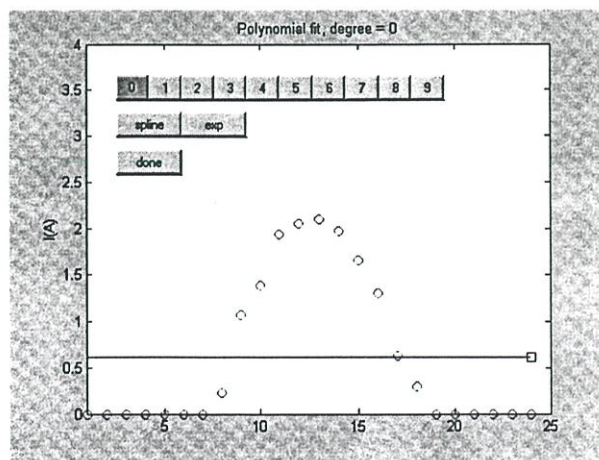
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ : ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว รุ่นBPTS 1255 HPขนาดพิกัด 55 W<sub>p</sub>

ภาระที่ใช้ในการทดสอบ : เป็นโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้

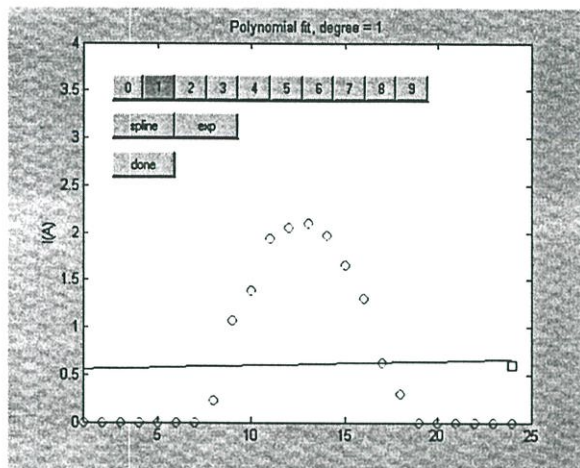
ทำการทดสอบเพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function) ที่ใช้อันดับต่าง ๆ กัน กับการประมาณค่าด้วย ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) โดยผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสามารถแสดงดังตารางที่ 4.2



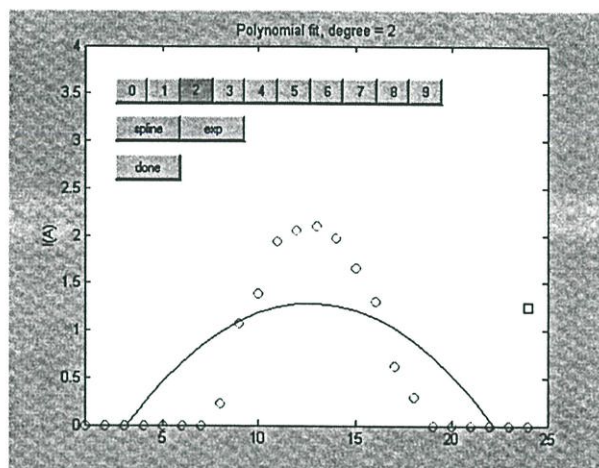
4.17 (ก)



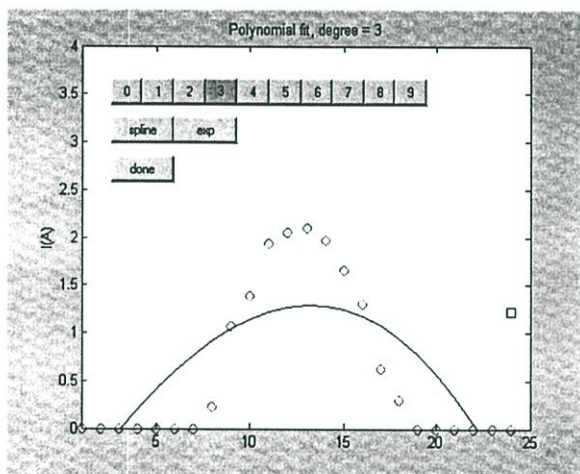
4.17 (ข)



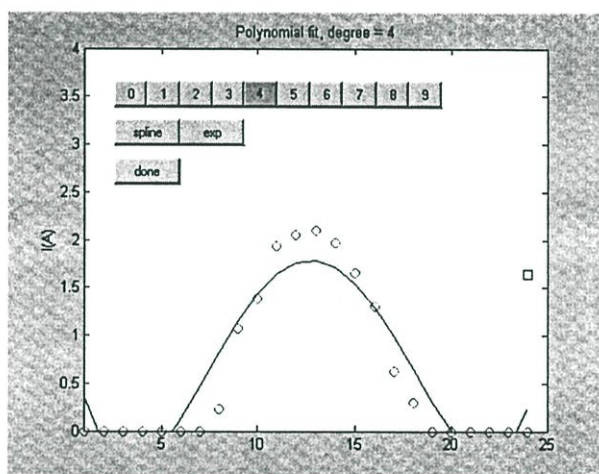
4.17 (п)



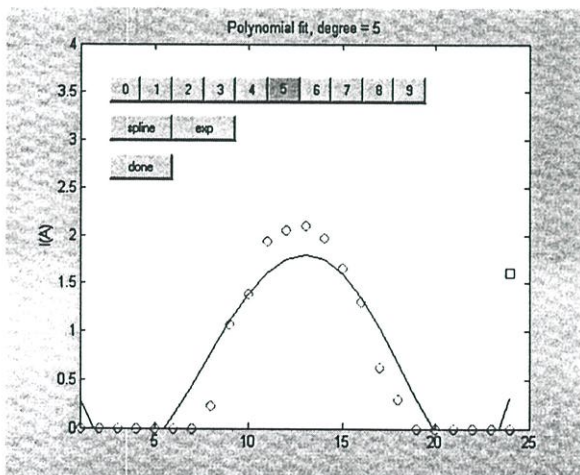
4.17 (я)



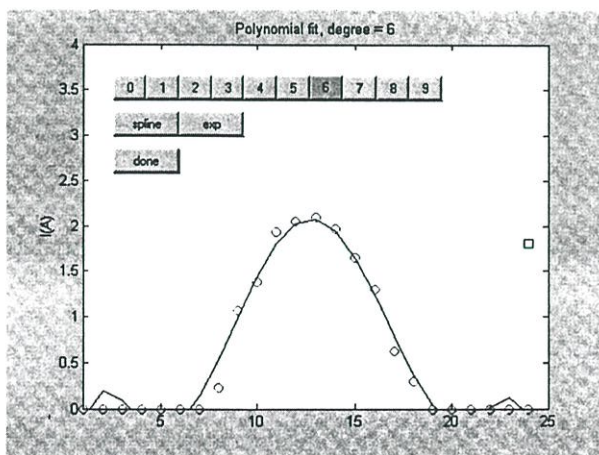
4.17 (я)



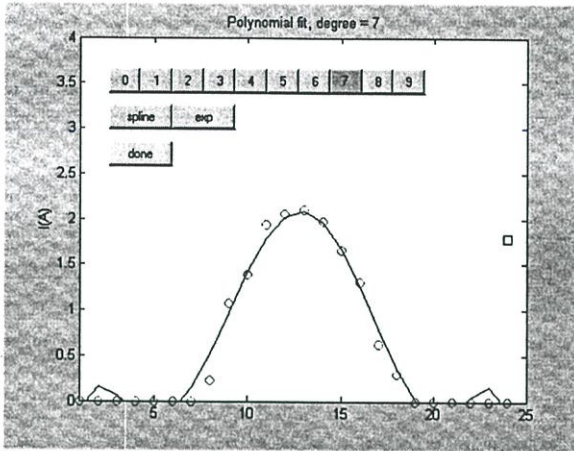
4.17 (я)



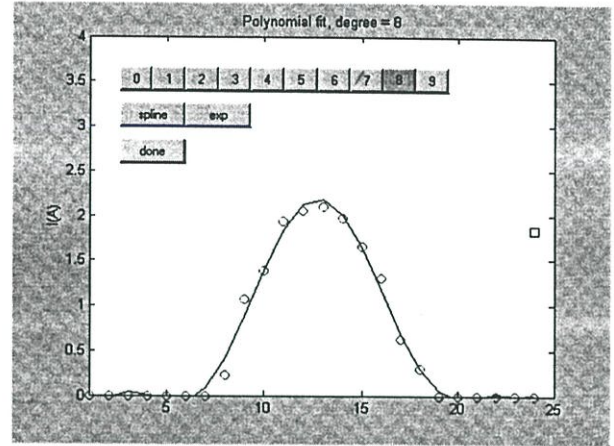
4.17 (я)



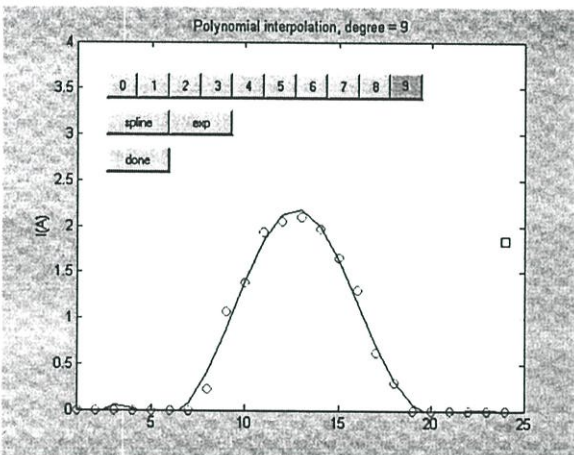
4.17 (я)



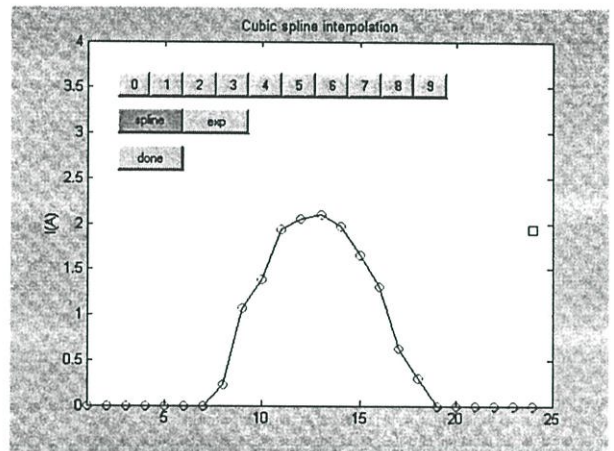
4.17 (ฉ)



4.17 (ญ)



4.17 (ฎ)



4.17 (ฏ)

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ สำหรับการประมาณค่าของระบบไฟฟ้า  
แสดงอาทิตย์

- |              |             |             |             |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| ก) ฐานข้อมูล | ข) อันดับ 0 | ค) อันดับ 1 | ง) อันดับ 2 |
| จ) อันดับ 3  | ฉ) อันดับ 4 | ช) อันดับ 5 | ซ) อันดับ 6 |
| ฉ) อันดับ 7  | ญ) อันดับ 8 | ฎ) อันดับ 9 | ฏ) spline   |

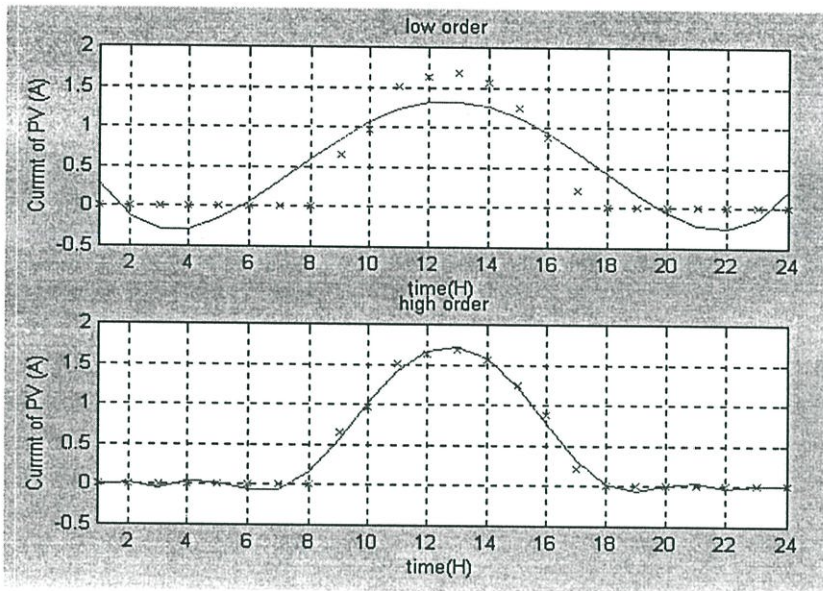
เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ จะให้ผลลัพธ์ของค่าCoefficient of determination( $r^2$ )ที่แตกต่างกัน และถ้าเลือกใช้อันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และได้เส้นกราฟที่เหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $r^2$  ของฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า  
แสงอาทิตย์

รูปแบบฟังก์ชันที่ใช้ ในการประมาณค่า	ลักษณะการประมาณ	ผลลัพธ์จากการคำนวณค่า coefficient of determination ( $r^2$ )
ฟังก์ชันพหุนาม อันดับที่ m ( $m^{\text{th}}$ - order polynomial)	อันดับที่ 1	0.0102
	อันดับที่ 2	0.8969
	อันดับที่ 3	0.9835
	อันดับที่ 4	0.9893
	อันดับที่ 5	0.9921
	อันดับที่ 6	0.9922
	อันดับที่ 7	0.9970
	อันดับที่ 8	0.9974
	อันดับที่ 9	0.9985
	อันดับที่ 10	0.9989
ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential)	$P_e(x) = ae^{bx}$	0.8971

สำหรับผลการคำนวณด้วยฟังก์ชันพหุนามจะให้ค่า Coefficient of determination( $r^2$ ) สูงสุดในอันดับที่10 โดยได้ค่า  $r^2$  เป็น 0.9989 ในขณะที่การประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) จะได้ค่า Coefficient of determination( $r^2$ ) เป็น 0.8971 ซึ่งถือว่ายังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบดังกล่าวเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนาม

จากผลการทดสอบและการเปรียบเทียบผลที่ได้โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) ตามตารางที่ 4.2 ข้างต้นจะพบว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คือฟังก์ชันพหุนามเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าต่ำกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนการเปรียบเทียบความแตกต่างของอันดับ (order) ฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง เพื่อใช้ในการประมาณค่าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในการทดสอบติดตั้งจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับที่เหมาะสมจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอ จะทำให้ได้ค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) เป็น 0.9989 และมีค่า Correlation coefficient ( $r$ ) เป็น 0.9994 นั่นคือเส้นกราฟของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลจากการทดสอบได้เป็น 99.9 %

#### 4.4 กรณีศึกษา การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อใช้กับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ (ส่วนที่ 1 : หลักการ และเงื่อนไขการออกแบบใช้งาน)

วิธีป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะที่ดีที่สุดคือ “active cathodic protection” ซึ่งจะเรียกว่าการป้องกันการผุกร่อนชนิดกัมมันต์ การผุกร่อนของโลหะสาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte) ซึ่งในที่นี้ก็คือพื้นดินนั่นเอง [25]กับตัวท่อเอง โดยตัวท่อมีแรงดันไฟฟ้ามีศักย์เป็นบวกเทียบกับดิน ผลที่เกิดขึ้นขณะมีกระแสไฟไหลจากท่อลงสู่พื้นดินคืออ็อกซิเจนของโลหะจะหลุดออกมาด้วยเกิดการสึกกร่อนนานไปก็จะกลายเป็นรูโหว่ทะลุผนังท่อเข้าไป

หลักการของการป้องกันการผุกร่อนชนิดกัมมันต์ก็คือด้านหรือกลับทิศทางของกระแสไฟที่ไหลระหว่างท่อโลหะกับพื้นดินโดยการจ่ายไฟที่แรงดันมีศักย์เป็นลบเข้าที่ท่อ เพื่อแก้แรงดันบวกที่มีอยู่ระหว่างแนวท่อกับพื้นดิน แรงดันลบที่ว่านั้นจะให้ได้โดยต่อขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเครื่องจ่ายไฟตรงเข้าที่ตัวท่อ และต่อขั้วบวกของมันลงขั้วดิน ขนาดแรงดันลบที่น้อยที่สุดที่จะต้องจ่ายให้กับท่อเทียบกับดินและเพียงพอที่จะป้องกันการผุกร่อนได้ก็คือ 0.85 โวลต์ เรียกแรงดัน

ค่านี้ว่า “แรงดันเทอร์สโวลที่ปลอดภัย” (safety threshold voltage) ในทางปฏิบัติมักให้แรงดันนี้สูงกว่าเกณฑ์เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยในการทำงานของท่อ

#### 4.4.1 การวิเคราะห์ระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

ก่อนที่จะกำหนดขนาดกระแสและแรงดันของตัวจ่ายไฟ ณ. จุดที่จะทำการป้องกันการผุกร่อน เราจะต้องศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวและเกี่ยวข้องกับระบบนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด 2 ตัว ซึ่งเป็นตัวแสดงขนาดของกระแสที่ต้องการคือ ความต้านทานรั่ว(leakage resistance) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของท่อเทียบกับดิน( $\Omega/m^2$ ) และความต้านทานตามยาว (longitudinal resistance) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวท่อ( $\Omega/m$ ) ปกติท่อโลหะจะได้รับการปกคลุมด้วยแถบรีบบอนที่เป็นฉนวน ซึ่งจะช่วยลดการผุกร่อนลงไปได้มาก อย่างไรก็ตามก็ยังมีหลุมและโพรงเล็กในตัวพอกหรือในรอยต่อ อันเป็นสาเหตุทำให้เกิดความต้านทานรั่วยังผลขึ้น สามารถวัดค่าได้เป็น  $\Omega/m^2$  พอทราบค่าความต้านทานนี้แล้วก็จะสามารถคำนวณกระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของท่อที่ไหลจากดินเข้าสู่ท่อเพื่อให้แน่ใจว่ามีแรงดันปลอดภัยต่ำสุดที่ทุกๆ จุดของท่อที่ทำการด้านการผุกร่อน

โดยทั่วไปค่าความต้านทานรั่วสำหรับท่อที่ปกคลุมด้วยฉนวนแล้วอยู่ระหว่าง 1 - 10  $k\Omega/m^2$  เพื่อให้ได้แรงดันลบต่ำสุดประมาณ 1 โวลต์ [26]กระแสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะอยู่ในช่วง 0.1 - 1.0  $mA/m^2$

ในรูป 4.19 (ก) แสดงแผนภาพของการป้องกันการผุกร่อนที่กล่าวมาแล้วและในรูป 4.19 (ข) ได้พล็อตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสตามความยาวแนวท่อ โดยเริ่มจากจุดที่ต่อตัวจ่ายกำลังไฟให้ กระแสจะค่อยลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เพราะเกิดแรงดันลด (ตก) ในท่อเนื่องจากกระแสภายในไหลผ่านเข้าไปในความต้านอนุกรม

การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสกับระยะทาง  $x$  ระหว่างจุด ( $x=0$ ) ซึ่งมีตัวจ่ายกำลังไฟต่ออยู่กับปลายจุด ( $x=L$ ) ของแนวท่อซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ในข่ายการป้องกันจากตัวจ่ายกำลังไฟชุดเดียวกันให้เป็น

$$j(x) = j_L \cosh \alpha (L-x) \quad (4.22)$$

โดย  $j_L$  เป็นความหนาแน่นกระแสต่ำสุด (ที่จุด  $x=L$ ) ที่จำเป็นในการทำให้เกิดแรงดันป้องกันต่ำสุด

และ  $\alpha$  เป็นค่าคงตัวการลดทอน (attenuation constant) หาได้จาก

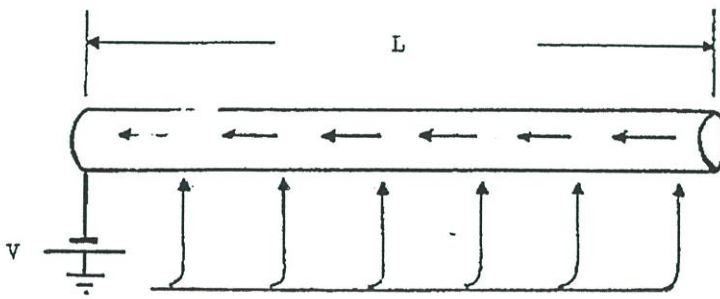
$$\alpha = R_s / R_L \text{ (m}^{-1}\text{)}, \quad (4.23)$$

เมื่อ  $R_s$  เป็นความต้านทานอนุกรมของท่อต่อหนึ่งหน่วยความยาว ( $\Omega/m$ )  
 $R_L$  เป็นความต้านทานรั่วต่อหนึ่งหน่วยความยาวและหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $\Omega.m$ )

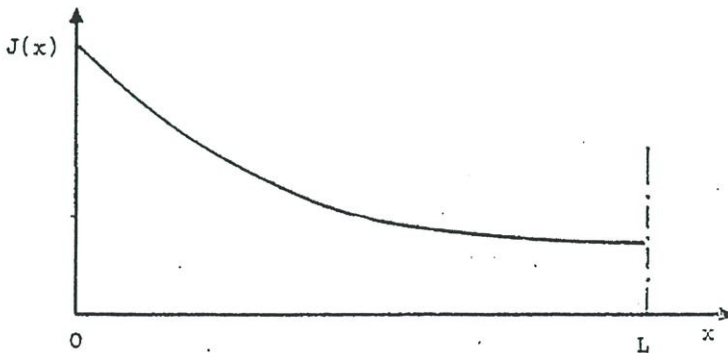
รวมกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้หาได้จากกรอินทิเกรตสมการ 4.22 ดังนี้

$$I = \frac{\pi D}{\alpha} J_L \sinh(\alpha L) \quad (4.24)$$

โดย  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางมีหน่วยเป็นเมตร



(ก)

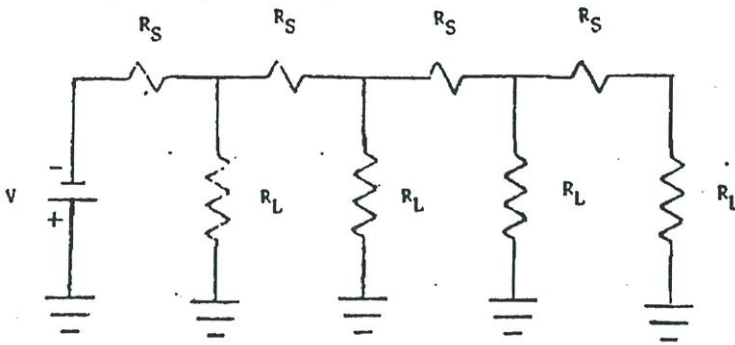


(ข)

รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ และองค์ประกอบของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ ชนิดกัมมันต์

(ก) พารามิเตอร์ประกอบของท่อที่ต้องการป้องกันการผุกร่อน

(ข) การพล็อตความหนาแน่นกระแสตามความยาวท่อที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของค่าความต้านทานรั่วของท่อ และความต้านทานอนุกรม

โดยปกติแล้วแนวท่อได้รับการคุ้มกันจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้ท่อโดยทิ้งช่วงห่างกันแต่ละจุดเป็นระยะทางหลายสิบกิโลเมตร ตัวจ่ายกำลังไฟต้องมีพิกัดสูงมากตามไปด้วย แรงดันของตัวจ่ายกำลังไฟใช้เป็นประโยชน์เท่าที่จำเป็นบนหมุดปลายทางที่ลงดิน เพราะแรงดันระหว่างท่อกับตัวพื้นดินมักมีขนาดประมาณ 1 โวลต์ ในจุดที่จะคุ้มกันเนื่องจากแรงดันลดไม่มากนักตลอดท่อ ค่าตามปกติของ  $R_S$  คือ  $1 - 10 \times 10^6 \Omega/m$  ต่อท่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 ถึง 3 เมตร แรงดันลดระหว่างจุด  $o$  และ  $L$  ของท่อเนื่องจากกระแสไหลผ่านตัวมันให้เป็น

$$V_L = \frac{(R_S / \pi) D J_L}{2} (1 - \cosh \alpha L) \quad (4.25)$$

แรงดันทั้งหมดที่ตัวจ่ายกำลังไฟจะต้องจ่ายให้ท่อนอกเหนือจาก  $V_L$  แล้วจะต้องจ่ายชดเชยแรงดันลด (ปกติมากกว่า  $V_L$ ) เนื่องจากกระแสไหลเข้าไปยังปลายทางที่ลงดิน ดังในรูป 4.21 ดังนั้นแรงดันรวมของตัวจ่ายกำลังไฟคือ

$$V_T = V_L + IR_E \quad (4.26)$$

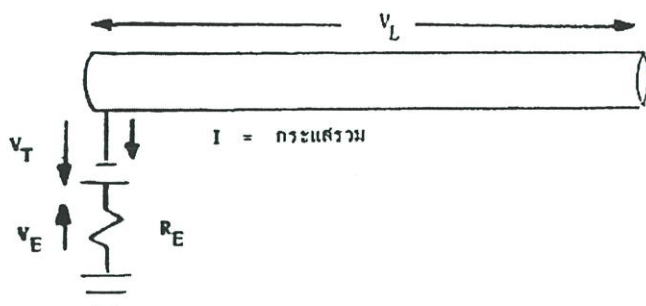
โดย  $R_E$  เป็นความต้านทานปลายทางที่ลงดินเทียบกับดิน,

$I$  เป็นกระแสได้จากสมการ 4.24

และ  $V_L$  เป็นแรงดันสูงสุดระหว่างท่อกับดิน ได้จากสมการ 4.25

แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างปลายทางลงดินและท่อ เมื่อพิจารณาจากความต้องการในเรื่องความปลอดภัยจะให้เป็น 50 โวลต์ ด้วยแรงดันสูงขนาดนี้ประกอบกับการพิจารณาราคาของตัวหมุดที่ปลายทางลงดินจะเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดบนของระยะที่อนุญาตได้ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวถัดกัน ในทางปฏิบัติการเลือกจุดป้องกันตลอดแนวท่อได้รับอิทธิพลอย่างมากจากข่า

ไฟสายส่งเพราะต่อไฟมาใช้ได้ง่าย ดังนั้นมักเลือกระยะระหว่างจุดป้องกันให้ห่างกันมากๆ และใช้กำลังการจ่ายไฟค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.21 การสูญเสียแรงดันที่ปลายทางของจุดลงดิน

#### 4.4.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ

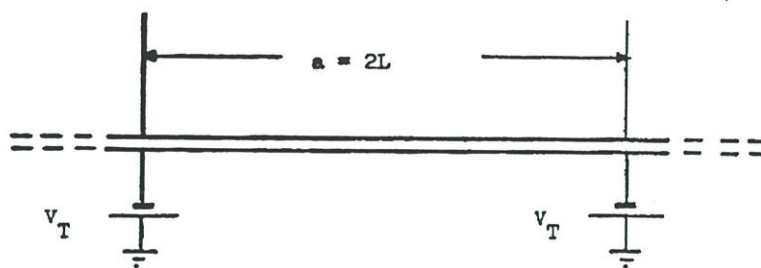
การป้องกันการสุกร่อนโดยการ ใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้มีความเป็นอิสระ จากข้อจำกัดบางประการที่ประสบในการใช้ไฟจากระบบไฟฟ้าปกติของการไฟฟ้าที่นิยมใช้กัน คือ ต้องให้ความใกล้เคียงกับจ่ายไฟจากสายส่ง ในกรณีนี้ความเป็นอิสระจากระบบสายส่งไฟฟ้า และจากความต้องการที่จะลดกำลังไฟติดตั้งเนื่องจากราคาของเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ต้องพิจารณาหลายแง่มุม การพิจารณาสิ่งที่กล่าวมานั้นมีสิ่งหนึ่งที่เป็นตัวกำหนด กล่าวคือสำหรับราคาการทำปลายทางลงดินรวมทั้งความต้านทานของมันเองด้วย ความต้องการไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแปรค่าตาม  $I^2$  และตัวกระแสเองก็ค่อนข้างจะเป็นปฏิภาคกับความยาวที่อยู่ในข่ายป้องกัน ดังนั้นกำลังไฟจะต้องเพิ่มขึ้นกับระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียงกัน การคำนวณประกอบการออกแบบระบบป้องกันนี้ถ้าจะให้ลดต้นทุนของระบบควรปฏิบัติดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.22 เป็นระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นพารามิเตอร์ที่แปรค่าได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวทำการป้องกันในส่วนของ  $L = a/2$  ทั้งสองด้านที่มันครอบคลุมอยู่ และต้องให้กระแส  $I_T$  เป็นสองเท่าของกระแส  $I$  ที่ให้ไว้ในสมการ 4.24

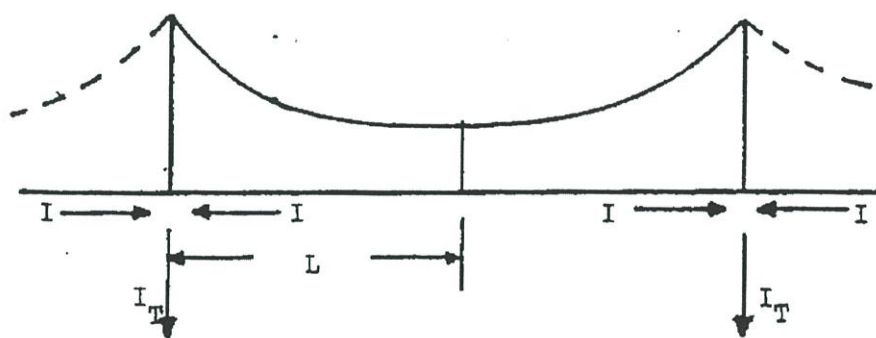
เมื่อได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและชนิดของท่อแล้ว เราก็ควรตรวจค่า  $R_S$  และ  $R_L$  แล้วคำนวณ  $I$  และ  $V_L$  จากสมการ 4.24 และ 4.25 โดยเป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $a = 2L$  ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัวถัดกันกำลังไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวหาได้จาก

$$P_T = I_T \times V_T = 2I \times V_T \quad (4.27)$$

โดย  $V_T$  ได้จากสมการ 4.26 และขึ้นกับค่าของ  $R_E$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ประกอบตามระยะทางของท่อที่ป้องกัน

- ก) ส่วนหนึ่งของแนวท่อที่อยู่ในข่ายการป้องกันการผุกร่อน
- ข) แผนภาพของกระแสไฟตลอดแนวท่อส่วนที่กำลังพิจารณา

ถ้าหมุดปลายทางลงดิน (electrode) เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกปักลงไปในดิน ค่าความต้านทานจะขึ้นกับความลึกของดินส่วนที่หมุดปักลงไปถึงความสัมพันธ์

$$R_E \cong \frac{3\rho}{2\pi l} \quad (4.28)$$

โดย  $\rho$  เป็นสภาพต้านทานของดินจากตาราง 4.3 และ  $l$  เป็นความลึกของหมุดขั้วไฟฟ้าที่ปักในดิน

ซึ่งสามารถคำนวณขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $a$  ระหว่างตัวกำเนิดไฟฟ้าสองตัวที่อยู่ตรงกันข้ามกันสำหรับความต้านทานปลายทางลงดินค่าต่างๆ กันได้ รูป 4.23 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากตัวกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $a$  สำหรับค่า  $R_E$  ต่างๆ กันสามค่า

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพต้านทานของดินชนิดต่าง ๆ กัน

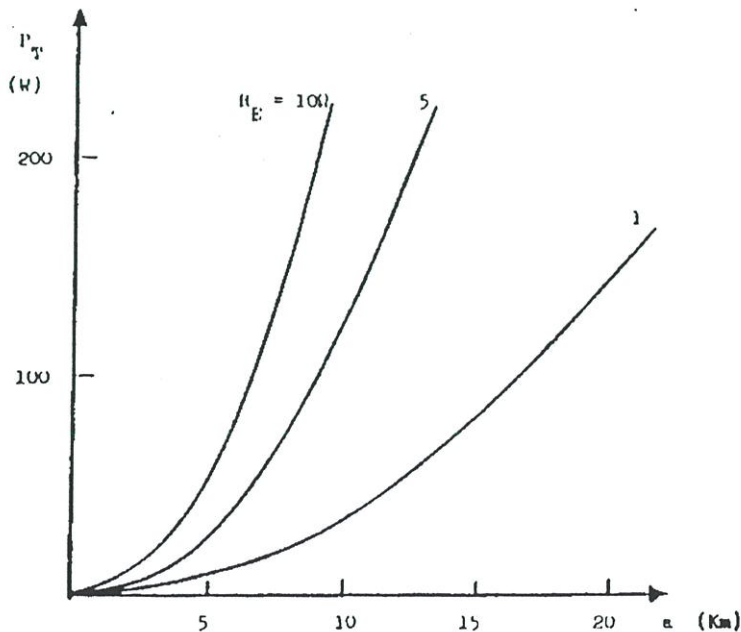
ชนิดของดิน	ค่าสภาพต้านทาน $\rho$ (ohm-m)
ดินเหนียว	30 - 150
ดินร่วน	200 - 300
ทรายเปียก	200 - 300
ทรายแห้ง	2000 - 5000
หินปูนเปียก	30 - 100
หินปูนแห้ง	2000 - 5000
หินแข็ง	1000 - 5000

ขั้นต่อไปก็ต้องการหาโหลดของระบบ (โหลดเป็นค่าคงตัว ถึงแม้การจ่ายกำลังไฟจะเป็นให้เป็นระยะ ๆ) แล้วจึงทำการทำดุลพลังงานของระบบเพื่อหาขนาดของสนามเซลล์สุริยะและแบตเตอรี่ที่ให้กำลังไฟและพลังงานตามที่ต้องการด้วยราคาต้นทุนที่ต่ำที่สุด

สิ่งที่ควรทราบไว้คือการป้องกันนี้จะขาดตอนได้ไม่เกิน 2 วันในหนึ่งปีเท่านั้น

กลับมาพิจารณาในเรื่องระบบเซลล์สุริยะที่จัดว่าเหมาะสมโดยการวิเคราะห์ราคาค่าใช้จ่าย

สำหรับค่า  $R_E$  แต่ละค่าที่ใช้ในการคำนวณข้างต้น เราสามารถหาราคาใช้จ่าย  $C_E$  ของส่วนทางปลายลงดินได้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มของ  $1/R_E$



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าตัวกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง สำหรับท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ที่ค่า  $R_E$  ต่างๆ กัน

เราสามารถหาราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ที่แต่ละระยะทาง  $a$  ได้ เมื่อทำการวิเคราะห์การทำดุลพลังงานแล้ว ราคารวม  $C_T$  สำหรับแต่ละค่าของระยะทาง  $a$  หาได้โดยการบวกราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ เข้ากับราคาของส่วนปลายทางลงดิน  $C_E, C_T$  ซึ่งเป็นราคาเฉพาะการป้องกันที่จุดเดียวเท่านั้น และเป็นฟังก์ชันลดลงกับระยะทาง  $a$  อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมเราควรคำนึงถึงราคาต่อหนึ่งหน่วยความยาวของแนวท่อประกอบด้วย นั่นคือ  $C_u = C_T / a$

ค่า  $C_T$  จะมีค่าสูงมากที่ระยะทาง  $a$  ต่ำๆ เพราะเป็นผลจากราคาของส่วนปลายทางลงดิน  $C_E$  ที่สูง ซึ่งไม่เกี่ยวกับ  $a$  ดังนั้น  $C_u$  จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นที่ค่า  $a$  ต่ำๆ และจะลดลงจนต่ำสุดที่ค่า  $a$  ค่าหนึ่ง (อิทธิพลของ  $C_E$  ลดน้อยลง) เมื่อ  $a$  เพิ่มมากขึ้นไปอีก  $C_u$  จะกลับเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากยิ่งระยะทาง  $a$  มากขึ้นก็ต้องใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ขึ้นราคาจึงเพิ่มขึ้นมาก และสามารถจุดราคาต่ำสุดสำหรับค่า  $R_E$  แต่ละค่าได้ สิ่งที่เหมาะสมโดยสรุปแล้วสามารถทำได้โดยการเลือกค่า  $R_E$  และ  $a$  ที่ให้กราฟราคา  $C_u$  ต่ำที่สุดนั่นเอง

#### 4.4.3 รูปแบบการใช้งานของระบบป้องกันการผุกร่อนโดยวิธี Cathodic Protection

การป้องกันการผุกร่อนโดยวิธี Cathodic Protection หรือ CP เกิดขึ้นก่อนที่ความรู้ด้านเคมีไฟฟ้าจะได้รับการพัฒนา Sir Humphrey Davy ทำ CP กับเรือของกองทัพเรืออังกฤษ ป้องกันแผ่นทองที่หุ้มเรือเดินทะเลเขาพบว่าสามารถป้องกันการผุกร่อนของทองแดงในน้ำทะเลได้โดยการติดเหล็กหรือดีบุกจำนวนเล็กน้อย Cathodic Protection ทำให้โลหะที่ต้องการป้องกันการผุกร่อนเปลี่ยนเป็นแคโทด แทนที่จะเป็นแอโนด ซึ่งจะเกิดการผุกร่อนได้สามารถทำได้ 2 วิธี

##### 1) Sacrificial Anode

ทำได้โดยใช้โลหะอื่นที่มีค่าความสามารถในการดึงคูดิเล็กตรอน (Electromotive force) หรือ emf ต่ำกว่า มาต่อไว้กับโลหะที่ต้องการป้องกัน และทำให้ครบวงจร โลหะที่ทำการป้องกันจะเป็นแคโทด และโลหะที่นำมาต่อไว้จะเป็นแอโนด

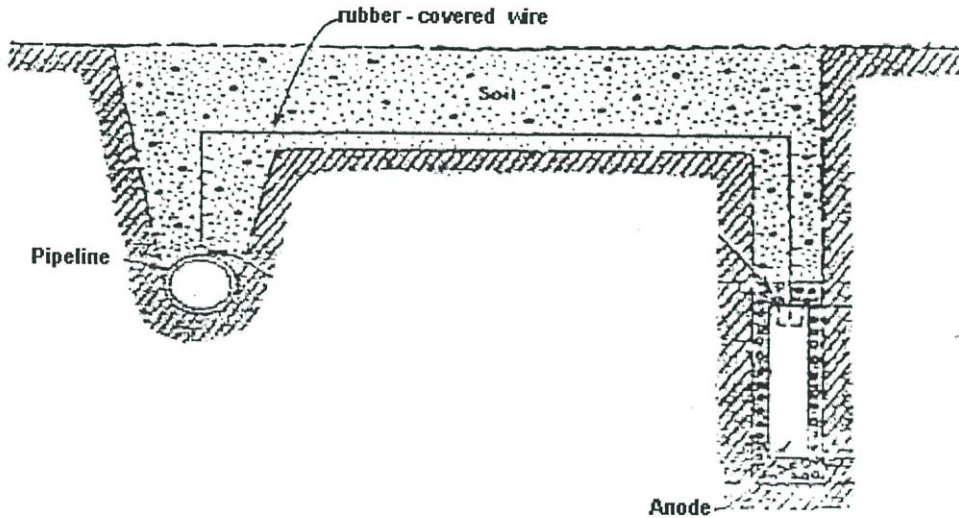
##### 2) Impressed Current

โดยใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกบังคับให้โลหะที่ต้องการป้องกันเป็นแคโทด ปริมาณกระแสไฟฟ้าต้องสูงมากพอที่จะชนะความต่างศักย์ของโลหะนั้นๆ เพื่อจะให้ระบบป้องกันการผุกร่อนนั้น มีอายุการใช้งานยาวนาน

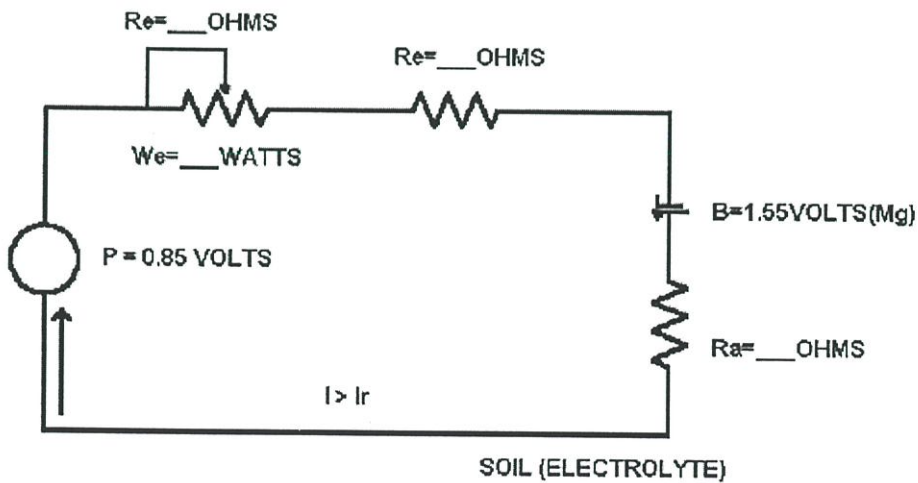
#### 4.4.3.1 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode

การป้องกันการผุกร่อนด้วยวิธีนี้ใช้ได้ดีในที่ที่ไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และในที่ที่มีค่าความต้านทานต่ำ แอโนดที่ใช้เป็นโลหะที่มีตระกูลต่ำกว่าหรือวงไว้ในการทำปฏิกิริยามากกว่า

สังกะสี อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม เป็นต้น โดยได้ทำการแสดงองค์ประกอบของระบบ และวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode ไว้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้าง หรือวัสดุที่จะป้องกัน มักมีการทาสีหรือปกคลุมผิวด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งมาแล้ว แอนโอดจึงทำหน้าที่ปกคลุมรอยแตกหรือรอยชำรุดของสีหรือวัสดุคลุมผิว เหมาะที่ใช้กับโครงสร้างที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ และต้องการอายุใช้งานนาน เช่น 10 ปี หรือ 20 ปี ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างใต้ดิน หรือใต้น้ำ ดินควรมีความต้านทานไฟฟ้าไม่เกิน 500 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 4.24 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode



รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode

โดยสามารถคำนวณค่ากระแสของระบบในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการป้องกันการผุกร่อนแบบ Sacrificial Anode ได้ดังนี้

$$I = \frac{1.55 - .0.85}{Ra + Re + Rw} \quad (4.29)$$

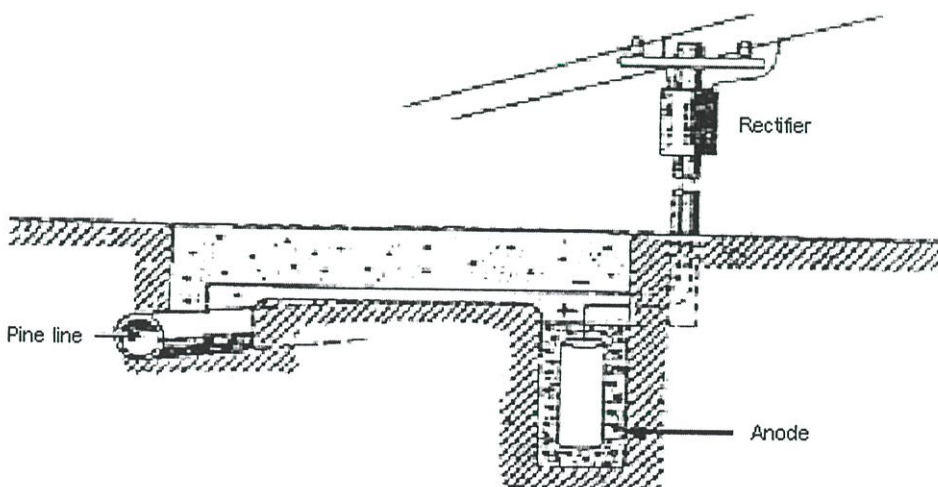
โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังนี้

$Ra$	=	Anode Resistance (Ohms)
$Rw$	=	Resistance of Winding (Ohms)
$Re$	=	Variable Resistance (Ohms)
$We$	=	Watt of Varrent Resistance (Watts)
$I$	=	Anode Current Output (Amp)
$Ir$	=	Current Requirment (Amp)

#### 4.4.3.2 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

จะใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อให้โครงสร้างที่ป้องกันเป็นแคโทด โดยต้องมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือ Rectifier แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แอโนดที่ใช้ต้องฝังลงดินหรืออยู่ในน้ำให้กระแสครบวงจร โครงสร้างหรือชิ้นงานต่อกับขั้วลบ แอโนดต่อกับขั้วบวก

โดยการพิจารณาชนิดของแอโนดที่ใช้ขึ้นกับปริมาณกระแสที่ต้องใช้มากน้อยเท่าใด เช่น เศษเหล็ก มีราคาถูก กัดกร่อนเร็วต้องใช้ปริมาณมาก กราไฟต์ใช้ในลักษณะแท่งใช้กระแส 0.1 แอมป์/ตร.ม. ถ้ามมากกว่านี้จะบวม เหล็กผสมซิลิกอน 15% ผสม โมลิบดีนัมหรือโครเมียม 3% เพราะใช้กระแส 0.4 - 0.5 แอมป์/ตร.ม. ไททานเนียมชุบทองคำขาว ใช้กระแส 5-10 แอมป์/ตร.ม.



รูปที่ 4.26 การป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

โดยสามารถคำนวณค่าแรงดันที่ระบบต้องการใช้งานสำหรับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current ได้ดังนี้

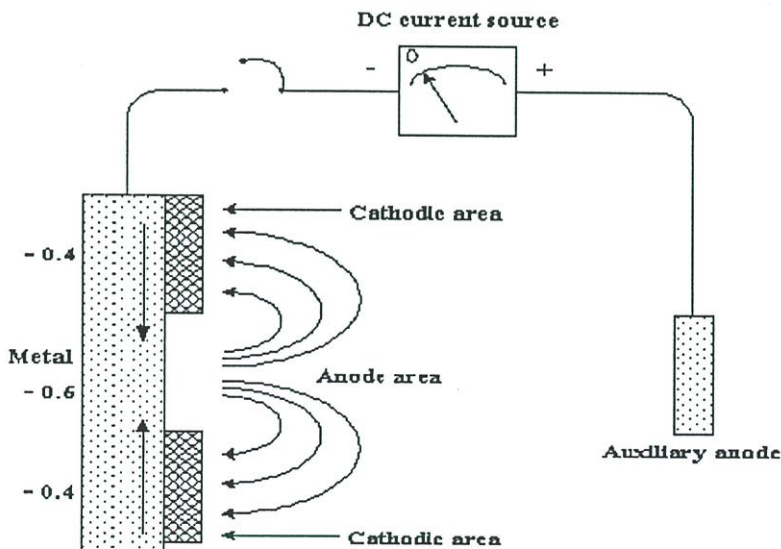
$$E = I_o * (R_a + R_w) + E_w \quad (4.30)$$

โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นดังนี้

$E$	=	O/P Voltage Required (Volts)
$I_o$	=	Max. Operating Current (Amp)
$R_a$	=	Earthing Resistance of Groundbed (Ohms)
$R_w$	=	Resistance of Wiring (Max = 0.2 Ohms)
$E_w$	=	Anode/Pipe Back Voltage (2.0 Volts)
$I_p$	=	Protective Current (Amp)

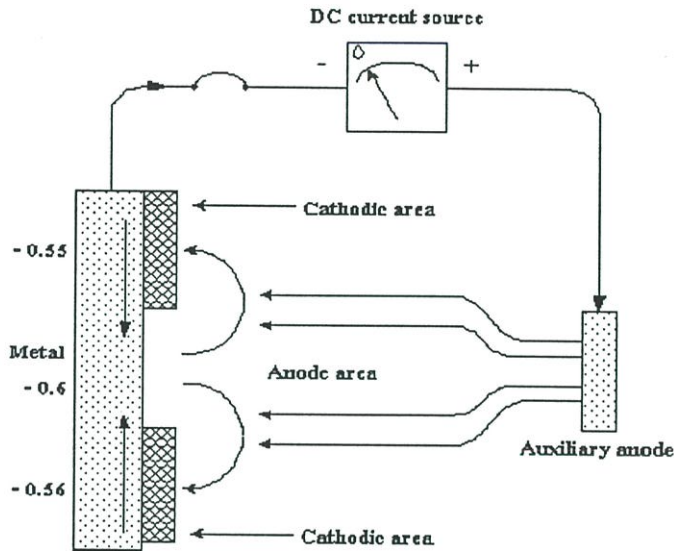
โดยมีขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้

ระยะที่ 1 : รูปที่ 4.27 ท่อโลหะถูกปกคลุมด้วยสารละลาย และยังไม่ได้มีการป้องกันการผุกร่อนทำให้โลหะตรงจุดที่เกิดความบกพร่องของฟิล์มออกไซด์เกิดการกัดกร่อนขึ้นเรียกว่าแอโนดส่วนผิวของโลหะในบริเวณข้างเคียงซึ่งไม่ได้เกิดความบกพร่องของฟิล์มออกไซด์จะไม่เกิดการกัดกร่อนเรียกว่าแคโทด ซึ่งตรงจุดที่มีการกัดกร่อนอะตอมของโลหะจะแตกร้าวออกเป็น ไอออนของเหล็กและอิเล็กตรอนอิสระตามปฏิกิริยาของ Anode Reaction[27]



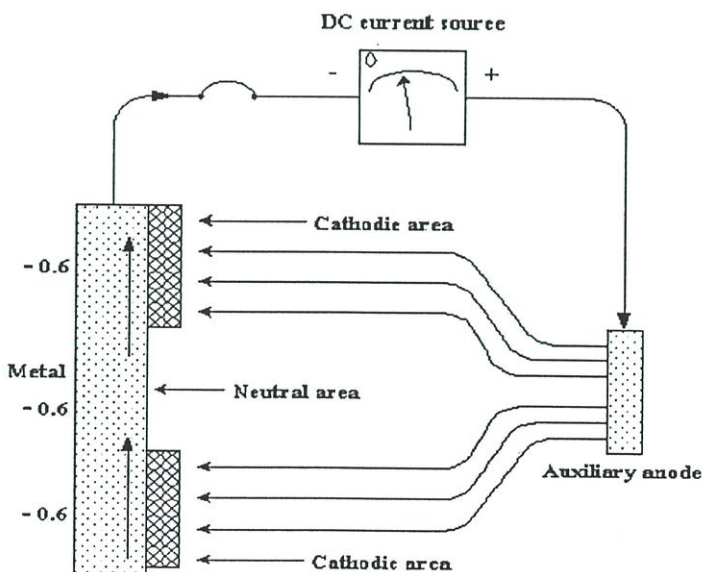
รูปที่ 4.27 สถานะของท่อโลหะที่ยังไม่ได้รับการป้องกัน

ระยะที่ 2 : รูปที่ 4.28 ในตอนเริ่มต้นของการป้องกันการผุกร่อนตัวแอโนดจะเริ่มจ่ายกระแสเพียงเล็กน้อยเข้าไปช่วยชดเชย และลดปฏิกิริยาของการผุกร่อนบางส่วน แต่ทั้งนี้โลหะยังคงมีการผุกร่อนอยู่เหมือนเดิมแต่ลดความเสียหายจากปฏิกิริยาลงอย่างช้าๆ



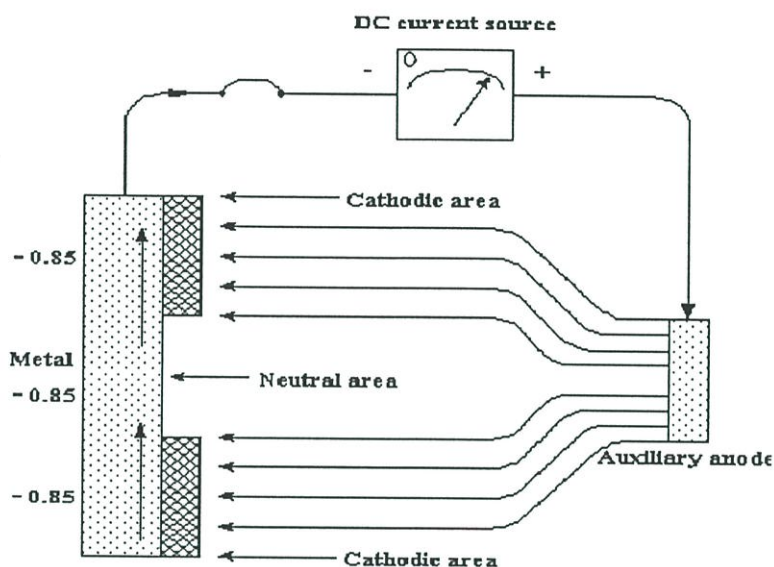
รูปที่ 4.28 สภาวะการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในระยะเริ่มต้น

ระยะที่ 3 : รูปที่ 4.29 เป็นการป้องกันการผุกร่อนในช่วงที่สมดุล ซึ่งระยะนี้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นมากเต็มที่ที่สามารถจ่ายกระแสตามสคูแคโทดเพียงพอ ซึ่งสามารถป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะได้เมื่อใช้หัวจัดแบบ  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  วัตถุประสงค์จะเห็นว่าค่า Polarization ระหว่างพื้นที่ของแอโนดและแคโทด ขณะนี้มีค่าเท่ากัน ซึ่งท่อจะหยุดการผุกร่อน แต่ยังสามารถผุกร่อนได้อีกหากมีปัจจัยตัวอื่นๆ เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.29 สภาวะการไหลของกระแสป้องกันการกัดกร่อนในช่วงสมดุล

ระยะที่ 4 : รูปที่ 4.30 เป็นการป้องกันการผุกร่อนของโลหะที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถวัดค่า Polarization ของโลหะได้มากกว่า 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งตอนนี้จะเห็นว่าปฏิกิริยาเคมีสมบูรณ์แล้ว และสามารถจ่ายกระแสได้คงที่ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE std. RP 0169-1992 section 2



รูปที่ 4.30 สภาพของท่อโลหะที่ไม่มีการผุกร่อน

หลักและวิธีการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนตามมาตรฐาน NACE Standard RP 0169-1992

มาตรฐาน NACE Standard ได้กล่าวเกี่ยวกับวิธีการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของระบบท่อไว้ดังนี้

ในการวัดและเก็บข้อมูลลดค่าความต่างศักย์ระหว่างท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซเทียบกับดินในบริเวณใกล้เคียง โดยทำการวัดด้วยมิเตอร์วัดค่าแรงดันที่มีความละเอียดสูง และหัววัด Cu/Cu<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ซึ่งขั้วลบ(-) ของมิเตอร์ต่อเข้ากับ Cu/Cu<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ส่วนขั้วบวก(+) ของมิเตอร์ ต่อเข้ากับจุดทดสอบ ซึ่งจุดนี้จะอยู่กับท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซและตัวอิเล็กโทรด ซึ่งหากท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซมีคุณสมบัติส่วนใหญ่เป็นเหล็ก ก็สามารถวัดค่าได้ประมาณ -0.55 โวลต์ ที่ 25 องศาเซลเซียส การเก็บข้อมูลของค่านี้ควรเก็บทุกจุดตามจุด Test post ที่ติดตั้งตลอดแนวท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซ ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่สำคัญมากในการเปรียบเทียบ จากนั้นก็เปิดระบบป้องกันการผุกร่อนทั้งหมด หากเป็นระบบขนาดใหญ่ควรเปิดไว้ประมาณ 24-48 ชั่วโมง

โดยปกติค่าศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติจะอยู่ประมาณ -0.55 โวลต์ แต่เมื่อเราเปิดระบบป้องกันการผุกร่อนแบบทันทีทันใดนั้น จะทำให้กระแสจากจุดแหล่งจ่ายไปกระตุ้นให้แอโนดทุกตัวปลดปล่อยพลังงานออกมาพร้อมๆ กันในรูปของแรงดัน หากเราใช้เครื่องมือวัดไปวัดค่า Polarization

จะเห็นว่าขณะนี้ค่า Polarization ระหว่างท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซกับตัวอิเล็กโทรด 1 Cu/Cu<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกว่าการแตกตัวของโมเลกุลของท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซจะค่อยๆ ลดลง และหยุดการแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะนี้ค่า Polarization มีค่าคงที่ (Steady State)

ในการทดสอบระบบนั้นต้องปิดระบบป้องกันการผุกร่อนอย่างทันทีทันใด ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันตกลงจากค่าแรงดันปกติอย่างรวดเร็ว คือ -0.85 โวลต์ หากค่า Instant off แตกต่างจากค่าศักย์ธรรมชาติมากกว่า 100 มิลลิโวลต์ขึ้นไป แสดงว่าระบบสามารถป้องกันการผุกร่อนได้ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ NACE Standard RP 0169-1992 section 6.2.2.1.3

สำหรับการออกแบบระบบป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current นั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงมีดังนี้

- ขนาดของท่อและลักษณะผิวนอกท่อ
- ลักษณะการติดตั้งของชิ้นงาน เช่น ท่อฝังดิน, ท่อใต้น้ำ
- สิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งทำด้วยโลหะ
- ระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ในสถานที่นั้นๆ

เมื่อเราทราบองค์ประกอบต่างๆ แล้วก็ทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบท่อที่ต้องการป้องกันและนำมาทำการออกแบบระบบ

■ ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

- |                               |   |     |      |
|-------------------------------|---|-----|------|
| - ท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | = | 4   | นิ้ว |
| - ความยาวของท่อ               | = | 1   | เมตร |
| - ท่ออยู่ใต้พื้นดิน           | = | 0.5 | เมตร |



รูปที่ 4.31 ท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วที่ต้องการป้องกันการผุกร่อน

■ การหากระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการป้องกันการผุกร่อนแบบ Imperss Current

1. เงื่อนไขเบื้องต้น

- จำนวนปีที่ต้องการป้องกัน = 20 ปี
- ค่าความหนาแน่นกระแส = 134.712 มิลลิแอมป์/ตารางเมตร
- ค่าสภาพต้านทานของดิน = 750 โอห์ม – เซนติเมตร

2. กระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการ

$$I_r = \frac{\text{Average Current Density} * \text{Pipe Surface Area}}{1000} \quad (4.31)$$

$$I_r = \frac{134.712 * 0.3192}{1000}$$

$$I_r = 0.043 \text{ แอมแปร์}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ระบบต้องการเป็น  $I_r = 0.043$  แอมแปร์

3. น้ำหนัก และจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้

การคำนวณน้ำหนักของแท่งแอโนดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$W = \frac{I_r * C * Y}{U} \quad (4.32)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของแท่งแอโนดที่ใช้

$I_r$  คือ กระแสที่ใช้ในระบบ มีค่าเท่ากับ 43 มิลลิแอมป์

$C$  คือ อัตราการผุกร่อนของแท่งแอโนด มีค่าเท่ากับ 8 กิโลกรัมต่อแอมป์ต่อปี

$Y$  คือ จำนวนปีที่ต้องการป้องกัน มีค่าเท่ากับ 20 ปี

$U$  คือ ค่าปัจจัยการใช้ประโยชน์ มีค่าเท่ากับ 0.85

ดังนั้นจะได้น้ำหนักของแท่งแอโนดเป็น

$$W = \frac{43mA * 20 * 8}{0.85}$$

$$W = 8.094 \text{ กิโลกรัม}$$

การคำนวณจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Quantity of Anode} = \frac{\text{AnodeWeigh} (kg)}{\text{AnodeWeigh per each} (kg / each)} \quad (4.33)$$

*Anode weigh* คือ น้ำหนักแอโนดที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 8.094 กิโลกรัม

*Anode weigh per each* คือ น้ำหนักแอโนดที่ต่อ 1 แท่ง มีค่าเท่ากับ 4.25 กิโลกรัมต่อชิ้น

เมื่อน้ำหนักของแท่งแอโนดต่อ 1 แท่งเป็น 4.25 กิโลกรัม และระบบต้องการแอโนดขนาด 8.094 กิโลกรัม จะสามารถหาจำนวนแท่งแอโนดที่ใช้ได้เป็น 1.90 ชิ้น นั่นคือการใช้แอโนด 2 ชิ้น ก็เพียงพอสำหรับระบบดังกล่าว โดยแอโนดที่ใช้เป็นชนิดแมกนีเซียมแอโนด

#### 4. ความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวตั้ง

$$Ra = \frac{0.00521\rho}{NL} \left[ 2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \left( \frac{2L}{s} * 2.3 \log 0.656N \right) \right] \quad (4.34)$$

$Ra$  : ค่าความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวตั้ง (โอห์ม)

$\rho$  : ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(Soil Resistivity) = 659.30 โอห์ม-เซนติเมตร

$N$  : จำนวนแอโนดที่นำมาต่อขนาน(Number of Anode) = 2 ชิ้น

$L$  : ความยาวของแท่งแอโนด(Anode Length) = 15 เซนติเมตร

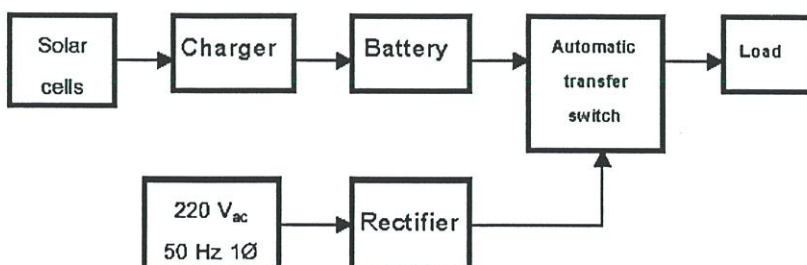
$d$  : เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งแอโนด(Diameter of Anode) = 6 เซนติเมตร

$s$  : สองเท่าของระยะความลึกแอโนด(Twice Depth of Anode) = 100 เซนติเมตร

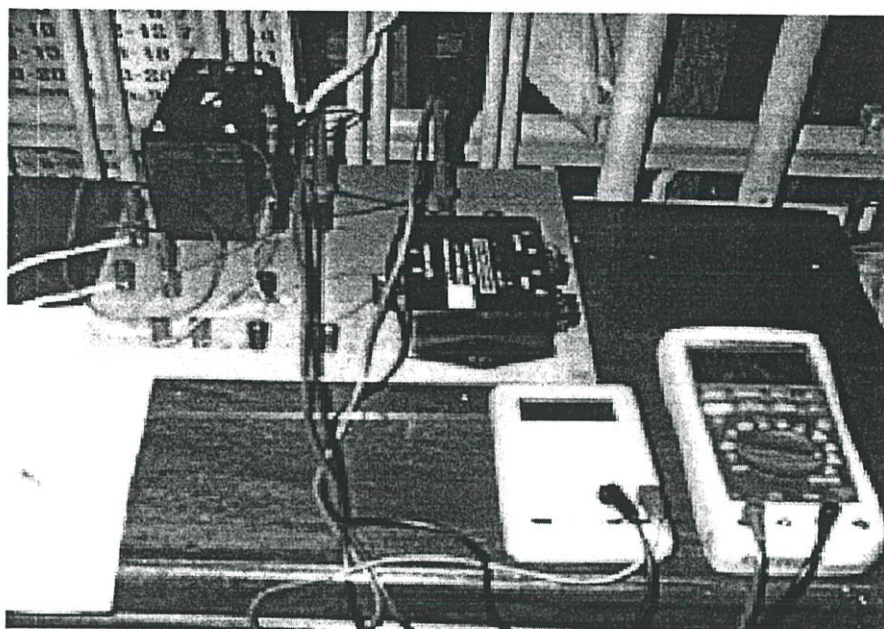
ดังนั้นจะได้ความต้านทานเมื่อมีการวางท่อในแนวอนเป็น

$$Ra = 0.2188 \text{ โอห์ม}$$

โดยมีความต้องการแรงดันของระบบเป็น  $E = 12$  โวลต์ เมื่อทราบค่าแรงดันขาออกแล้ว เราสามารถกำหนดแหล่งจ่ายไฟให้กับระบบได้ โดยควรต้องมีเผื่อการออกแบบไว้ สำหรับความผิดปกติเมื่อนำไปติดตั้งใช้งานจริง อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และองค์ประกอบ บางตัวไปจากค่าเดิมที่ได้พิจารณาไว้ในตอนต้น เช่น สภาพความต้านทานของดิน เป็นต้น



รูปที่ 4.32 ระบบการทำงานของชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ



รูปที่ 4.33 อุปกรณ์ประกอบการติดตั้งใช้งานของชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

การพิจารณาเลือกขนาดแบตเตอรี่คิดคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่ระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ ต้องการใช้ในหนึ่งวัน

$$\begin{aligned}
 \text{ใช้ไฟขนาด } 0.516 \text{ วัตต์ เป็นเวลา } 24 \text{ ชั่วโมงต่อวัน} &= 0.516 * 24 \\
 &= 12.384 \text{ วัตต์ต่อวัน} \\
 \text{คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าในหนึ่งวัน (แบตเตอรี่ } 12 \text{ โวลต์)} &= \frac{12.384}{12} \\
 &= 1.032 \text{ แอมป์ต่อวัน}
 \end{aligned}$$

โดยปกติกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวันควรอยู่ระหว่าง 20-25 % ของขนาดแบตเตอรี่หรืออย่างมากไม่เกิน 30%

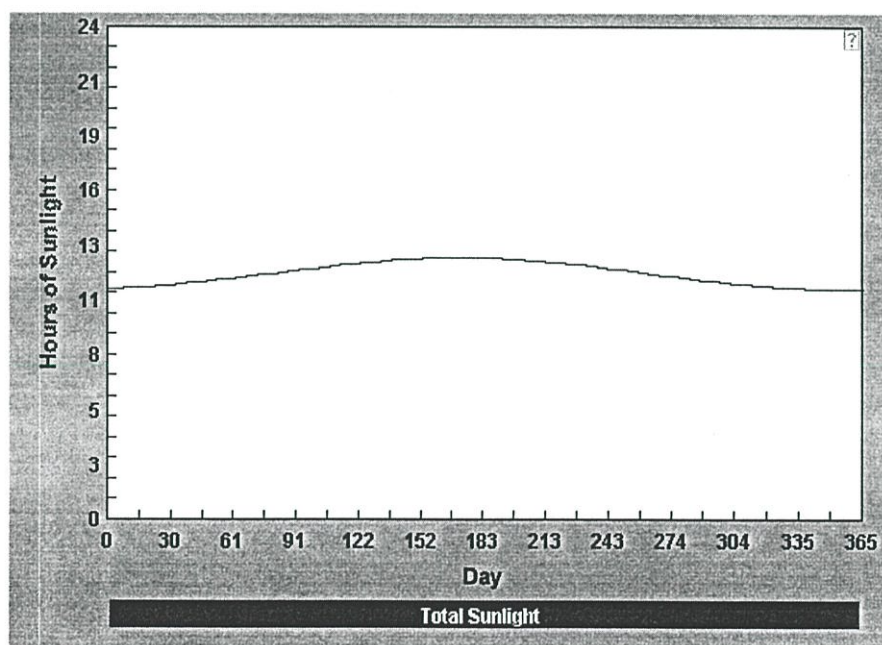
$$\begin{aligned}
 \text{โดยมีขนาดแบตเตอรี่ที่ควรใช้เป็น} &= \frac{1.032 * 100}{25} \\
 &= 4.128 \text{ แอมป์ต่อชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

แบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาด 7.5 แอมป์- ชั่วโมงที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์

เมื่อแบตเตอรี่สูญเสียกระแสวันละ 1.032 แอมป์ เพราะฉะนั้นจะต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถประจุไฟได้วันละ 1.032 แอมป์เป็นอย่างต่ำ จากการคำนวณปริมาณกระแสที่แบตเตอรี่จะต้องจ่ายให้กับชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ มีปริมาณเท่ากับ 1.032 แอมป์ต่อวัน นอกจากนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องอัดประจุกลับให้แก่แบตเตอรี่ที่มีขนาดหลังจากการเผื่อค่าแล้วเท่ากับ 4.128 แอมป์ต่อชั่วโมง เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานในวันต่อไป และมีสำรองเผื่อไว้

ในกรณีนี้อาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นกับระบบได้ การคำนวณหาขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับระบบ จากข้อมูลสถิติความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยในประเทศไทยที่สามารถใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้วันละ 5 ชั่วโมงโดยประมาณ(จากข้อมูลในภาคผนวก ก.) โดยพิจารณาพร้อมกับค่าความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยแต่ละวันในรอบปี ดังแสดงในรูปที่ 4.34 เพราะฉะนั้นขนาดกระแสที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะต้องจ่ายให้กับแบตเตอรี่เท่ากับ 0.825 แอมป์ เมื่อคิดค่าแฟกเตอร์และการเผื่อค่าต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จะใช้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น S13 ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด โดยมีพิกัดดังนี้

- ขนาดพิกัดกำลัง 13.59 วัตต์
- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.45 โวลต์
- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดดวงจร 21.46 โวลต์
- กระแสไฟฟ้าปกติ 0.83 แอมแปร์
- กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 0.92 แอมแปร์



รูปที่ 4.34 ความยาวนานแสงแดดเฉลี่ยแต่ละวันในรอบปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ

สำหรับอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ อันได้แก่ แอโนดที่ใช้เป็นชนิดแมกนีเซียมแอโนด ของบริษัท ANOTEC INDUSTRIES LTD. สายไฟฟ้าเลือกใช้ขนาด NYY 1/10 sq.mm โดยสามารถดูภาพของอุปกรณ์ประกอบต่างๆ พร้อมทั้งการพิจารณาค่าได้ในภาคผนวก ข. และภาคผนวก ช. ตามลำดับ

■ การวัดค่าเพื่อหาสภาพต้านทานของดิน

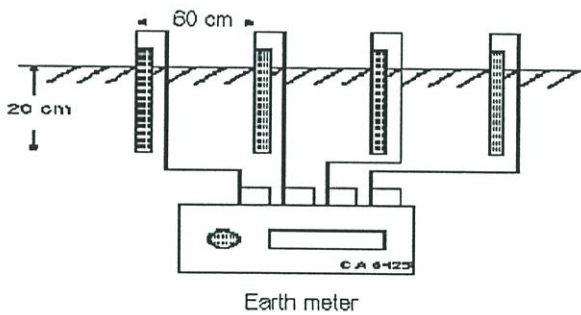
กำหนดให้ระยะระหว่างแท่งตัวนำห่างกัน	60	เซนติเมตร
ความลึกที่ปักลงในดิน	20	เซนติเมตร
เมื่อทำการวัด มิเตอร์อ่านค่าได้	1.5	โอห์ม

จาก 
$$\rho = \frac{4\pi AR}{\left[ \left(1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) \right]} \quad (4.35)$$

โดย

$\rho$	คือ	ความต้านทานจำเพาะ
$A$	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำ (เซนติเมตร)
$B$	คือ	ความลึกของแท่งตัวนำที่ปักลงในดิน (เซนติเมตร)
$R$	คือ	ค่าความต้านทานจากการทดสอบ (โอห์ม)

ในการออกแบบจึงเลือกใช้ค่าสภาพต้านทานของดิน เท่ากับ 659.30 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 4.35 วิธีการวัดเพื่อหาค่าสภาพต้านทานของดิน

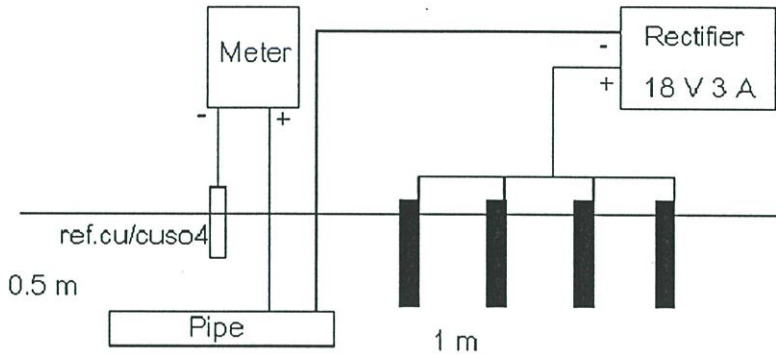
■ การหาค่าความหนาแน่นกระแส

โดยสามารถแสดงผลการคำนวณค่าได้ดังนี้

- ค่ากระแสที่อ่านได้	=	43 มิลลิแอมป์
- ท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง	=	4 นิ้ว
- ท่อมีความยาว	=	1 เมตร
- พื้นที่ของท่อโลหะที่ต้องการป้องกัน	=	$\pi * D * L$

$$= 0.3192 \text{ ตารางเมตร}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เท่ากับ 134.712 มิลลิแอมป์/ตารางเมตร



รูปที่ 4.36 วิธีการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแส

#### 4.5 บทสรุป

จากผลการคำนวณการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสมจากฟังก์ชันตัวอย่าง โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม ด้วยอันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และเส้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่า สามารถใช้แทนข้อมูลได้ถึง 100% ( $r^2 = 1$ )

จาส่วนในกรณีการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสมจากข้อมูลของระบบจริง โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม ด้วยอันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมสามารถใช้แทนข้อมูลได้มากกว่า 90% ( $r^2 > 0.9$ ) แต่ทั้งนี้ควรต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดในส่วนอื่นประกอบด้วยอันได้แก่ ค่าผิดพลาดเพราะปัดเศษ (Round-off Error) และค่าผิดพลาดเพราะตัดปลาย (Truncation Error)

การอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ผ่านมาทั้งสามรูปแบบ ความแม่นยำของการคำนวณด้วยฟังก์ชัน trapz, quad และ quad8 อย่างหนึ่งที่ควรชี้ให้เห็นก็คือถ้าหากว่าต้องการเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้นสามารถทำได้ดังนี้

- ในการใช้ trapz ให้เพิ่มจุดของการอินทิเกรตมากขึ้น
- สำหรับการ ใช้ quad8 และ quad8 สามารถทำได้โดยลดค่า tol ให้ต่ำลง โดยฟังก์ชัน quad และ quad8 กำหนดค่าเบื้องต้นไว้ที่ 0.001

## บทที่ 5

# การทดลองประยุกต์ใช้งานและผลการทดลอง

### 5.1 กล่าวนำ

ภายในเนื้อหาของบทนี้จะว่าด้วยเรื่องของการทดลอง และทดสอบระบบโดยจำลองการใช้งานตามสภาพการใช้งานจริง เช่น ผลของปริมาณพลังงานที่ได้รับสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน[28] ปริมาณกระแสที่ระบบจะได้รับจากผลของการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อใช้งานร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ พร้อมทั้งการยกตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานกัน โหลดภาระที่ใช้งานจริงคือระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ โดยระบบดังกล่าวเหมาะสมสำหรับทดลองใช้งานเนื่องจากเป็นโหลดภาระที่ต้องการกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ซึ่งตรงตามเงื่อนไขในการออกแบบระบบของวิธีการที่ได้นำเสนอ สำหรับทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดลองแต่ละหัวข้อได้มีการนำเสนอ และกล่าวไว้โดยละเอียดในบทก่อนหน้า

โดยมีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอสำหรับเนื้อหาการทดลองแต่ละหัวข้อ เพื่อนำข้อมูลและผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าและประกอบการพิจารณาตัดสินใจสำหรับออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสมต่อไป

### 5.2 การพิจารณาขนาดของระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่)

#### 5.2.1 หลักการและเหตุผล

ในหัวข้อก่อนหน้า (หัวข้อที่ 2.6 ) ได้มีการกล่าวถึงความสำคัญและความจำเป็นของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานสำหรับจ่ายพลังงานให้กับโหลดภาระในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยมีเงื่อนไขสำหรับการพิจารณาเลือกแบตเตอรี่ ได้แก่ ค่าความจุ, ชนิด, ราคาของแบตเตอรี่และอุปกรณ์ประกอบ เป็นต้น[29] โดยงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้งานแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดเป็นหลัก ค่าความจุของแบตเตอรี่เป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนด ราคาของแบตเตอรี่และอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ควบคุมระบบ (CU) ชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่ เป็นต้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในหัวข้อนี้จะได้นำวิธีการวิเคราะห์ระบบด้วยคณิตศาสตร์เชิงเลขคณิตที่กล่าวไว้ข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในการจำลองระบบ เพื่อหาค่าการอัดประจุและปล่อยประจุของแบตเตอรี่ สำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาค่าความจุที่เหมาะสมในการเลือกขนาดของแบตเตอรี่ ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ต่อไป

#### 5.2.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ใช้งานกับโหลดภาระที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน ความน่าเชื่อถือได้และความสามารถที่จะจ่ายพลังงานได้อย่างต่อเนื่องของชุดแหล่งจ่าย

น่าจะเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ แต่ด้วยเหตุที่ว่ารังสีแสงอาทิตย์ จากดวงอาทิตย์ไม่สามารถกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วทำให้เกิดพลังงานในปริมาณที่คงที่ และตลอดทั้งวันได้ แบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าอาทิตย์จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญยิ่ง ที่จะนำ พลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันสะสมเก็บไว้ และนำไปจ่ายโหลดได้ อย่างต่อเนื่อง[30] เพื่อเพิ่มความมั่นคงและน่าเชื่อถือของระบบ มิให้เกิดความเสียหายและความผิดพลาดขึ้นแก่โหลดภาระได้

สำหรับหัวข้อการทดลองนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบการพิจารณา และวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่

- หัวข้อที่ 4.2 ที่ว่าด้วยการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ด้วย กราฟคุณลักษณะ โดยนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณการอัดประจุและปล่อยประจุของ แบตเตอรี่
- หัวข้อที่ 2.3 และหัวข้อที่ 2.4 ในเรื่องการวิเคราะห์ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ สำหรับ ประกอบการพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณพลังงานที่จะได้รับจากแผงเซลล์แสง อาทิตย์กับปริมาณรังสี และอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์ เป็นต้น
- ข้อมูลในบทที่ 3 ทั้งหมด เพื่อใช้ประกอบการการวิเคราะห์หารูปแบบที่เหมาะสมกับ การวิเคราะห์ระบบตัวอย่างที่ยกมา
- หัวข้อที่ 4.2 และหัวข้อที่ 4.3 สำหรับการอ้างอิงถึงโปรแกรมที่นำมาใช้จำลองการ ทำงานและวิเคราะห์ระบบ

### เงื่อนไขการทดลอง

การจำลองการทำงานของระบบตัวอย่างโหลดภาระที่ใช้จะเป็นโหลดภาระที่ใช้กับไฟฟ้า กระแสตรง โดยให้มีการใช้งานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โปรแกรมจะจำลองการทำงานของระบบ ในลักษณะที่มีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระในตอนกลางวัน และพลังงานส่วนที่เหลือจะทำการ อัดประจุเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้แก่โหลดภาระในช่วงเวลาที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่สามารถ จ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระได้ โดยทำการทดสอบบันทึกข้อมูลภายใต้รังสีแสงอาทิตย์ และสภาพ แวดล้อมจริง

#### 5.2.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 รุ่น ประกอบด้วย

1. รุ่น BPTS 1255 HP ของบริษัทบีพีไทยโซลาร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน และมีคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นไปตาม ภาคนวทที่ ข.

2. รุ่น US 64 ของบริษัท UNITED SOLAR SYSTEM Corp. ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน และมีคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นไปตามภาคผนวกที่ ข.

สำหรับโหลดภาระที่ใช้ทดสอบเป็นโหลดไฟกระแสตรงขนาด 5 วัตต์ และ 3 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ ส่วนแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบตะกั่วกรดขนาด 70 แอมป์-ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือประกอบการทดลองเพื่อใช้สำหรับการวัดผลข้อมูล และบันทึกค่า เช่น มิเตอร์ที่ใช้วัดค่าและส่งข้อมูลในการวัดบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ คือ มิเตอร์รุ่น F41B ยี่ห้อ FLUKE พร้อมสายโพรบสำหรับวัดกระแสไฟตรง นอกจากนี้ยังได้ใช้มิเตอร์ที่มีความละเอียดอย่างน้อย 2 จุดทศนิยมมาใช้สำหรับวัดค่าแรงดัน และกระแส เพื่อบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูล สำหรับนำไปใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป คือ มิเตอร์รุ่น F89 และมิเตอร์รุ่น F77 ยี่ห้อ FLUKE ทั้งสองรุ่น

นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดข้อมูลอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ทำการทดลอง โดยใช้มิเตอร์วัดอุณหภูมิด้วยแสงอินฟราเรด รุ่น 65 ยี่ห้อ FLUKE เช่นกัน

สำหรับเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ประกอบการทดลองต่าง ๆ สามารถดูได้จากข้อมูลที่อยู่ในภาคผนวก ข.

#### การต่อระบบเพื่อทำการทดลอง

สำหรับการทดลองและบันทึกข้อมูล จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ การทดลองบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ที่ส่งข้อมูลผ่านมิเตอร์วัดค่ารุ่น F41B โดยมีการรับส่งข้อมูลและบันทึกค่าในทุก ๆ 5 นาที และอีกลักษณะหนึ่งคือการบันทึกค่าข้อมูลต่าง ๆ ด้วยการจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ค่าต่อไป ส่วนการต่อระบบเพื่อทำการทดลองจะมีการต่ออยู่ 2 ลักษณะ คือ

- 1) ทำการทดลองโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง โดยแยกเป็นชุดการบันทึกและแสดงค่าแบบอัตโนมัติจำนวน 2 แผง และการบันทึกพร้อมวิเคราะห์ค่าตามวิธีการที่ได้นำเสน่อีกจำนวน 2 แผง โดยทั้ง 2 แบบจะตั้งเงื่อนไขการทดสอบเพื่อใช้กับโหลดภาระขนาด 5 วัตต์ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์เหมือนกัน
- 2) ทำการทดลองโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง โดยแยกเป็นชุดการบันทึกและแสดงค่าแบบอัตโนมัติจำนวน 1 แผง และการบันทึกพร้อมวิเคราะห์ค่าตามวิธีการที่ได้นำเสน่อีกจำนวน 1 แผง ทั้ง 2 แบบจะมีเงื่อนไขการทดลองเพื่อใช้กับโหลดภาระขนาด 3 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์

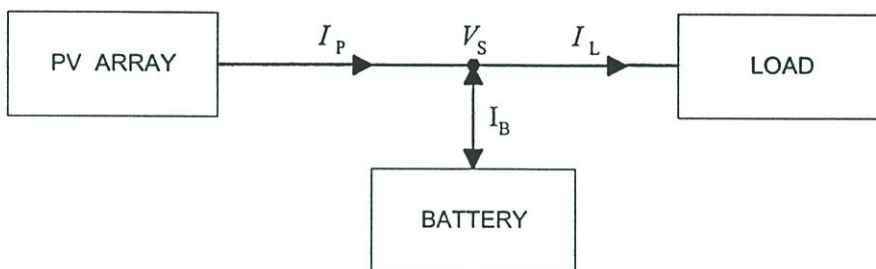
#### 5.2.4 วิธีทดสอบ

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบการทดสอบได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3 ก่อนหน้านี้ ส่วนภาพแสดงการต่อระบบทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1

##### 5.2.4.1 หัวข้อการทดสอบ

กรณีที่ 1 : ทดสอบการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระแบบต่อเนื่องด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

กรณีที่ 2 : ทดสอบการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระแบบต่อเนื่อง ด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

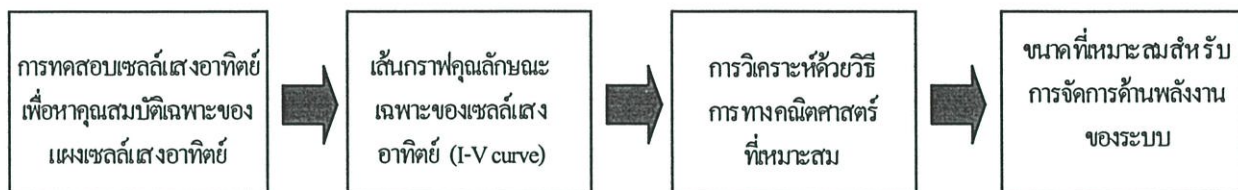


รูปที่ 5.1 การต่อระบบทดสอบการจ่ายโหลดภาระแบบต่อเนื่อง โดยมีแบตเตอรี่เป็นจุดสะสมพลังงาน

##### 5.2.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ

กรณีที่ 1 : เริ่มทำการทดสอบ โดยต่อระบบทดสอบตามรูปที่ 5.1 โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 2 แผงต่อขนานกัน เป็นแหล่งจ่ายให้กับระบบ และโหลดภาระที่ใช้ทดสอบเป็นระบบไฟกระแสดตรงขนาด 5 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบและบันทึกข้อมูลทั้งแบบที่เป็นการบันทึกอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ และการจดบันทึกข้อมูลพร้อมข้อมูลที่ได้จากการจดบันทึกค่าไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามลำดับขั้นการวิเคราะห์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องเหมาะสมในการจำลองระบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ

กรณีที่ 2 : ทำการต่อระบบทดสอบตามรูปที่ 5.1 โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 1 แผง เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน และโหลดภาระเป็นระบบไฟกระแสตรงขนาด 3 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ จากนั้นทำการทดสอบบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล เหมือนกับการทดลองในกรณีที่ 1

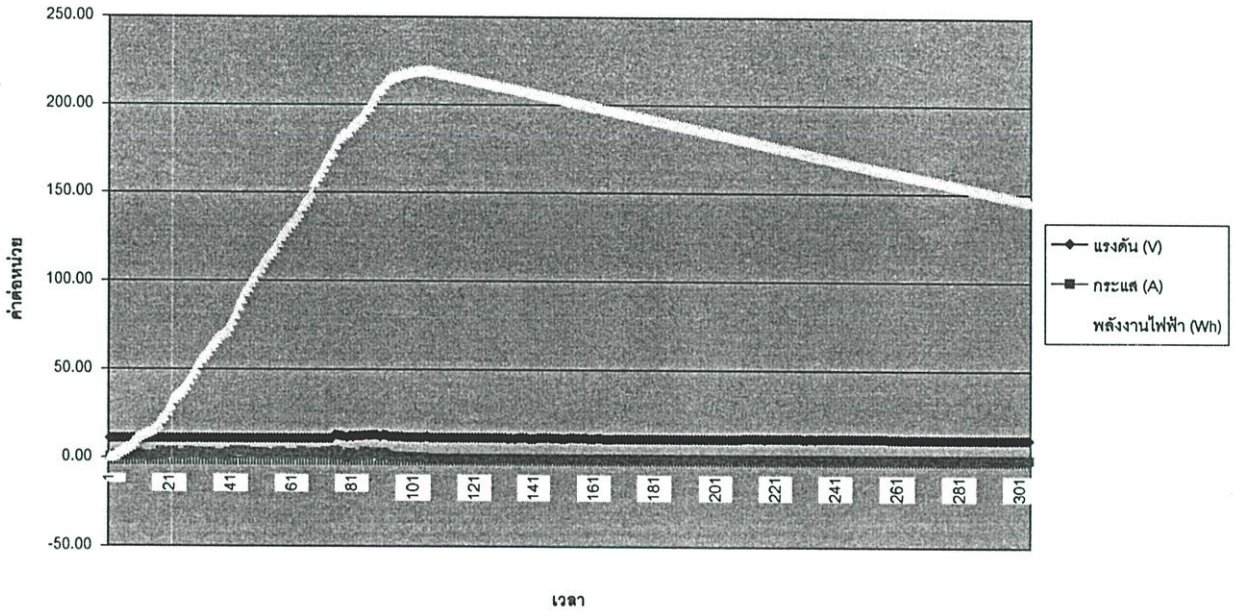


รูปที่ 5.2 ลำดับขั้นสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการจ่ายโหลดภาระแบบต่อเนื่อง ที่มีแบตเตอรี่เป็นจุดสะสมพลังงาน

### 5.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

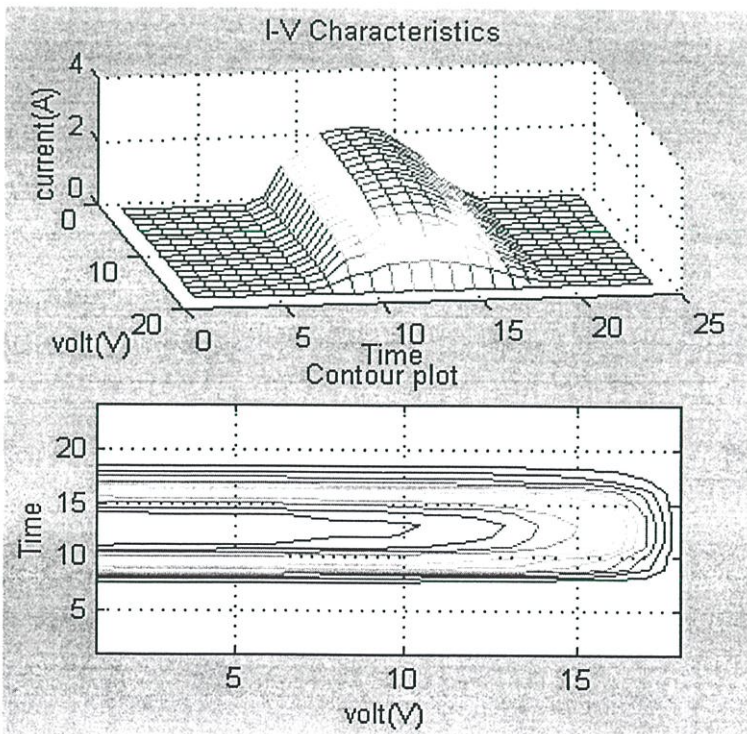
หลังจากทำการทดลองบันทึกข้อมูลทั้ง 2 ลักษณะ คือแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์และจดบันทึกค่า แล้วจะต้องนำข้อมูลที่ได้นำมาดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

- 1) สำหรับระบบที่มีการบันทึกค่าอัตโนมัตินั้นสามารถนำข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปได้ในทันที เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขที่สามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์และแสดงผลได้ในทันที เช่น โปรแกรม Excel เป็นต้น [31] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 5.3 และสามารถดูผลข้อมูลจากการทดลองได้ในภาคผนวกที่ ฉ.
- 2) กรณีที่มีการจดบันทึกค่าจะต้องนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อก่อนหน้า (ตามวิธีการที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4) โดยในการทำงานแต่ละขั้นตอนของโปรแกรมจะมีการแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในทุก ๆ ขั้นตอนผ่านทางจอภาพ และสามารถพิมพ์ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละขั้นตอนออกทางเครื่องพิมพ์ได้ อีกทั้งโปรแกรมที่ได้จัดสร้างขึ้นยังสามารถตรวจสอบ ความถูกต้องและแสดงผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละส่วน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อการแก้ไขให้ถูกต้องได้โดยสะดวก

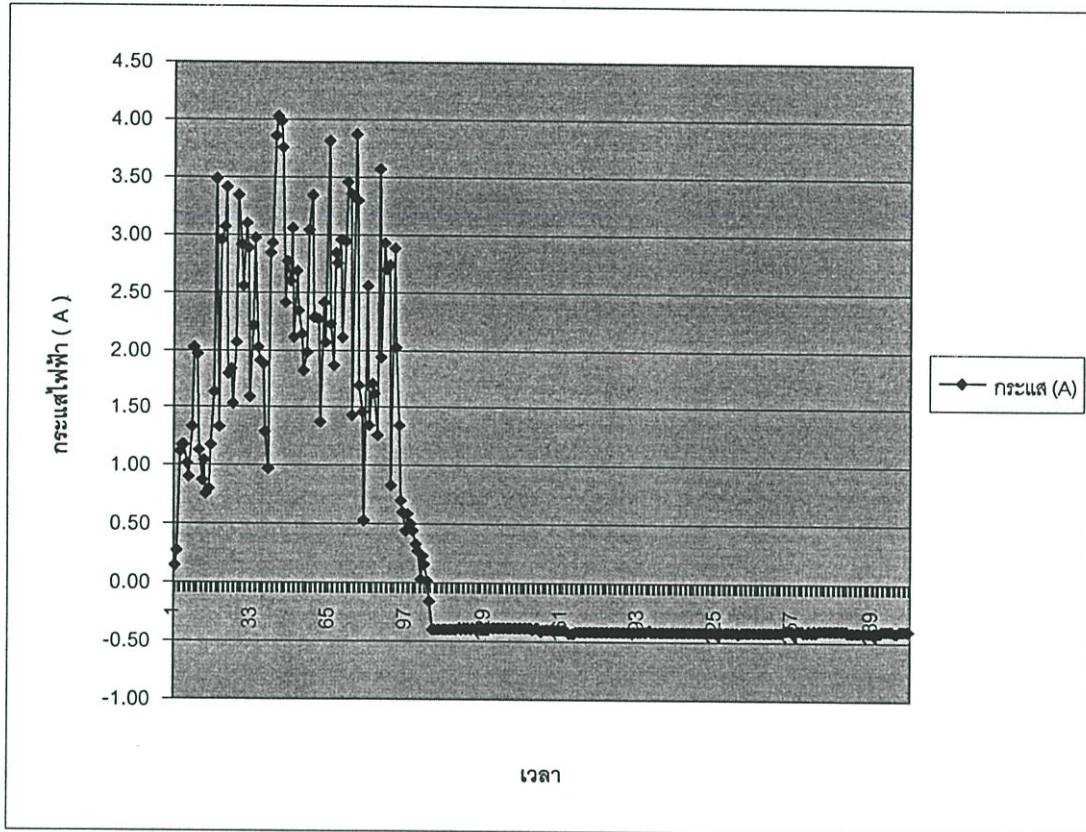


รูปที่ 5.3 การบันทึกค่าและแสดงผลด้วยโปรแกรม Excel

สำหรับตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลและการแสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมตามวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถแสดงได้ ดังนี้



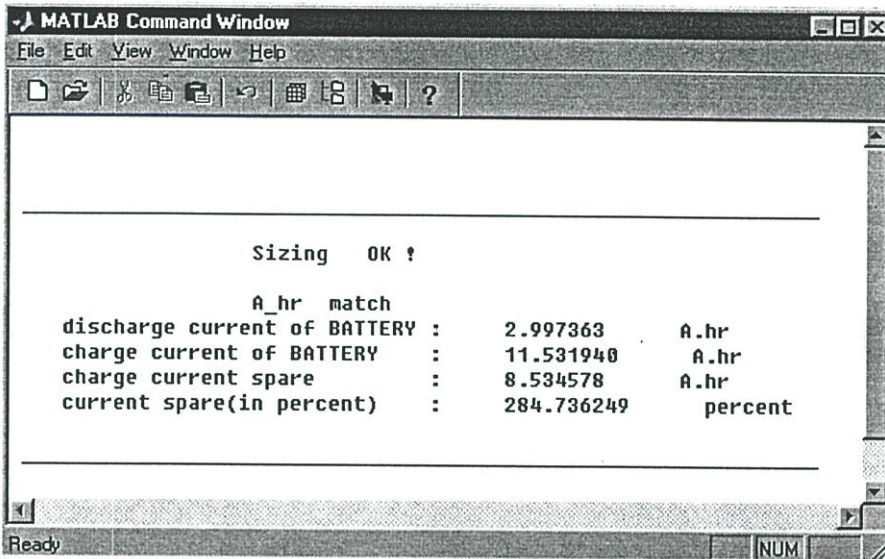
รูปที่ 5.4 ผลลัพธ์การบันทึกค่ากราฟคุณลักษณะของ กระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ กัน



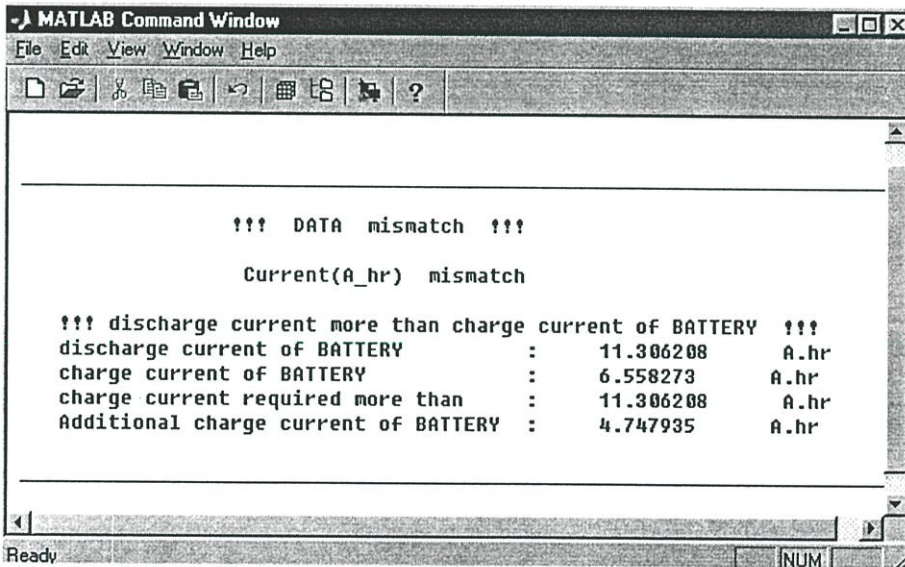
รูปที่ 5.5 ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ค่ากระแสที่แต่ละส่วนของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาตลอด 24 ชั่วโมง

นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถแสดงค่าปริมาณกระแสที่อัดประจุไว้ในแบตเตอรี่ และปริมาณกระแสที่ถูกปล่อยออกไปให้แก่โหลดภาระ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความเพียงพอหรือไม่ของปริมาณกระแสค่าดังกล่าวเมื่อใช้งานกับโหลดภาระที่ผู้ใช้ระบุมา อีกทั้งข้อมูลที่ได้ยังเป็นข้อมูลจากการทดสอบใช้งานจริง ซึ่งน่าจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริงมากที่สุด[32] โดยสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาตัดสินใจ เลือกระบบที่มีความถูกต้องเหมาะสมยิ่งขึ้น จึงนับได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบประการหนึ่งของวิธีการที่นำเสนอ ในขณะที่วิธีการคิดคำนวณแบบปกติทั่วไปไม่สามารถทำได้ พร้อมกันนี้ได้แสดงผลจากการแสดงค่าดังกล่าวสำหรับการวิเคราะห์ระบบตัวอย่างไว้ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 โดยรูปที่ 5.6 เป็นตัวอย่างในการแสดงผลจากการวิเคราะห์ระบบสำหรับกรณีที่มีความสมดุลกันของระบบ คือ ปริมาณพลังงานที่ได้รับเพียงพอที่จะจ่ายให้แก่โหลดภาระได้ ส่วนในรูปที่ 5.7 เป็นตัวอย่างการแสดงผลสำหรับกรณีที่ไม่มีความสมดุลกันของปริมาณพลังงานที่ได้รับกับปริมาณพลังงานที่ต้องจ่ายออกไปให้แก่โหลดภาระตามที่ผู้ใช้งานระบุมา ซึ่งผู้ใช้งานสามารถที่จะนำเอาประโยชน์ดังกล่าวของโปรแกรมจำลองการทำงาน of ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ มาใช้งานสำหรับการตรวจสอบการทำงานและความเพียงพอ

ของระบบ ถ้าหากมีการเปลี่ยนโหลดภาระไปเป็นค่าอื่น ๆ ที่มากขึ้นหรือน้อยลงจากเดิมได้อย่างสะดวกโดยมิต้องมีการทดสอบเก็บข้อมูลซ้ำอีก



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการแสดงผลฟังก์ชันที่ระบบมีความสมดุลกันของพลังงาน



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการแสดงผล ฟังก์ชันที่พลังงานของระบบไม่สมดุลกัน

### 5.2.6 ผลการทดลอง

กรณีที่ 1 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 2 แผง ต่อขนานกันจ่ายให้แก่โหลดภาระที่ใช้ไฟกระแสตรงขนาด 5 วัตต์ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบบันทึกข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการต่อระบบใช้งานจริงกับ โหลดภาระที่เป็นหลอดไฟ กับ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอ ซึ่งสามารถแสดงผลจากการเปรียบเทียบค่าได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน ที่โหลดภาระขนาด 5 วัตต์

พารามิเตอร์ เปรียบเทียบ	ผลลัพธ์จาก วิธีการที่นำเสนอ	ผลลัพธ์จาก การวัดข้อมูลของระบบจริง
โหลดภาระ (W)	5.00	5.00
แรงดันเฉลี่ยขณะอัดประจุ (V)	12.00	11.27
แรงดันเฉลี่ยขณะปล่อยประจุ (V)	12.00	11.10
กระแสเฉลี่ยขณะอัดประจุ (A)	2.01	1.98
กระแสเฉลี่ยขณะปล่อยประจุ (A)	0.41	0.40
พลังงานไฟฟ้าขณะอัดประจุ (Wh)	192.96	219.15
พลังงานไฟฟ้าขณะปล่อยประจุ (Wh)	78.70	73.25

กรณีที่ 2 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 1 แผง จ่ายโหลดภาระที่เป็นระบบไฟกระแสตรงขนาด 3 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลท์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำการทดสอบ บันทึกข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลเหมือนกับวิธีการที่ใช้ในกรณีที่ 1 ซึ่งได้แสดงผลจากการเปรียบเทียบค่าได้ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 64 วัตต์จำนวน 1 แผง ที่โหลดภาระขนาด 3 วัตต์

พารามิเตอร์ เปรียบเทียบ	ผลลัพธ์จาก วิธีการที่นำเสนอ	ผลลัพธ์จาก การวัดข้อมูลของระบบจริง
โหลดภาระ (W)	3.00	3.00
แรงดันเฉลี่ยขณะอัดประจุ (V)	12.00	12.26
แรงดันเฉลี่ยขณะปล่อยประจุ (V)	12.00	11.26
กระแสเฉลี่ยขณะอัดประจุ (A)	1.42	1.19
กระแสเฉลี่ยขณะปล่อยประจุ (A)	0.25	0.23
พลังงานไฟฟ้าขณะอัดประจุ (Wh)	119.28	113.70
พลังงานไฟฟ้าขณะปล่อยประจุ (Wh)	39.00	36.51

### 5.2.7 บทวิเคราะห์การทดลอง

จากผลการทดลองระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เพื่อการหาปริมาณกระแสที่อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ และปริมาณกระแสที่โหลดภาระใช้งานอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง สำหรับประกอบการพิจารณาขนาดที่เหมาะสมของชุดสะสมพลังงาน โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่แตกต่างกัน ทั้งแบบที่เป็นแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว และแผงเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสและมีการบันทึกข้อมูล แบบอัตโนมัติด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดและน่าเชื่อถือได้ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบค่าวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้ (ดูผลการทดลองได้จากหัวข้อที่ 5.2.6 และภาคผนวก ฉ.1 ประกอบ) จะพบว่าผลลัพธ์จากวิธีการที่ได้นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบระบบจริงภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกันให้ผลลัพธ์ของพลังงานที่แตกต่างกันโดยเฉลี่ยไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบยังให้สามารถแสดงผลและให้ค่าผลลัพธ์ที่จำเป็นต่อการใช้งานของผู้ออกแบบ เพื่อประกอบการพิจารณาตัดสินใจเลือกพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเหมาะสมกับโหลดภาระที่ต้องการต่อไป สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเพื่อวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์กับโหลดภาระขนาดอื่น ได้มีการนำเสนอตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลบางส่วนไว้ในบทความวิชาการที่แนบประกอบงานวิจัยนี้ตามภาคผนวก ฉ.

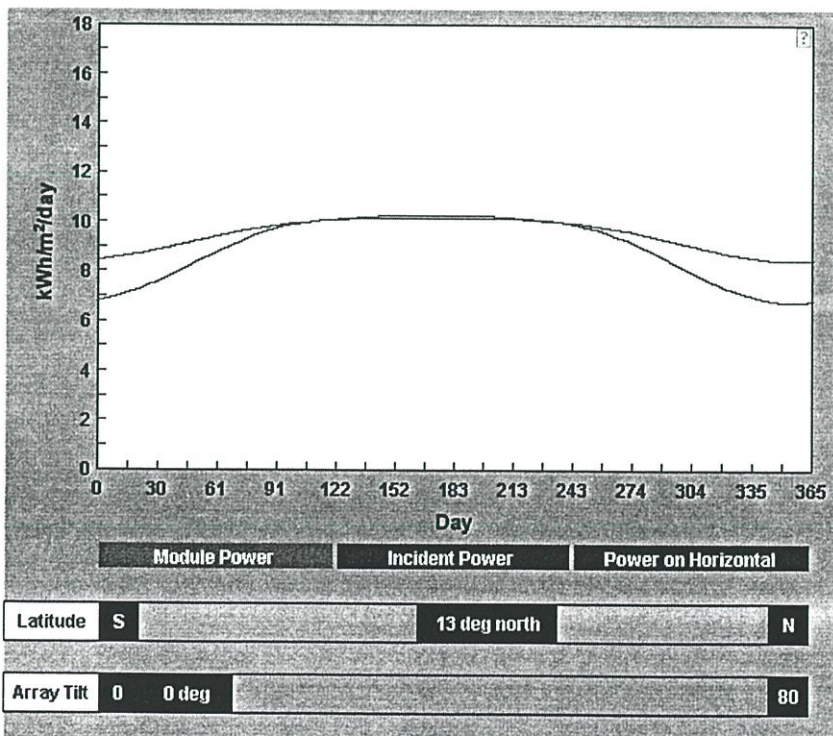
นอกจากนี้โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอยังมีจุดเด่นอยู่ที่สามารถแสดงความสมดุลของพลังงานระหว่างพลังงานที่ชุดสะสมพลังงานได้รับ และพลังงานที่จ่ายออกไปให้แก่โหลดภาระ ซึ่งเป็นการตรวจสอบระบบในเบื้องต้น และผู้ใช้งานยังสามารถที่จะทดลองเปลี่ยนค่าของโหลดภาระไปเป็นค่าอื่น ๆ ภายใต้ฐานข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้บันทึกข้อมูลค่าไว้ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ และพิจารณาข้อมูลประกอบการตัดสินใจออกแบบระบบโดยมีต้องเก็บบันทึกข้อมูลซ้ำอีก

## 5.3 การพิจารณาผลของมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

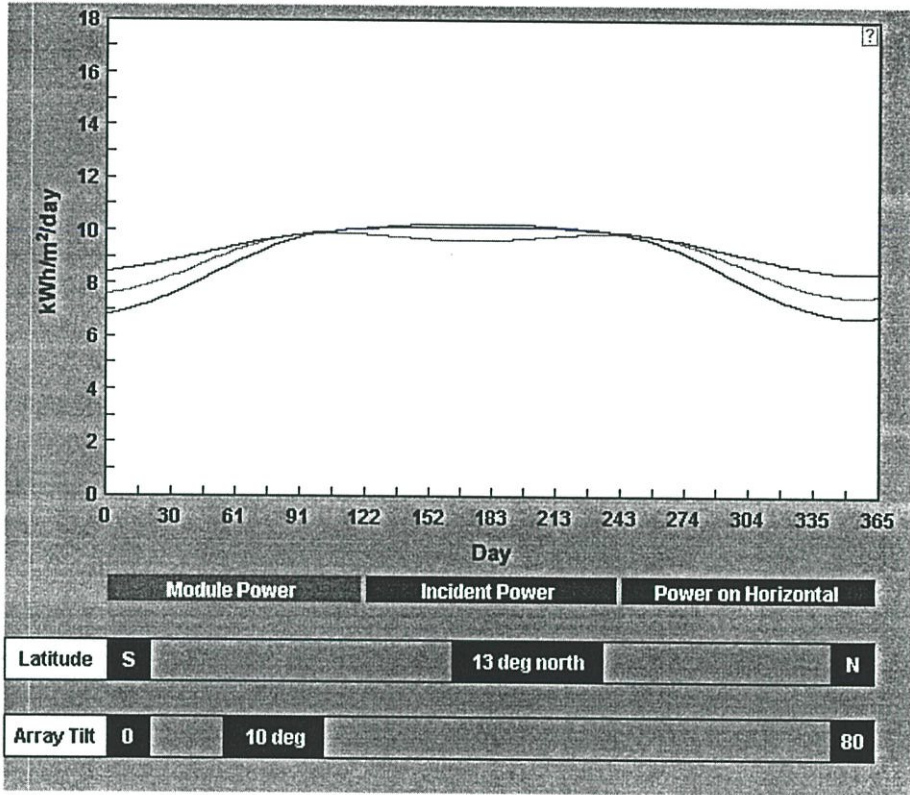
### 5.3.1 หลักการและเหตุผล

ปริมาณพลังงานที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อันได้แก่ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งแผงเซลล์, มุมเอียงของแผง, คุณสมบัติในการแปลงพลังงานของแผงเซลล์, สภาพแวดล้อมเช่น ปริมาณแสง อุณหภูมิ และความเร็วลม เป็นต้น [33] ตัวแปรและเหตุปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่จะได้รับจากแผงเซลล์มากบ้าง น้อยบ้าง เป็นสัดส่วนกันไป ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรง และเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์ โดยสามารถพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการปรับมุมเอียงค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.8 สำหรับการติดตั้งแผงเซลล์ในตำแหน่งการติดตั้งเดียวกัน มุมเอียงของแผงเซลล์ และลักษณะที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์ ก็จะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะบ่งบอกถึงปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์ ซึ่งส่งผลถึงปริมาณพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตออกมาได้

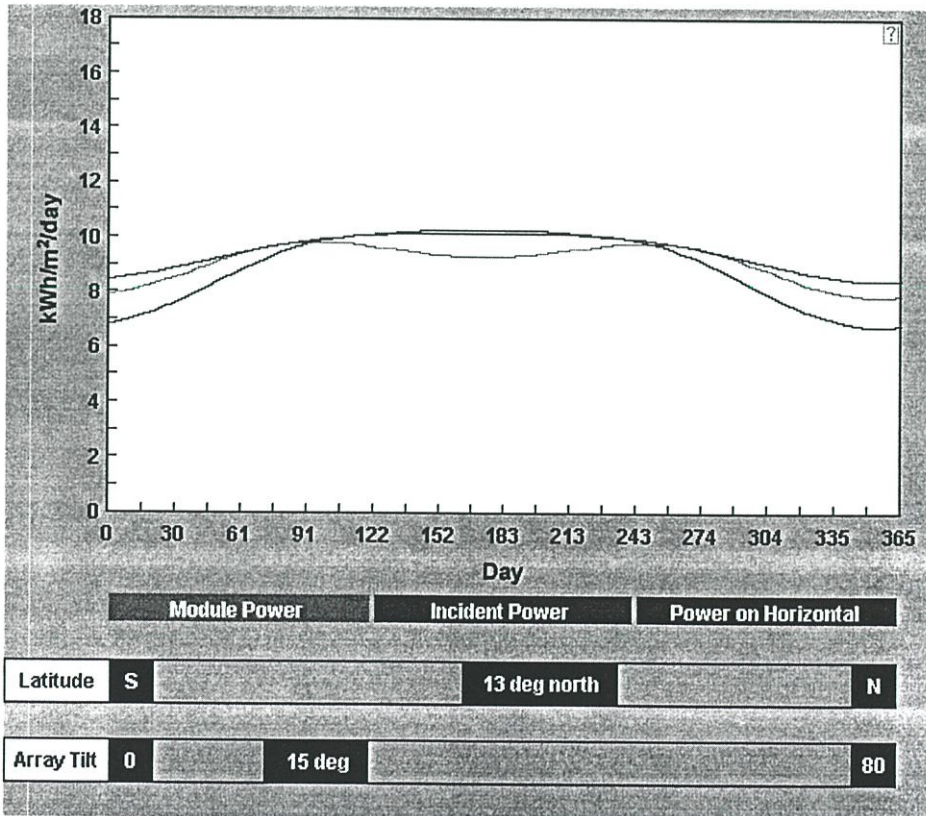
ด้วยเหตุผลดังกล่าวในหัวข้อการทดลองนี้ จะทำการพิจารณาถึงปริมาณพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตออกมาได้เมื่อมีมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกันออกไป เพื่อนำเสนอข้อมูลที่ได้ประกอบการพิจารณาตัดสินใจเลือกมุมเอียงและรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสม ทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ และปริมาณพลังงานที่ได้รับจากแผงเซลล์



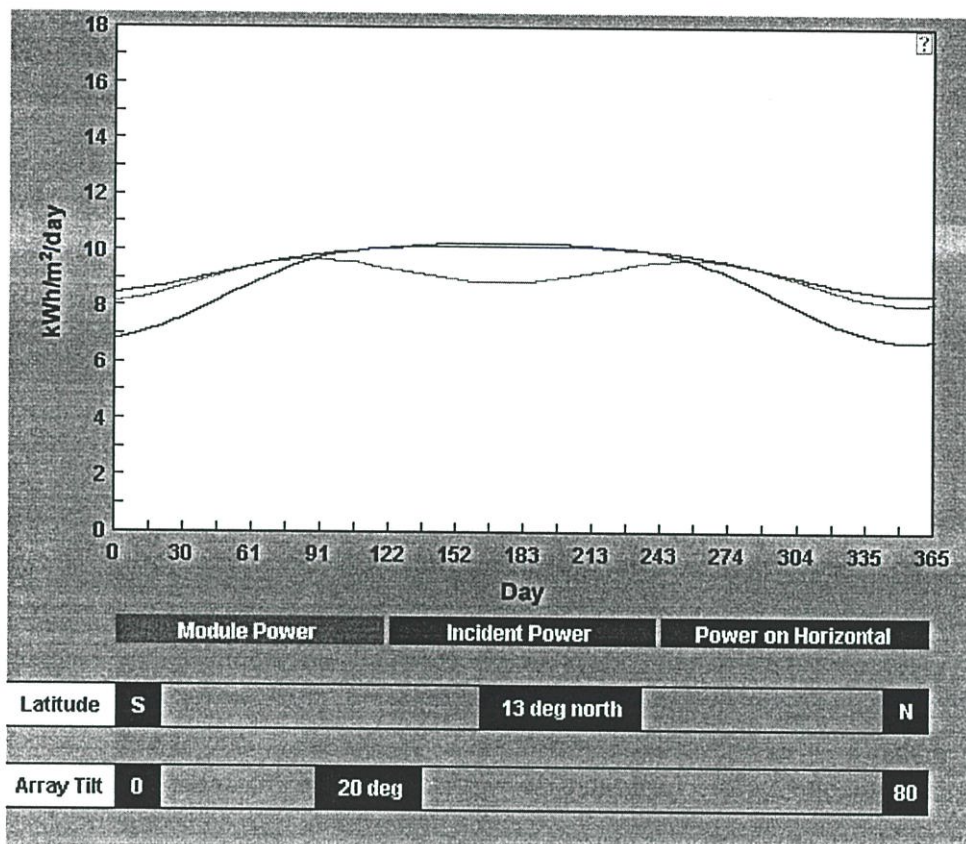
5.8 (ก)



5.8 (g)



5.8 (f)



5.8 (ง)

รูปที่ 5.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการปรับมุมเอียงค่าต่างๆ ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ

- ก) วางแผงในแนวระนาบ      ข) มุมเอียง 10 องศา  
ค) มุมเอียง 15 องศา      ง) มุมเอียง 20 องศา

### 5.3.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

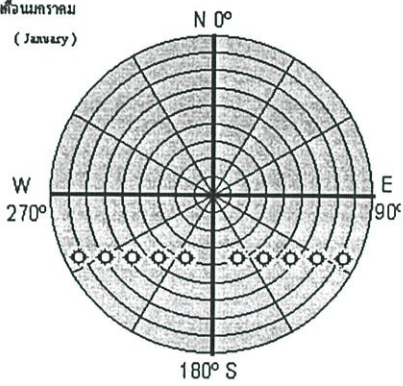
รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานกันอยู่โดยทั่วไป จะมีลักษณะที่แตกต่างกันได้แก่ การติดตั้งแบบยึดติดอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนไหว และการติดตั้งแบบที่มีการเคลื่อนที่ได้ เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ทั้งที่เป็นแบบแกนเดียว และสองแกน โดยอ้างอิงจากผลการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ ของแต่ละช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ซึ่งดูผลดังกล่าวได้จากรูปที่ 5.9

สำหรับการติดตั้งในแต่ละรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ก็ยังมีรายละเอียดที่แตกต่างกันออกไป ตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ข้างต้น เช่น การติดตั้งที่มีการเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว ในทิศเหนือ - ใต้ หรือทิศตะวันออก - ตะวันตก รวมทั้งการติดตามดวงอาทิตย์ในทิศเหนือ - ใต้ และ ตะวันออก - ตะวันตก พร้อมกันทั้งสองแกน เป็นต้น ซึ่งพลังงานที่จะได้รับในแต่ละรูปแบบการติดตั้งใช้งานก็จะให้ค่าผลลัพธ์ที่มากน้อยต่างกันไป[34]

ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องและใช้อ้างอิงประกอบการพิจารณา และวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับหัวข้อ การทดลองนี้ได้แก่

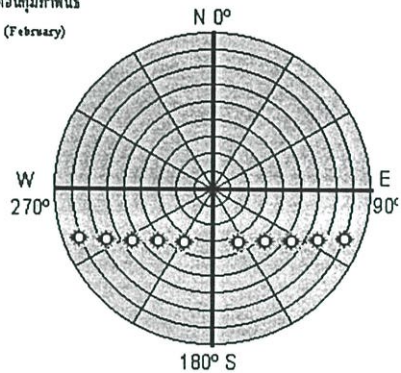
- หัวข้อที่ 2.3 และ 2.4 ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของรังสีแสงอาทิตย์ กับมุมเอียงและรูปแบบการติดตั้งใช้งานในลักษณะต่าง ๆ
- รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอไว้ในส่วนเนื้อหาของบทที่ 3 และ 4 ทั้งหมด

เดือนมกราคม  
(January)



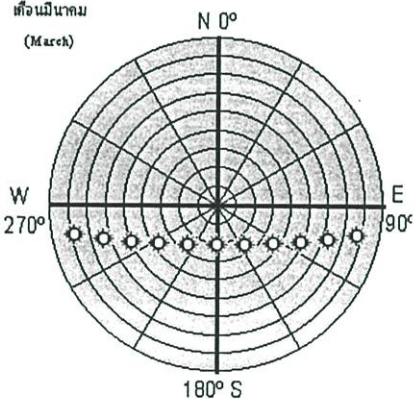
5.9 (ก)

เดือนกุมภาพันธ์  
(February)



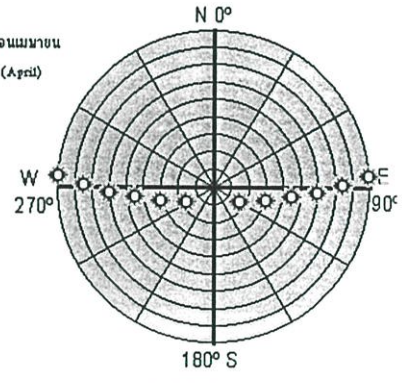
5.9 (ข)

เดือนมีนาคม  
(March)



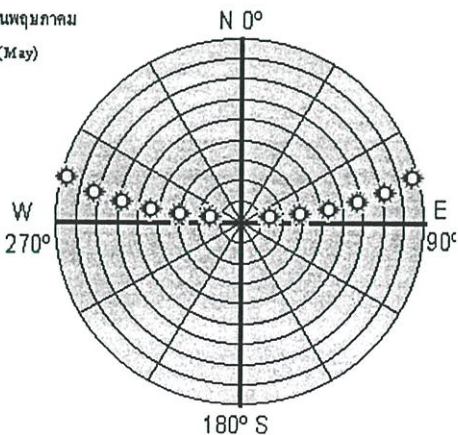
5.9 (ค)

เดือนเมษายน  
(April)



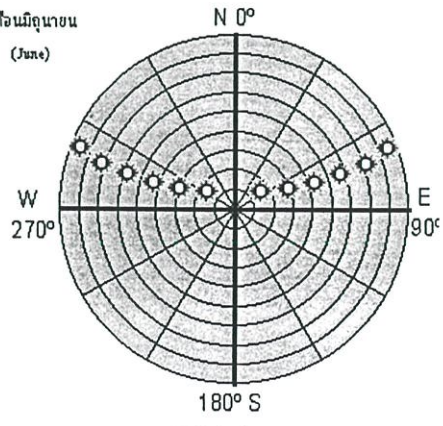
5.9 (ง)

เดือนพฤษภาคม  
(May)

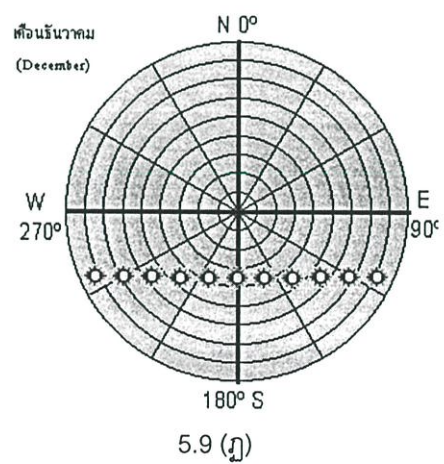
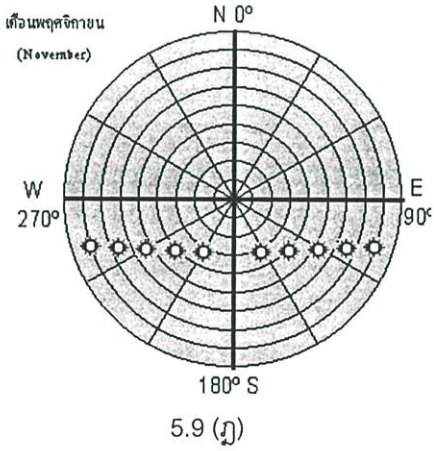
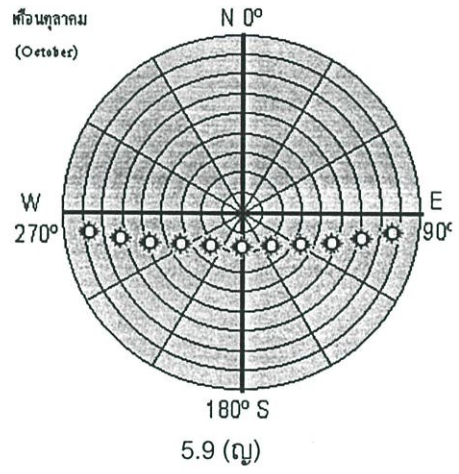
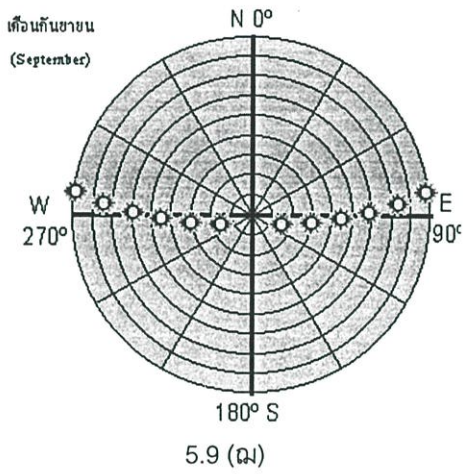
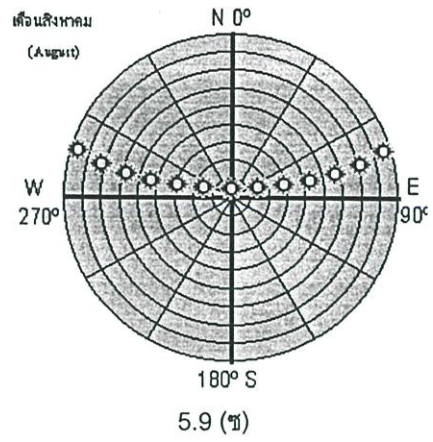
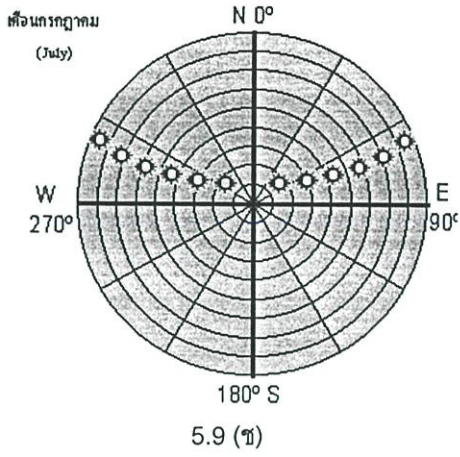


5.9 (จ)

เดือนมิถุนายน  
(June)



5.9 (ฉ)



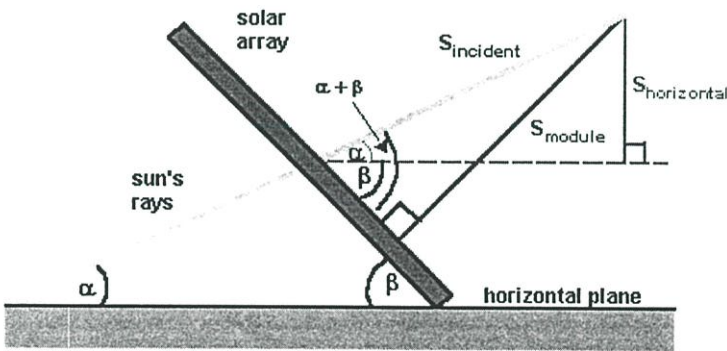
รูปที่ 5.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ ของแต่ละช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ

- |            |               |              |            |
|------------|---------------|--------------|------------|
| ก) มกราคม  | ข) กุมภาพันธ์ | ค) มีนาคม    | ง) เมษายน  |
| จ) พฤษภาคม | ฉ) มิถุนายน   | ช) กรกฎาคม   | ซ) สิงหาคม |
| ด) กันยายน | ฎ) ตุลาคม     | ฏ) พฤศจิกายน | ถ) ธันวาคม |

## เงื่อนไขการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทุกรูปแบบที่ทำการพิจารณาจะตั้งสมมุติฐานให้แผงเซลล์จ่ายพลังงานที่ได้ทั้งหมดสะสมเก็บไว้ในแบตเตอรี่ โดยยังไม่มีการจ่ายให้แก่โหลดภาระ สำหรับรูปแบบตัวอย่างที่มีการเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ที่ควรมีอุปกรณ์และกลไกภายนอกมาขับเคลื่อนระบบ ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวมีการสูญเสียและใช้พลังงานบางส่วนในการขับเคลื่อนระบบ ซึ่งยังมีได้มีการแสดงผลหรือพิจารณาข้อมูลของชุดขับเคลื่อนไว้ในขณะนี้ การทดสอบเก็บข้อมูลทั้งหมดในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบภายใต้ค่าความรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ และในสภาพแวดล้อมจริง พร้อมทั้งทำการทดสอบบันทึกข้อมูลเพื่อการพิจารณาถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ของแต่ละช่วงฤดูกาลในรอบปี

การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รายละเอียดของการวิเคราะห์มุมเอียง และรูปแบบสำหรับการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้มีการนำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.4 รวมทั้งสมการที่ใช้ประกอบการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ก็ได้มีการแสดงไว้แล้วเช่นกัน โดยรูป 5.10 ได้แสดงมุมประกอบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ผลลัพธ์ไว้ ดังนี้



รูปที่ 5.10 มุมประกอบต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณปริมาณรังสีตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยใช้สมการที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ประกอบในการคำนวณหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำค่าดังกล่าว ไปทำการควบคุมและปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการทดสอบ เก็บข้อมูลต่อไป

### 5.3.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

ในหัวข้อการทดลองนี้จะทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าในลักษณะของมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ อันได้แก่

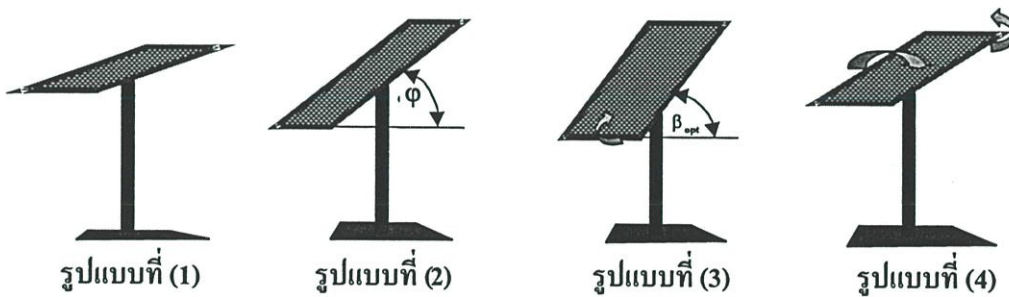
รูปแบบที่ 1 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวระดับที่ไม่มีการปรับมุมเอียง โดยติดตั้งตายตัวอยู่กับที่

รูปแบบที่ 2 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทำมุมตามตำแหน่งเส้นรุ้ง ของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และติดตั้งแบบอยู่กับที่

รูปแบบที่ 3 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการคำนวณค่าจากสมการมุมเอียงที่เหมาะสม ในแต่ละวัน (ตามการคำนวณค่าที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.4.2.2 ข้างต้น)

รูปแบบที่ 4 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอสซิเมทรี (เป็นการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน คือในแนวทิศเหนือ – ใต้ และ ตะวันออก – ตะวันตก พร้อมกัน)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในหัวข้อการทดลองนี้จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ในการทดสอบจะทำการทดสอบเก็บข้อมูลทั้ง 4 รูปแบบพร้อมกันโดยใช้รูปแบบละ 1 แผงเซลล์ เพื่อเป็นการลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรหรือปัจจัยจากสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ให้ส่งผลต่อการทดลองน้อยที่สุด แต่ละรูปแบบที่ทำการติดตั้งทดสอบสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.11 ลักษณะการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละรูปแบบที่ทำการวิเคราะห์

สำหรับโพลดการะที่ใช้ในการทดสอบเป็นโพลดการะแบบความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ ส่วนของอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้ใช้มิเตอร์ที่มีความละเอียดสามารถอ่านค่าได้อย่างน้อย 2 จุด ทศนิยม โดยเครื่องมือวัดประกอบการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ท้ายเอกสารนี้

### 5.3.4 วิธีการทดสอบ

นำอุปกรณ์ที่เตรียมไว้ มาทำการติดตั้งใน 4 ลักษณะ ตามรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 5.3.3 ดังรูปที่ 5.11

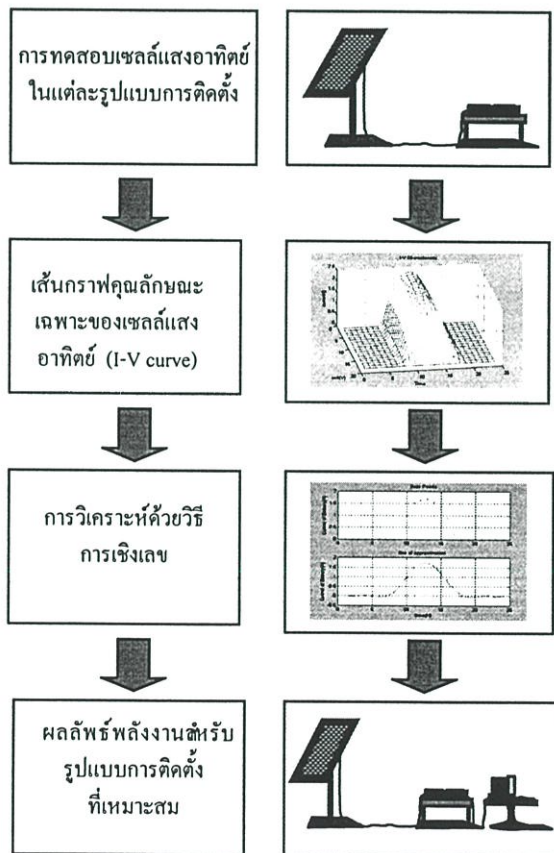
#### 5.3.4.1 หัวข้อการทดสอบ

ทดสอบหาค่าคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละรูปแบบการติดตั้งที่เวลาเดียวกัน เพื่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของพลังงานที่แผงเซลล์แสง

อาทิตย์ผลิตออกมาได้ในแต่ละรูปแบบการติดตั้ง ตลอดช่วงเวลาที่มียุติมาณรังสีแสงอาทิตย์เพียงพอ สำหรับการใช้งานกับระบบแบตเตอรี่ที่ระดับแรงดัน 12 โวลท์ได้

#### 5.3.4.2 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

ทำการทดสอบบันทึกข้อมูลของทั้ง 4 รูปแบบพร้อมกัน โดยบันทึกค่ากระแสและแรงดัน ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละรูปแบบในช่วงเวลาเดียวกัน ตลอดระยะเวลาที่มีแสงอาทิตย์ในตอนกลางวัน ตั้งแต่ช่วงเช้าจนถึงช่วงเย็นของวันโดยเฉลี่ยประมาณ 8 ชั่วโมง นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 จะทำให้สามารถทราบค่าของปริมาณพลังงานที่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรูปแบบผลิตออกมาได้ จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ต่อไป โดยมีลำดับขั้นตอนในการทดสอบเปรียบเทียบค่าแสดงได้ดังนี้



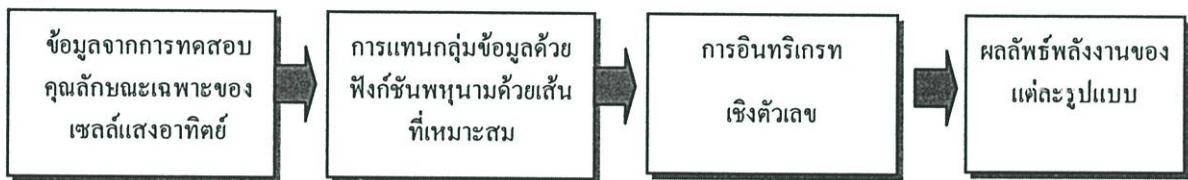
รูปที่ 5.12 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตออกมาได้ในแต่ละรูปแบบการติดตั้ง

จากการทดสอบรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์ที่แตกต่างกันสำหรับกรณีของรูปแบบที่ 3 ที่มีการปรับมุมเอียงของแผงเพื่อให้ได้ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมนั้น สามารถทำได้โดย นำค่าเลขวันใน

รอบปี(N) ที่ทำการติดตั้งทดสอบ ไปแทนค่าลงในสมการหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมในการติดตั้ง ในหัวข้อที่ 2.4 ก่อนหน้านี้ จะทำให้ได้ค่าสำหรับการปรับมุมเอียงของแผงในกรณีที่ 3 จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลและบันทึกค่าของแต่ละรูปแบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไป ส่วนกรณีของรูปแบบที่ 2 ซึ่งติดตั้งแบบตายตัวและเอียงแผงตามตำแหน่งละติจูดที่ติดตั้งแผงเซลล์ เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการติดตั้งทดสอบอยู่ ณ ตำแหน่งละติจูด 13.0 องศาเหนือ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์ของรูปแบบที่ 2 ให้หันไปทางทิศใต้โดยเอียงทำมุมกับแนวระนาบเท่ากับ 13 องศา

### 5.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อทำการทดสอบบันทึกข้อมูลจนครบตามช่วงเวลาที่ได้กำหนดได้แล้ว จะนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์คำนวณด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3 พร้อมทั้งได้แสดงลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลไว้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คำนวณดังกล่าว จะเป็นปริมาณพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตออกมาได้ในแต่ละวันของแต่ละรูปแบบการติดตั้ง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการตัดสินใจเลือกระบบที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ สำหรับผู้ที่ต้องการใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์



รูปที่ 5.13 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเชิงตัวเลขที่ได้นำเสนอ

### 5.3.6 ผลการทดลอง

ผลการทดลองบันทึกข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะด้านกระแสและแรงดัน ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละรูปแบบการติดตั้งทั้ง 4 กรณี ได้ทำการทดสอบบันทึกผลตามช่วงเวลาที่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เพียงพอต่อการใช้งานตลอดช่วงกลางวันโดยเฉลี่ย 8 ชั่วโมงใน 1 วัน พร้อมทั้งได้เก็บบันทึกข้อมูลแต่ละช่วงฤดูกาลในรอบปี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และพิจารณาค่าอื่น ๆ ต่อไปจึงทำให้มีปริมาณของข้อมูลการทดสอบค่อนข้างมาก โดยได้แสดงผลการทดสอบบันทึกข้อมูลไว้ในภาคผนวก ฉ. ท้ายเอกสาร และได้นำมาแสดงเฉพาะข้อมูลสรุปผลการวิเคราะห์คำนวณค่าแล้วเท่านั้น โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแต่ละรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เลขวัน (N)	ปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ใน 1 วัน (Ah)			
	รูปแบบที่ 1 ติดตั้งแนวระนาบ แบบตายตัว	รูปแบบที่ 2 ติดตั้งตายตัวและปรับมุม เอียงตามตำแหน่งละติจูด	รูปแบบที่ 3 ปรับมุมตามการคำนวณ มุมเอียงที่เหมาะสม	รูปแบบที่ 4 มีการติดตามดวง อาทิตย์แบบ 2 แกน
9	12.92	15.40	17.29	18.83
19	11.54	13.06	14.42	15.72
46	15.72	16.49	19.65	21.40
81	16.86	15.46	19.33	21.07
115	13.71	12.57	15.72	17.79
140	16.54	14.19	18.26	19.91
172	14.93	12.54	16.13	18.26
192	11.77	5.95 *	15.65	17.42
229	14.02	12.38	15.48	17.52
239	12.58	10.11	15.76	17.84
263	11.66	11.41	13.09	14.26
296	9.90	13.19	17.13	19.23
321	14.83	17.16	18.54	20.99
355	11.07	13.19	14.25	15.53

หมายเหตุ : N คือ เลขวันในรอบปี

- \* เป็นการแสดงค่าผลลัพธ์ ในช่วงเวลาที่ตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์อยู่เชิงไปทางทิศเหนือค่อนข้างมาก ประกอบกับเป็นช่วงฤดูฝนที่มีเมฆมาก จึงส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปรับมุมเอียงของแผงให้หันไปทางทิศใต้จ่ายพลังงานออกมาได้น้อยกว่ารูปแบบอื่น

ข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 เป็นปริมาณกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละรูปแบบการติดตั้งทั้ง 4 กรณี ที่ผลิตออกมาได้ในแต่ละวันตามช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี ปริมาณกระแสที่ผลิตได้จะถูกเก็บไว้ในในชุดสะสมพลังงานและจ่ายให้แก่โหลดภาระต่อไป ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกระบบที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานได้เป็นอย่างดี

### 5.3.7 บทวิเคราะห์การทดลอง

จากผลการทดลองวิเคราะห์ค่าการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปแบบและมุมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยให้มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอสซิมูทจะทำให้ค่าปริมาณการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในรอบ 1 วัน สูงที่สุด โดยสูงกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่นมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งนี้ควรต้องคำนึงถึงปริมาณพลังงานของระบบที่ติดตั้งแบบให้มีการติดตามดวงอาทิตย์ต้องเข้าไปในชุดขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนตำแหน่งไปของดวงอาทิตย์ได้ประกอบการพิจารณาด้วย

กรณีระบบที่มีการติดตั้งแบบอยู่กับที่ และมีการปรับมุมเอียงให้แตกต่างกันออกไปในลักษณะต่างๆ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามค่ามุมเอียงที่ได้จากการพิจารณาในสมการคำนวณค่ามุมเอียงที่เหมาะสม ( $\beta_{optimum}$ ) จะให้ค่าปริมาณการจ่ายกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรอบ 1 วัน ที่สูงกว่าการติดตั้งแบบอยู่กับที่ในรูปแบบอื่นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถได้รับแสงจากดวงอาทิตย์สูงสุดในแต่ละวันค่าของมุม  $\beta_{optimum}$  จะต้องมีการแปรเปลี่ยนค่าไปอีกด้วย

สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการศึกษาถึงรูปแบบในการติดตั้งและมุมเอียงที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับมุมเอียง  $\beta$  และมุมเอียง  $\gamma$  จะมีส่วนช่วยให้ได้รับรังสีตรงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความรับอาบรังสีรวมมีค่าสูงขึ้นได้ ทั้งนี้การปรับมุมเอียงแต่เพียงอย่างเดียวก็ช่วยได้ระดับหนึ่ง แต่ถ้ามีการปรับมุมกวาด หรือมุมแอสซิมูทของแผงให้เหมาะสม ก็ยังเป็นการเพิ่มปริมาณของรังสีตรง และปริมาณรังสีรวมได้อีกด้วย

นอกจากนี้ยังสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้นไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะอื่นได้อีกเช่น ใช้ในการประกอบการพิจารณาเลือกรูปแบบในการติดตั้งชุดรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หรือเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น เนื่องจากการนำระบบดังกล่าวมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายจะส่งผลให้มีการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น

## 5.4 การพิจารณาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์

### 5.4.1 หลักการและเหตุผล

การใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ มีพิกัดกำลังค่าสูง ๆ จะสามารถทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดย่อยมาต่อร่วมกันในลักษณะอนุกรม (กำหนดด้วยค่าแรงดันของระบบ) และการต่อกันแบบขนาน (กำหนดด้วยค่ากระแสของระบบ) ให้มีขนาดพิกัดกำลังตามความต้องการ ซึ่งค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามจำนวนแผงเซลล์ที่นำมาต่อเพิ่มแบบอนุกรม ส่วนค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับจำนวนแผงเซลล์ที่นำมาต่อกันแบบขนาน แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีผลของความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าภายในแผงเซลล์ แต่ละแผงทำให้ปริมาณพลังงานที่จะได้รับจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้ค่าตามการคำนวณค่าในทางทฤษฎี อันเกิดได้จากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของแผงเซลล์ที่นำมาต่อร่วมกัน การถูกบังเงาของแผงเซลล์บางส่วน และผลจากความไม่คู่ควรกันของเซลล์ เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวในหัวข้อการทดลองนี้จะทำการทดสอบผลของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีจำนวนแผงเซลล์และลักษณะการต่อร่วมที่แตกต่างกัน โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในแง่ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตออกมา

### 5.4.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

จากผลของความไม่เป็นอุดมคติของแผงเซลล์แต่ละแผง รวมทั้งการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติและคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน มาต่อร่วมกัน จะส่งผลให้เกิดความไม่คู่ควรกันของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม ทำให้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้จากสมการที่นำเสนอไว้ในตอนต้น (ข้อมูลในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.5 ) รวมทั้งผลจากการทำงานของบายพาสไดโอดบนแผงเซลล์ที่ติดตั้งไว้ เพื่อป้องกันความเสียหายอันจะเกิดแก่แผงเซลล์จากผลของการถูกบังเงา ก็มีส่วนทำให้เกิดความไม่เข้ากันของแผงเซลล์ในระบบได้เช่นกัน จึงจำเป็นต้องการศึกษาถึงผลกระทบที่จะเกิดแก่ระบบ รวมทั้งปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากเหตุผลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยมีทฤษฎีอ้างอิงเพื่อประกอบการพิจารณาดังนี้

- หัวข้อที่ 2.5 ได้กล่าวถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าและผลของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในลักษณะอนุกรมและขนาน
- ข้อมูลในบทที่ 3 และ 4 เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ

### เงื่อนไขการทดลอง

ทำการทดสอบและจำลองการทำงานในห้องทดลองที่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ ภายใต้ระบบแสงอาทิตย์จำลอง โดยทำการทดสอบทั้งกรณีที่ไม่มีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระ

และกรณีที่มีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระค่าต่าง ๆ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 2 กรณีเป็นเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน และเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

#### 5.4.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 รุ่น คือ

- 1) รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง
- 2) รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง

(รายละเอียดและคุณสมบัติต่าง ๆ สามารถดูได้จากภาคผนวกที่ ข ) โหลดภาระที่ใช้ทดสอบเป็นหลอดไฟขนาด 3 วัตต์, 5 วัตต์, 8 วัตต์ และ 10 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดค่ากระแส และแรงดันมีความละเอียดอย่างน้อย 2 จุดทศนิยม รวมทั้งเครื่องมือวัดที่สามารถส่งผ่านข้อมูลการทดสอบไปยังคอมพิวเตอร์ได้โดยอัตโนมัติ

การต่อระบบเพื่อทำการทดลอง

#### ตอนที่ 1 ไม่พิจารณาผลของโหลดภาระ

กรณีที่ 1 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง นำมาต่อร่วมกันทั้งแบบอนุกรมและขนาน โดยใช้จำนวนแผงที่ต่อตั้งแต่ 2 แผง, 3 แผง และ 4 แผงเซลล์ ตามลำดับ

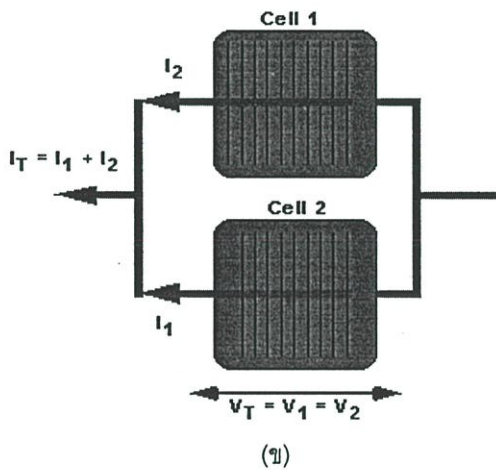
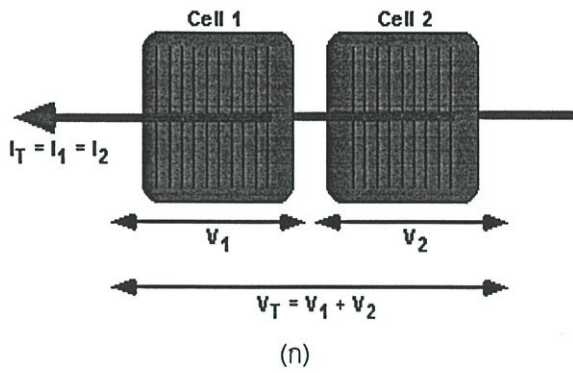
กรณีที่ 2 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง ต่อร่วมกันทั้งแบบอนุกรม และขนาน

#### ตอนที่ 2 มีการพิจารณาผลของโหลดภาระค่าต่าง ๆ กัน

กรณีที่ 1 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง โดยนำมาต่อขนานกันจำนวน 2 ชุด ชุดละ 2 แผงเซลล์ โดยมีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระขนาด 3 วัตต์, 5 วัตต์, 8 วัตต์ และ 10 วัตต์ ทำการบันทึกข้อมูลทั้ง 2 ชุด พร้อมกัน

กรณีที่ 2 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผงเซลล์นำมาต่อขนานกัน โดยมีการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระขนาด 3 วัตต์

สามารถพิจารณาผลการต่อแผงเซลล์ในแต่ละแบบได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ผลการต่อร่วมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะอนุกรม และขนาน  
 ก) การต่อแบบอนุกรม                      ข) การต่อแบบขนาน

## 5.4.4 วิธีทดสอบ

### 5.4.4.1 หัวข้อการทดสอบ

ตอนที่ 1 ในทั้งสองกรณีจะทำการทดสอบเพื่อพิจารณาพลังงานที่ชุดแผงเซลล์สามารถผลิตได้ โดยไม่คำนึงถึงผลของโหลดภาวะ

ตอนที่ 2 ทั้งสองกรณี ทำการทดสอบเพื่อพิจารณาค่าแรงดัน กระแส และพลังงานที่ชุดแผงเซลล์จ่ายให้แก่โหลดภาวะค่าต่าง ๆ

### 5.4.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ

ตอนที่ 1 ในการทดสอบทั้งสองกรณีใช้ทำการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้า (หัวข้อที่ 5.4.3) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลและนำไปวิเคราะห์คำนวณ เพื่อนำผลที่ได้มาทำการพิจารณา เปรียบเทียบค่าต่อไป

## ตอนที่ 2

กรณีที่ 1 : ทำการต่อแผงเซลล์ในลักษณะขนาน 2 แผงเซลล์ จำนวน 2 ชุด และทำการทดสอบโดยพิจารณาผลของโหลดภาระค่าต่าง ๆ กัน ทั้ง 4 ขนาด คือ 3 วัตต์, 5 วัตต์, 8 วัตต์ และ 10 วัตต์ ซึ่งมีช่วงระยะเวลาที่กำหนดสำหรับการอัดประจุ และปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ระยะเวลาการอัดประจุ และปล่อยประจุที่โหลดภาระค่าต่าง ๆ สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวชนิดกึ่งวงกลม

ขนาดของโหลดภาระ (วัตต์)	ระยะเวลาในการอัดประจุ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการปล่อยประจุ (ชั่วโมง)
3	1	1
5	1	1
8	1	1
10	2	1

กรณีที่ 2 : ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนานกัน 2 แผง แล้วทำการทดสอบชุดแผงเซลล์กับโหลดภาระขนาด 3 วัตต์ โดยกำหนดให้มีระยะเวลาในการอัดประจุ 3 ชั่วโมง และระยะเวลาในการปล่อยประจุ 1 ชั่วโมง

### 5.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการทดลองในตอนต้นที่ 1 ทั้งสองกรณีจะนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่ามาการวิเคราะห์ข้อมูล ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในตอนต้น (ข้อมูลในบทที่ 4 หัวข้อ 4.3) โดยไม่คำนึงถึงผลของโหลดภาระ

ส่วนในการทดลองตอนต้นที่ 2 ทั้งสองกรณี จะได้นำข้อมูลจากการทดสอบทั้งสองกรณีมาทำการวิเคราะห์คำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ที่ได้ ทั้งรูปแบบที่มีการบันทึกค่าอัตโนมัติ และรูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่นำเสนอ เหมือนกับหัวข้อการทดลอง ที่ 5.2.5 ข้างต้น

#### 5.4.6 ผลการทดลอง

##### ตอนที่ 1 ไม่พิจารณาผลของโหลดภาวะ

กรณีที่ 1 : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BPTS 1255 HP เป็นเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว ขนาด 55 วัตต์ โดยใช้จำนวน 4 แผง มาต่อร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ เพื่อเพิ่มพิกัดกำลังของระบบ ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ เปรียบเทียบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า จากผลการต่อรวมเซลล์ในลักษณะและจำนวนที่ต่างกันได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ปริมาณกระแสที่ได้รับจากการต่อรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่นำมาต่อร่วมกัน	ลักษณะการต่อรวม เซลล์แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่แรงดัน 12 V (วัตต์)
1	แผงเดี่ยว	7.20
2	ขนาน	16.20
3	ขนาน	25.85
4	ขนาน	31.20
2	อนุกรม	9.60
3	อนุกรม	10.80
4	อนุกรม	10.92

กรณีที่ 2 : การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น US 64 ซึ่งเป็นเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 64 วัตต์ นำมาต่อร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ ตามข้อกำหนดและเงื่อนไขในหัวข้อที่ 5.4.3 แล้วจึงนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูล และได้ผลลัพธ์เป็นดังตารางที่ 5.6

##### ตอนที่ 2 เมื่อมีการพิจารณาผลของโหลดภาวะค่าต่าง ๆ

กรณีที่ 1 : ทำการต่อรวมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนขนานกัน 2 แผง แล้วทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ เมื่อมีการพิจารณาผลของโหลดภาวะค่าต่าง ๆ โดยมีการกำหนดระยะเวลาในการอัดประจุ และปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันตามตารางที่ 5.4 ข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์และคำนวณค่าในการอัดประจุ และปล่อยประจุของแบตเตอรี่ได้ดังตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 ปริมาณพลังงานที่ได้รับจากการต่อร่วมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่นำมาต่อรวมกัน	ลักษณะการต่อรวม เซลล์แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่แรงดัน 12 V (วัตต์)
1	แผงเดี่ยว	2.08
2	อนุกรม	3.84
2	ขนาน	4.20

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบผลการอัดประจุ สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

ขนาดของโหลดภาระ (วัตต์)	ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ		
	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์-ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
3	12	1.52	18.24
5	12	1.31	15.72
8	12	1.10	13.21
10	12	2.25	27.05
ขนาดของโหลดภาระ (วัตต์)	ผลลัพธ์จากการทดสอบวัดค่าจริง		
	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
3	12.41	1.44	17.85
5	11.98	1.26	15.49
8	12.06	1.04	12.74
10	11.97	1.09	13.39

กรณีที่ 2 : ทำการต่อร่วมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนขนานกัน 2 แผง แล้วทำการทดสอบบันทึกผลโดยพิจารณาการจ่ายโหลดภาระขนาด 3 วัตต์ ที่มีระยะเวลาการอัดประจุ และปล่อยประจุเป็น 3 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ และแสดงผลการวิเคราะห์ที่คำนวณได้ตามตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบผลการปล่อยประจุ สำหรับแผงเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

ขนาดของโหลดภาระ (วัตต์)	ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ		
	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ - ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
3	12.00	0.24	2.88
5	12.00	0.41	4.92
8	12.00	0.66	7.92
10	12.00	0.83	9.90
ขนาดของโหลดภาระ (วัตต์)	ผลลัพธ์จากการทดสอบวัดค่าจริง		
	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
3	11.30	0.20	2.70
5	11.07	0.38	5.32
8	11.46	0.54	6.91
10	11.54	0.75	8.90

ตารางที่ 5.9 ผลการอัดประจุและปล่อยประจุ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนที่  
โหลดภาระ 3 วัตต์

สภาวะการทำงาน	เวลา ดำเนินการ (ชั่วโมง)	ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอ		
		แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ - ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
ช่วงการอัดประจุแบบเตอรี	3	12	0.71	8.52
ช่วงปล่อยประจุแบบเตอรี	1	12	0.25	2.99
สภาวะการทำงาน	เวลา ดำเนินการ (ชั่วโมง)	ผลลัพธ์จากการทดสอบวัดค่าจริง		
		แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
ช่วงการอัดประจุแบบเตอรี	3	11.32	0.70	7.95
ช่วงปล่อยประจุแบบเตอรี	1	11.02	0.23	2.57

#### 5.4.7 บทวิเคราะห์การทดลอง

สำหรับผลลัพธ์จากการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะและจำนวนต่าง ๆ โดยไม่พิจารณาถึงผลของโหลดภาระ ทั้งสองกรณีสำหรับแผงเซลล์ทั้ง 2 ชนิดพบว่า สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของกระแส แรงดัน และ กำลังไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นต่อเนื่องกันคล้ายคลึงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการปกติ แต่ทั้งนี้อาจจะมีในบางช่วงของการต่อร่วมที่มีผลลัพธ์คลาดเคลื่อนออกไปจากค่าที่ควรจะเป็น อันเนื่องมาจากคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แต่ละแผงที่มีความแตกต่างกันอยู่บ้างหลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง แม้แผงเซลล์นั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน มีการทดสอบ และระบุพิกัดมาเท่ากันก็ตาม

ส่วนกรณีการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดโดยมีการพิจารณาผลของโหลดภาระด้วยนั้นผลที่ได้ระหว่างข้อมูลการวิเคราะห์จากวิธีการที่นำเสนอ กับการวัดข้อมูลจริงจากเครื่องมือวัดค่าแบบอัตโนมัติ ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันโดยเฉลี่ย 10 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งเกิดจากโหลดภาระหลอดไฟที่นำมาทดสอบ มีการดึงกระแสไฟฟ้าไม่ตรงตามค่าวัตต์ที่ระบุมาจากผลของแรงดันที่ขั้วจ่ายของแบตเตอรี่ และมีจุดน่าสังเกตว่าในรูปแบบที่การต่อร่วมแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานกัน และนำไปจ่ายให้แก่โหลดภาระค่าต่าง ๆ ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการรักษาเสถียรภาพทางด้านแรงดันที่ดีกว่าการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงแผงเดียว ทั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง และสถานะแวดล้อมไป โดยสามารถพิจารณาผลลัพธ์ดังกล่าวจากทฤษฎีบทที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.5 ข้างต้น

## 5.5 ศึกษาการดึงกำลังสูงสุดด้วยโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

### 5.5.1 หลักการและเหตุผล

จากวิธีการและประโยชน์ที่จะได้รับจากการที่มีชุดควบคุมจุดกำลังสูงสุด (หัวข้อที่ 2.4) เพื่อให้สามารถใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มสมรรถนะ และเกิดประโยชน์สูงสุด มีความคุ้มค่าในแง่เศรษฐศาสตร์ อีกทั้งยังเป็นการช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบอีกด้วย ตามข้อมูลที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ข้างต้น ในหัวข้อการทดลองนี้จะนำวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตามที่ได้นำเสนอไว้ มาทำการวิเคราะห์ระบบเพื่อการศึกษาถึงผลการดึงกำลังสูงสุดด้วยโปรแกรมช่วยจำลองระบบ และนำข้อมูลที่ได้มาทำการแสดงผลเปรียบเทียบค่าเพื่อประโยชน์สำหรับการออกแบบ และพิจารณาเลือกใช้งานรูปแบบที่เหมาะสมและคุ้มค่าต่อไป

จุดเด่นของโปรแกรมจำลองการทำงานของชุดควบคุมจุดกำลังสูงสุด คือ สามารถนำฐานข้อมูลเดิมที่ได้ทำการทดสอบบันทึกผลไว้ มาทำการคิดคำนวณเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อดูผลลัพธ์ และตรวจสอบการทำงานได้ก่อนที่จะติดตั้งใช้งานจริง จึงเป็นการสะดวกและคุ้มค่าสำหรับการใช้งานระบบดังกล่าว

### 5.5.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ และคำนวณค่าต่าง ๆ ของการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังสูงสุด รวมทั้งอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ได้มีการกล่าวไว้โดยละเอียดแล้วในหัวข้อก่อนหน้าอันได้แก่

- หัวข้อที่ 2.4 ได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการพิจารณาค่าต่าง ๆ เมื่อมีการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุด
- ข้อมูลในบทที่ 3 และ 4 เป็นการนำเสนอวิธีการ และลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบดังกล่าวโดยเฉพาะในหัวข้อที่ 4.3

#### เงื่อนไขการทดลอง

การจำลองการทำงานของชุดควบคุมการดึงกำลังสูงสุดของแผงเซลล์ จะมีการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการต่อร่วมกันในลักษณะและขนาดที่ต่างกัน ส่วนการทดสอบภายใต้การรับอาบรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ จะทดสอบกับระบบที่มีการปรับมุมเอียงและรูปแบบในการติดตั้งใช้งานที่ต่างกัน เพื่อเป็นการนำเสนอข้อมูลเชิงเปรียบเทียบของทั้งสองสภาวะ

### 5.5.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจะมี 2 ชนิด คือ

- 1) รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง เป็นเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

2) รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง เป็นเซลล์ชนิดเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน สำหรับเครื่องมือวัด และอุปกรณ์ประกอบการทดลองอื่น ๆ จะใช้แบบเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา

การต่อระบบเพื่อทำการทดลอง

**ตอนที่ 1** การทดลองบันทึกข้อมูลในห้องทดสอบที่สามารถควบคุมผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้ โดยทำการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง โดยทำการทดสอบภายใต้

**กรณีที่ 1** : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ต่อร่วมกันแบบขนาน และอนุกรม จำนวน 2 แผง, 3 แผง, และ 4 แผง ตามลำดับ

**กรณีที่ 2** : ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง ต่อร่วมกัน ทั้งแบบขนานและอนุกรม

**ตอนที่ 2** การทดลองบันทึกข้อมูลภายใต้การรับอาบรังสีจากดวงอาทิตย์ สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ทำการติดตั้งแผงเซลล์แต่ละแผงที่มีมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งใช้งานที่แตกต่างกัน 4 ลักษณะโดยสามารถดูรายละเอียดต่าง ๆ ได้จากหัวข้อการทดลองที่ 5.3 ข้างต้น

#### 5.5.4 วิธีทดสอบ

##### 5.5.4.1 หัวข้อการทดสอบ

**ตอนที่ 1** ทั้งสองกรณีของการทดสอบจะทำภายใต้แสงอาทิตย์จำลองที่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ โดยจะศึกษาถึงผลของการติดตั้งงานสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการนำมาต่อร่วมกันในลักษณะและจำนวนที่ต่างกัน และใช้ข้อมูลการทดลองจากแผงเซลล์ทั้งสองชนิด

**ตอนที่ 2** ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลการติดตั้งกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรูปแบบในการติดตั้งที่แตกต่างกัน ภายใต้การรับอาบรังสีจากดวงอาทิตย์

##### 5.5.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ

**ตอนที่ 1** การทดลองสองกรณีจะใช้ระบบฐานข้อมูลจากการทดสอบบันทึกค่าเช่นเดียวกับหัวข้อการทดลองที่ 5.4 (ตอนที่ 1) มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามวิธีการและลำดับขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ใน บทที่ 3 และ 4 เพื่อศึกษาการใช้งานและวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า

**ตอนที่ 2** สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้ระบบฐานข้อมูลการทดสอบ เช่นเดียวกับหัวข้อการทดลองที่ 5.3 มาทำการศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองเดิม ที่ไม่มีการพิจารณาผลของการดึงกำลังสูงสุด

### 5.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในตอนต้นที่ 1 จะนำข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ทำการทดสอบไว้มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการตามที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 4 (หัวข้อที่ 4.3) จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองในหัวข้อที่ 5.4 (ตอนที่ 1) ซึ่งเป็นข้อมูลในกรณีที่ไม่มีพิจารณาผลของการทำงานที่จุดกำลังสูงสุด

ส่วนในตอนต้นที่ 2 จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้านพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรูปแบบจะผลิตออกมาโดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละรูปแบบ เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.3

### 5.5.6 ผลการทดลอง

**ตอนที่ 1** การทดลองภายใต้ระบบแสงอาทิตย์จำลอง

**กรณีที่ 1** : เป็นการศึกษาผลของการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ที่มีการต่อร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ และนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลในกรณีที่ไม่มีพิจารณาการทำงานที่จุดกำลังสูงสุด โดยเสนอผลการเปรียบเทียบค่าไว้ในตารางที่ 5.10

**ตารางที่ 5.10** ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อร่วมกัน	ลักษณะการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด (วัตต์)
1	แผงเดี่ยว	8.51
2	ขนาน	16.62
3	ขนาน	25.86
4	ขนาน	34.09
2	อนุกรม	17.68
3	อนุกรม	23.33
4	อนุกรม	34.03

กรณีที่ 2 : เป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าจากผลการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุด ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนขนาด 64 วัตต์ จำนวน 2 แผง ที่มีการต่อกันแบบขนานและอนุกรมและแสดงผลลัพธ์การเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกัน	ลักษณะการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด (วัตต์)
1	แผงเดี่ยว	2.40
2	อนุกรม	4.24
2	ขนาน	4.26

ตอนที่ 2 ผลการทดลองในหัวข้อนี้ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.12 ซึ่งเป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าของการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง ที่มีการปรับมุมเอียง และรูปแบบในการติดตั้งแตกต่างกัน 4 ลักษณะ โดยทำการทดสอบการรับอาบรังสีภายใต้ดวงอาทิตย์ทั้ง 4 รูปแบบ (ดูรายละเอียดของแต่ละรูปแบบการติดตั้งได้จากหัวข้อที่ 5.3)

ตารางที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลการดึงพลังงานสูงสุดกับวิธีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ

เลขวัน (N)	ปริมาณพลังงานที่จุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( Wh )			
	รูปแบบที่ 1 ระนาบแบบตาย ตัว	รูปแบบที่ 2 ติดตั้งตายตัวและปรับมุม เอียงตามตำแหน่งละติจูด	รูปแบบที่ 3 ปรับมุมตามการคำนวณ มุมเอียงที่เหมาะสม	รูปแบบที่ 4 มีการติดตามดวง อาทิตย์แบบ 2 แกน
9	194.64	200.88	234.00	249.84
19	150.00	168.12	187.44	205.68
46	206.40	224.04	265.80	290.52
81	232.80	198.00	243.72	278.04
115	173.40	158.88	205.68	231.00
140	240.72	184.56	216.84	258.72
172	194.76	149.64	210.48	240.60
192	153.00	* 89.28	193.44	229.32
229	187.20	162.60	188.16	230.76
239	166.44	124.44	205.92	234.48
263	175.44	146.04	165.96	181.92
296	125.04	174.36	210.60	254.28
321	194.52	221.04	244.80	273.96
355	143.16	170.64	187.32	199.20

หมายเหตุ : N คือ เลขวันในรอบปี

\* เป็นการแสดงค่าผลลัพธ์ ในช่วงเวลาที่ตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์อยู่เอียงไปทางทิศเหนือค่อนข้างมาก ประกอบกับเป็นช่วงฤดูฝนที่มีเมฆมาก จึงส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปรับมุมเอียงของแผงให้หันไปทางทิศใต้จ่ายพลังงานออกมาได้น้อยกว่ารูปแบบอื่น

### 5.5.7 บทวิเคราะห์การทดลอง

จากการศึกษาผลการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุด ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ที่มีการต่อร่วมกันในลักษณะและจำนวนที่ต่างกัน ค่าพลังงานที่แผงเซลล์สามารถผลิตได้จะสูงกว่าโดยเฉลี่ย 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่พิจารณาผลการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุดก่อนหน้า

ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิกอน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่พิจารณาการทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุด จะมีค่าสูงกว่าโดยเฉลี่ย 8 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตออกมาได้ เมื่อมีการใช้งาน ณ จุดกำลังสูงสุด กับการติดตั้งใช้งานในลักษณะที่ไม่มีการควบคุมกำลังสูงสุด โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีรูปแบบของการติดตั้งใช้งานที่แตกต่างกันพบว่า การดำเนินการที่จุดกำลังสูงสุดจะให้ผลลัพธ์ของผลลัพธ์ของพลังงานที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการพิจารณาจุดกำลังสูงสุดรวมด้วย โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยที่สูงกว่าสำหรับแต่ละรูปแบบ เป็นดังนี้

- รูปแบบที่ 1 สูงกว่า 5.27 เปอร์เซ็นต์
  - รูปแบบที่ 2 สูงกว่า 8.32 เปอร์เซ็นต์
  - รูปแบบที่ 3 สูงกว่า 11.0 เปอร์เซ็นต์
- และ - รูปแบบที่ 4 สูงกว่า 9.41 เปอร์เซ็นต์

จากผลดังกล่าวทำให้สามารถพิจารณาตัดสินใจเลือกใช้งานควบคุมการติดตั้งกำลังสูงสุดสำหรับแต่ละกรณีตัวอย่างที่ยกมาได้ตามความเหมาะสมทั้งทางด้านพลังงานที่ได้รับ และผลของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่ทั้งนี้ข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้นำเสนอไว้ ยังมีได้มีการพิจารณาผลอื่นเนื่องจากการสูญเสียต่าง ๆ อันจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในชุดควบคุมการติดตั้งกำลังสูงสุด ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเหมาะสมควรได้มีการศึกษาและพิจารณาผลของการสูญเสียดังกล่าว เพื่อประกอบการพิจารณาตัดสินใจร่วมด้วย

## 5.6 กรณีศึกษาการจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานกับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ (ส่วนที่ 2 : การทดสอบระบบจริง)

### 5.6.1 หลักการและเหตุผล

ในหัวข้อการทดลองนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของวิธีการที่ได้นำเสนอ กับ โหลดภาระที่มีการใช้งานจริงโดยมีระยะเวลาการใช้งานต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เพื่อดูผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับ การทดสอบวัดจากข้อมูลจริง ในที่นี้ได้ทำการเลือกโหลดภาระที่ทำการทดสอบเป็นระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ (Cathodic Protection) ทั้งนี้เพราะระบบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานของวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในตอนต้น คือ เป็นระบบที่มีการใช้พลังงานตลอด 24 ชั่วโมง อีกทั้งระบบดังกล่าวยังต้องการความน่าเชื่อถือของระบบที่สูง ด้วยเหตุที่ว่าถ้าระบบดังกล่าวมีการขาดความต่อเนื่องของพลังงานไฟฟ้าไปในบางช่วงเวลาจะส่งผลให้ท่อโลหะที่ต้องการป้องกันเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมดุล[35] ซึ่งจะทำให้ท่อโลหะเกิดการผุกร่อนและเป็นสนิมได้ วิธีการที่ได้นำเสนอไว้จึงมีความเหมาะสมสำหรับการพิจารณาแบบดังกล่าว

### 5.6.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง

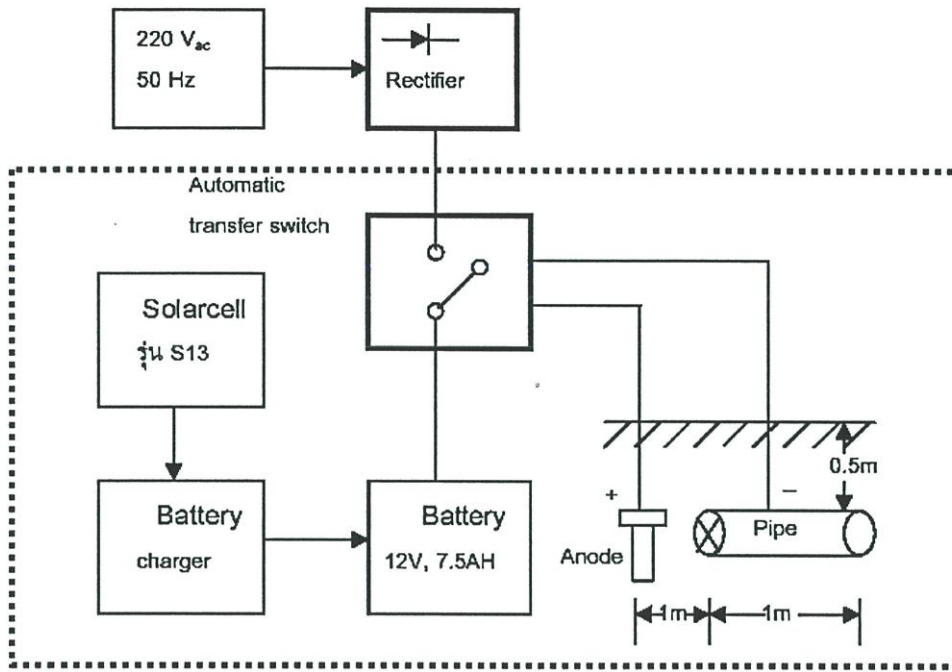
สำหรับหลักการในการออกแบบ และวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ของชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะด้วยระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังนี้

- หัวข้อที่ 4.4 ซึ่งได้กล่าวถึงวิธีการพิจารณาและออกแบบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ
- หัวข้อในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ระบบ ตามแนวทางที่ได้นำเสนอ

โดยรูปที่ 5.15 ได้แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current ที่ใช้ในหัวข้อการทดลองนี้

เงื่อนไขการออกแบบ

ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่และอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ จะเป็นชุดแหล่งจ่ายหลักที่จะป้อนพลังงานให้แก่ระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ โดยมีระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายสำรอง ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีการชำรุดเสียหายจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้อีก[36] ทั้งนี้เนื่องจากข้อกำหนดของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะที่จะต้องมีการจ่ายพลังงานจากภายนอกป้อนให้กับระบบอยู่ตลอดเวลา มิฉะนั้นท่อโลหะจะเกิดการผุกร่อนและเป็นสนิมขึ้นได้



รูปที่ 5.15 องค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current

### 5.6.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

อุปกรณ์ประกอบการทดลองสำหรับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะทั้งในส่วนของคุณค่าแหล่งจ่ายพลังงาน และโหนดการะมีดังต่อไปนี้

#### 1) ชุดโหนดการะมีรายละเอียดดังนี้

- ท่อโลหะมีลักษณะดังรูป 5.16
  - ท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว
  - ท่อมีความยาว 1 เมตร
  - ต้องการฝังลึกจากพื้นดิน 0.5 เมตร



รูปที่ 5.16 ท่อโลหะที่ใช้ทดสอบการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

เมื่อนำมาคำนวณความต้องการพลังงานไฟฟ้าของโหลดการจะได้อัตราผลดังนี้ ระดับแรงดันใช้งานที่ 12 โวลต์ ความต้องการกระแส 43 มิลลิแอมแปร์ ต้องการพลังงานตลอด 24 ชั่วโมง

- ชุดแอโนดที่ใช้กับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ (ดังรูปที่ 5.17)
  - เป็นโลหะชนิดแมกนีเซียม
  - น้ำหนัก 0.8 กิโลกรัม
  - จำนวน 1 แท่ง



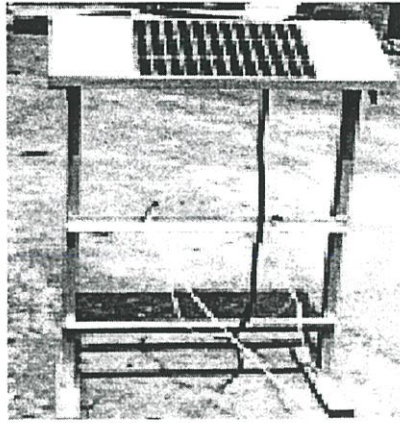
รูปที่ 5.17 แอโนดชนิดแมกนีเซียมที่ใช้กับชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current

## 2) ชุดแหล่งจ่ายพลังงาน

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ดังรูปที่ 5.18)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

- ขนาดพิกัดกำลัง 13.59 วัตต์
- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.45 โวลต์
- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร 21.46 โวลต์
- กระแสไฟฟ้าปกติ 0.83 แอมแปร์
- กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 0.92 แอมแปร์

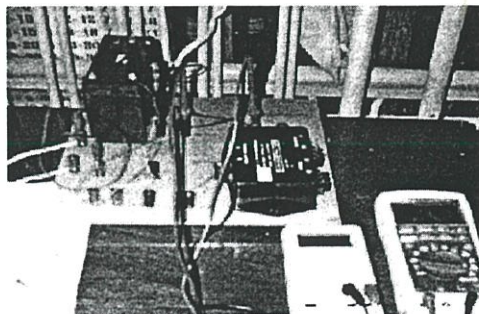


รูปที่ 5.18 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กับชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current

- แบตเตอรี่ เป็นแบบตะกั่วกรดชนิดปิดผนึก มีขนาดความจุ 7.5 แอมแปร์ – ชั่วโมง แรงดันใช้งาน 12 โวลต์
- ชุดควบคุมการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ เป็นชุดควบคุมการประจุของแบตเตอรี่ที่มีการป้องกันการอัดประจุเกิน และป้องกันกระแสที่ย้อนกลับจากระบบได้
- สวิตช์ถ่าย โอนอัตโนมัติเป็นอุปกรณ์ที่คอยควบคุมการทำงานระหว่าง ชุดแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ กับ ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ไม่สามารถใช้งานได้ เพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพของระบบและป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นกับโพลดภาวะ
- ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า (ชุดจ่ายกำลังสำรอง) เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จ่ายผ่านชุดแปลงผันไฟตรง (Rectifier) ให้ได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดัน 12 โวลต์ เพื่อจ่ายให้แก่โพลดภาวะต่อไป

การต่อระบบเพื่อทำการทดลอง

นำอุปกรณ์ต่าง ๆ มาต่อร่วมกันดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.19 เพื่อทำการติดตั้งและทดสอบใช้งานต่อไป



รูปที่ 5.19 การต่อระบบเพื่อทำการทดสอบใช้งานชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current

## 5.6.4 วิธีทดสอบ

### 5.6.4.1 หัวข้อการทดสอบ

#### ตอนที่ 1

กรณีที่ 1 : ทดสอบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ก่อนนำไปต่อใช้งานกับระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ

กรณีที่ 2 : ทดสอบการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

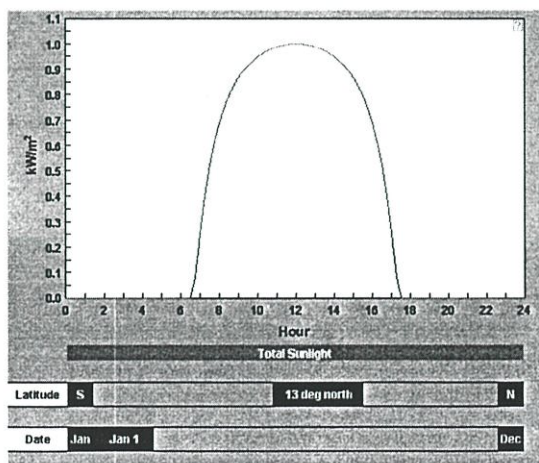
ตอนที่ 2 ทดสอบผลการใช้งานของระบบป้องกันการฟุกร่อนของท่อโลหะ โดยมีการจำลองสภาวะการขาดพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบการพิจารณาด้วย

### 5.6.4.2 ลำดับขั้นการทดสอบ

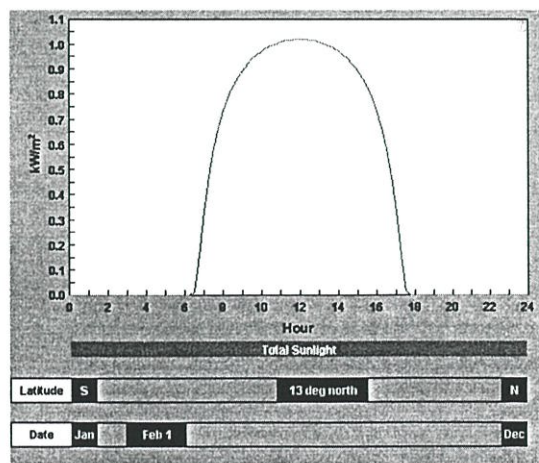
#### ตอนที่ 1

กรณีที่ 1 : ทำการทดสอบเก็บข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อหาปริมาณพลังงานที่แผงเซลล์สามารถจ่ายออกมาได้ในแต่ละช่วงเวลา โดยพิจารณาพร้อมกับปริมาณพลังงานที่ตกกระทบบนพื้นโลก ณ ตำแหน่งที่ทำการศึกษา ใช้งานดังรูปที่ 5.20 จากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอ เพื่อดูปริมาณการจ่ายพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

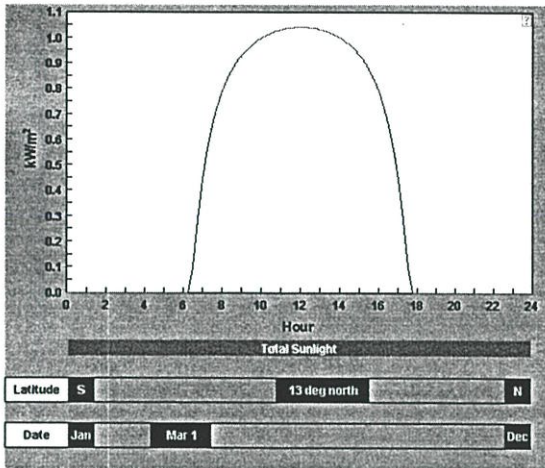
กรณีที่ 2 : ทดสอบการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบวัดข้อมูลจริงกับวิธีการที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และ 4



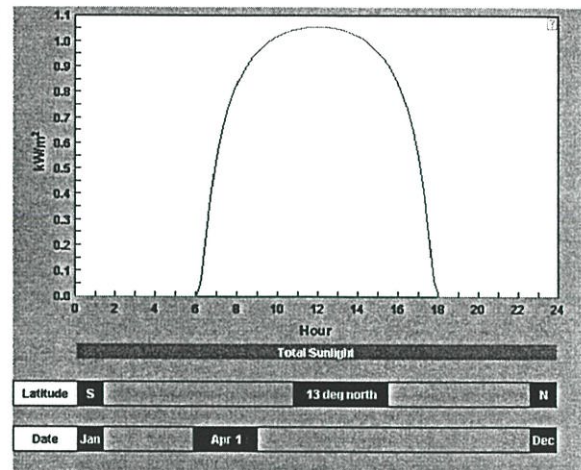
5.20 (ก)



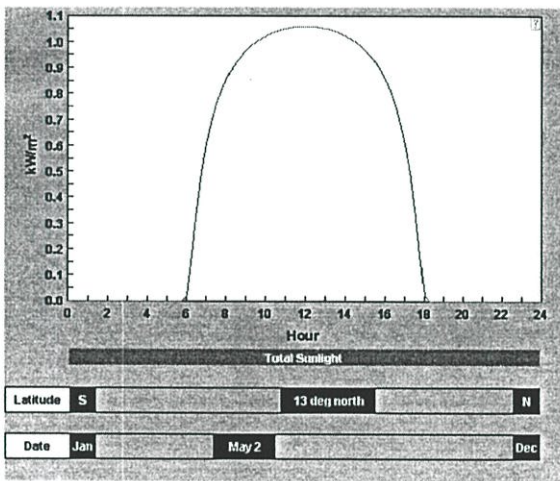
5.20 (ข)



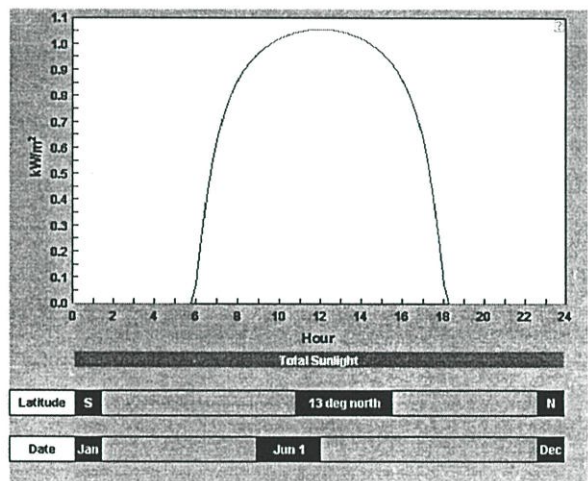
5.20 (a)



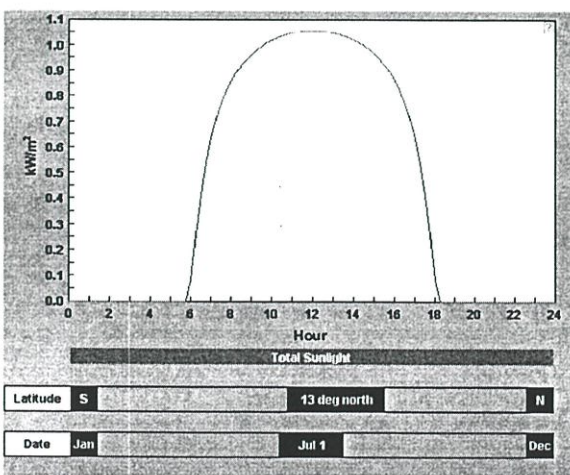
5.20 (b)



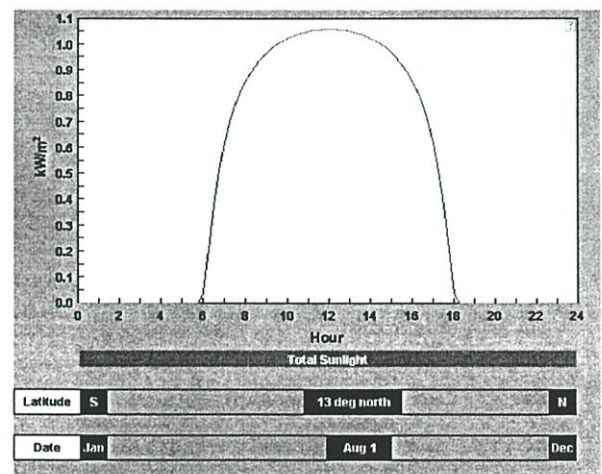
5.20 (c)



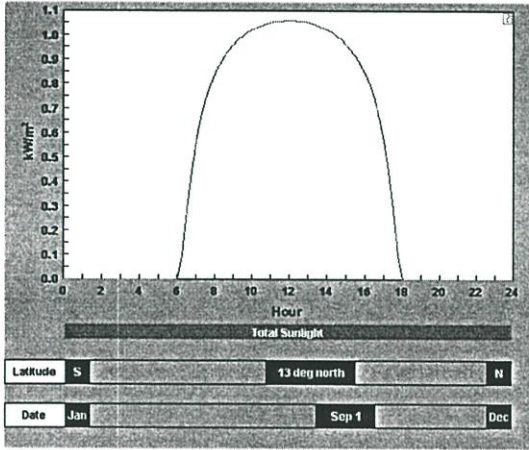
5.20 (d)



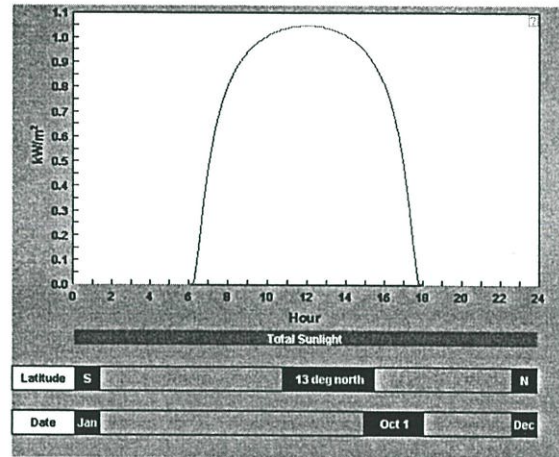
5.20 (e)



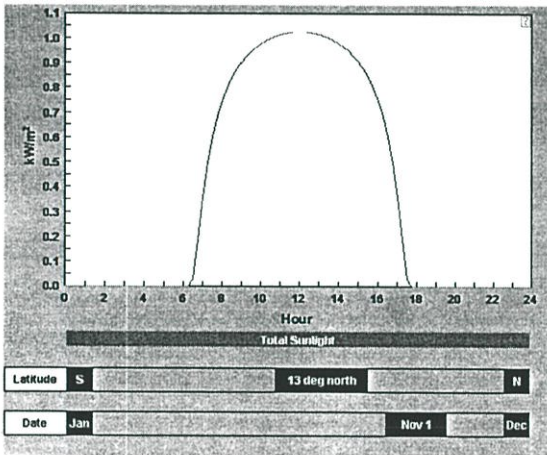
5.20 (f)



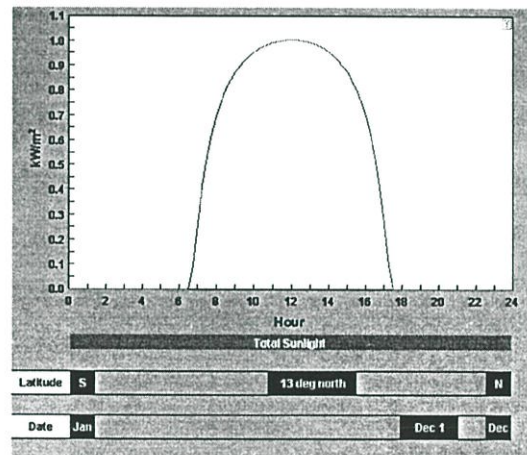
5.20 (ฉ)



5.20 (ญ)



5.20 (ฎ)



5.20 (ฏ)

รูปที่ 5.20 ปริมาณพลังงานเฉลี่ยที่ตกกระทบบนพื้นโลก ของแต่ละช่วงเวลาในรอบ 1 ปี ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 13 องศาเหนือ

- |            |               |              |            |
|------------|---------------|--------------|------------|
| ก) มกราคม  | ข) กุมภาพันธ์ | ค) มีนาคม    | ง) เมษายน  |
| จ) พฤษภาคม | ฉ) มิถุนายน   | ช) กรกฎาคม   | ซ) สิงหาคม |
| ด) กันยายน | ฎ) ตุลาคม     | ฏ) พฤศจิกายน | ฐ) ธันวาคม |

**ตอนที่ 2** ทดสอบผลการใช้งานของระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะในระยะเวลา โดยมีภารกิจลดการจ่ายโหลดเป็นเวลา 7 วัน และจำลองสภาวะการขาดพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีก 5 วัน จากนั้นทำการทดสอบวัดค่าผลการป้องกันการสุกร่อน ตามมาตรฐาน NACE Standard RP 0169 – 92 เพื่อดูความสามารถในการป้องกันระบบตามเงื่อนไขที่กำหนดภายใต้สภาวะการใช้งานต่าง ๆ

### 5.6.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### ตอนที่ 1

กรณีที่ 1 : ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการที่นำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3

กรณีที่ 2 : วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบวัดจริง กับวิธีการจำลองการทำงานของระบบจากโปรแกรมที่จัดสร้างขึ้น

ตอนที่ 2 ทดสอบการใช้งานของทั้งระบบเพื่อดูสมรรถนะ และความมีเสถียรภาพของระบบ โดยทำการเก็บบันทึกข้อมูลในสถานะการใช้งานต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ในตอนต้น และวัดผลการป้องกันโดยอ้างอิงตามที่ข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE Standard RP 0169 – 92 ระบุไว้

โดยมาตรฐาน NACE (National Association of Corrosion Engineer) หมายเลขที่ RP-0169-92 ได้กำหนดค่า และวิธีการตรวจสอบผลการป้องกันการผุกร่อนของที่โลหะไว้ดังนี้

1. ค่าความต่างศักย์ (Potential) เป็นลบมากกว่า 850 มิลลิโวลต์ เมื่อทำการวัดผ่านสารละลายทางไฟฟ้า (Electrolyte) เทียบกับ คอปเปอร์/คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) โดยไม่รวมค่าความต่างศักย์ตกคร่อมต่างๆที่เกิดขึ้น (IR Drops) ทำการวัดโดยปิดระบบแบบทันทีทันใด (Instant off)

2. ค่าความต่างศักย์ (Potential) เป็นลบได้มากกว่า 850 มิลลิโวลต์ เมื่อเทียบกับ คอปเปอร์/คอปเปอร์ซัลเฟต( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) ในสถานะเปิดระบบทันทีทันใด (Instant on)

3.ค่าความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (Polarization) ระหว่างปิดระบบทันทีทันใด (Instant off) กับค่าความต่างศักย์ธรรมชาติ (Natural Potential) ต้องไม่น้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์

### 5.6.6 ผลการทดลอง

#### ตอนที่ 1

กรณีที่ 1 : ผลการทดสอบเก็บข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละฤดูกาล เพื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ข้อมูลพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในแต่ละฤดูกาล

เลขวัน (N)	ปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ ผลิตได้ใน 1 วัน ( Ah )
9	3.99
46	4.27
81	3.97
115	3.26
140	4.12
172	3.87
192	3.06
229	3.49
263	2.92
296	3.39
321	3.76
355	3.93

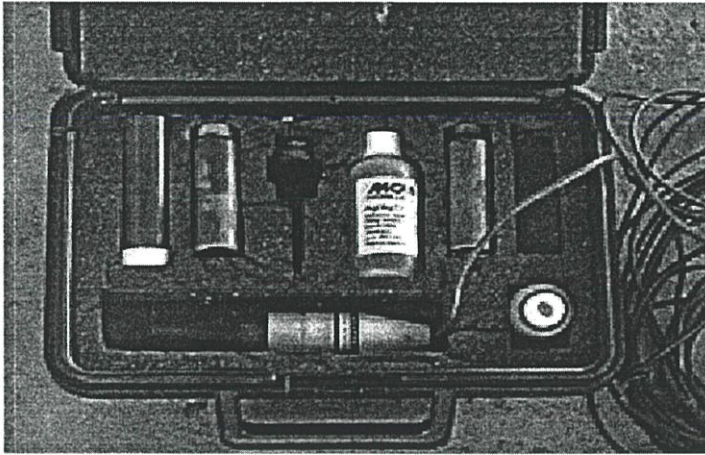
หมายเหตุ :N คือ เลขวันในรอบปี

กรณีที่ 2 : ผลทดลองเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความจุกระแส ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ มีดังนี้

- การคำนวณด้วยวิธีคูณพลังงานได้ผลลัพธ์เป็น 4.15 แอมป์-ชั่วโมง
- การคำนวณด้วยวิธีการที่นำเสนอได้ผลลัพธ์เป็น 3.05 แอมป์-ชั่วโมง
- ปริมาณความจุกระแสจากการวัดข้อมูลจริงได้เท่ากับ 2.84 แอมป์-ชั่วโมง

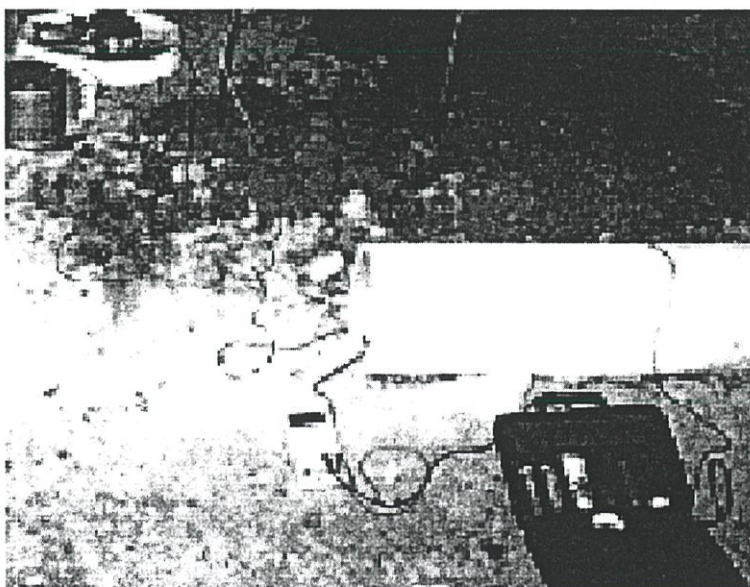
ตอนที่ 2 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะในการติดตั้งใช้งานจริง โดยมีอุปกรณ์ของระบบ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานกับระบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.18 ตามลำดับ เมื่อทำการติดตั้งใช้งานแล้วจะมีการจำลองสภาวะการทำงานในกรณีที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายพลังงานให้แก่โหลดภาระได้ โดยทดลองจ่ายโหลดภาระและอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่เป็นเวลา 7 วัน ดังข้อมูลในตารางที่ ผ 5.1.2 จากนั้นจำลองสภาวะการขาดพลังงานของระบบเพื่อดูผลการทำงานของระบบเป็นระยะเวลา 5 วัน ข้อมูลสำหรับการทดลองส่วนนี้ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ. (ข้อมูลในตารางที่ ผ 5.1.3) เมื่อทำการวัดผลการป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะตามมาตรฐานการวัดของ NACE Standard RP 0169 – 92 ทั้งตอนเริ่มติดตั้ง และ

หลังจากทำการตัดตั้งใช้งานไปแล้ว โดยใช้หัววัดที่เป็นแบบ  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และทำการวัดตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน (ดังรูปที่ 5.15) ซึ่งได้ผลการวัดค่าเป็นค่าตารางที่ 5.14



รูปที่ 5.21 หัววัดแบบ  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  สำหรับการวัดตรวจสอบผลการใช้งานของป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

และสามารถแสดงผลของการวัดค่าต่าง ๆ อันได้แก่ แรงดันไฟฟ้าใช้งาน กระแสที่ไหลลดภาระ และกำลังงานที่ใช้ในแต่ละเวลา ตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะได้ดังรูป 5.23 และ 5.24 โดยสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของท่อโลหะที่มีการป้องกันการผุกร่อน กับท่อโลหะที่ไม่มีการป้องกันการผุกร่อนได้ดังรูปที่ 5.25



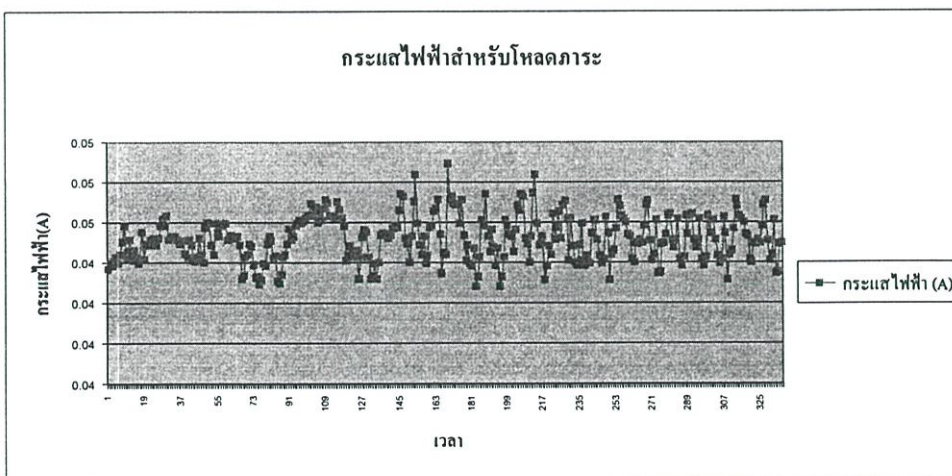
รูปที่ 5.22 การวัดตรวจสอบผลการทำงานของป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

ตารางที่ 5.14 การวัดผลการป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะด้วยหัววัดแบบ Cu/CuSO<sub>4</sub>

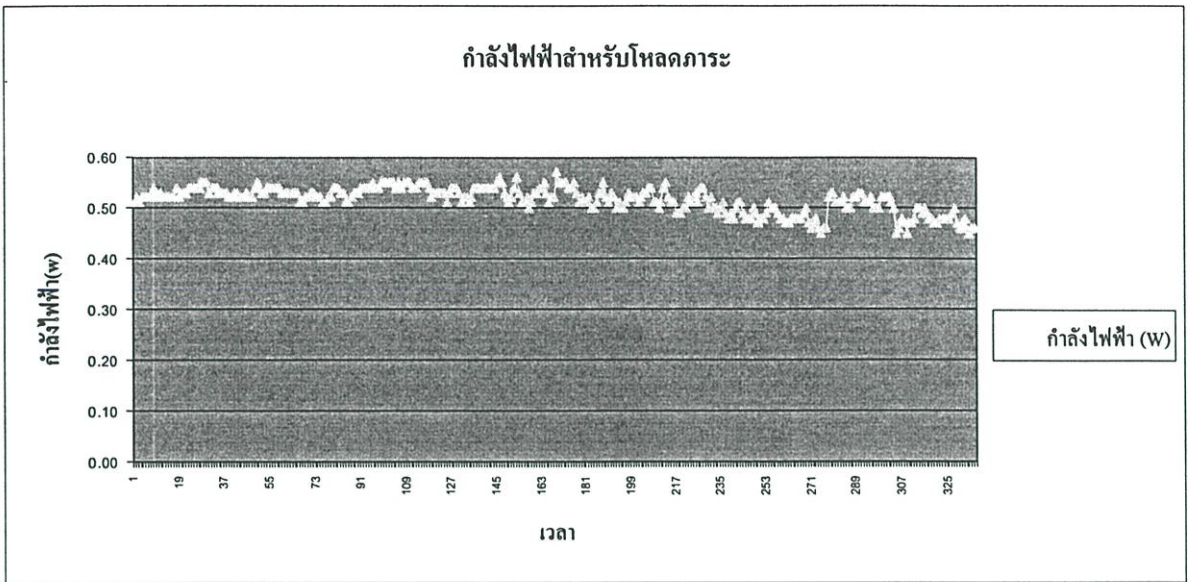
วันที่ทดสอบ	ค่าที่ไหลดการะ		P/S	P/S	P/S[ON]	P/S[OFF]	ผลการตรวจสอบ
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	[ON] (V)	[OFF] (V)	ทันทีทันใด (V)	ทันทีทันใด (V)	
1	11.43	44.46	-2.00	-0.43	-1.15	-0.90	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
2	11.44	43.32	-1.98	-0.44	-1.17	-0.92	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
3	11.41	45.86	-1.98	-0.44	-1.16	-0.87	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
4	11.41	43.29	-1.99	-0.42	-1.17	-0.88	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
5	11.50	46.32	-1.99	-0.43	-1.15	-0.86	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
6	11.52	45.46	-1.97	-0.44	-1.14	-0.89	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
7	11.40	43.61	-2.00	-0.42	-1.16	0.88	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ



5.23 (ก) แรงดันไฟฟ้า

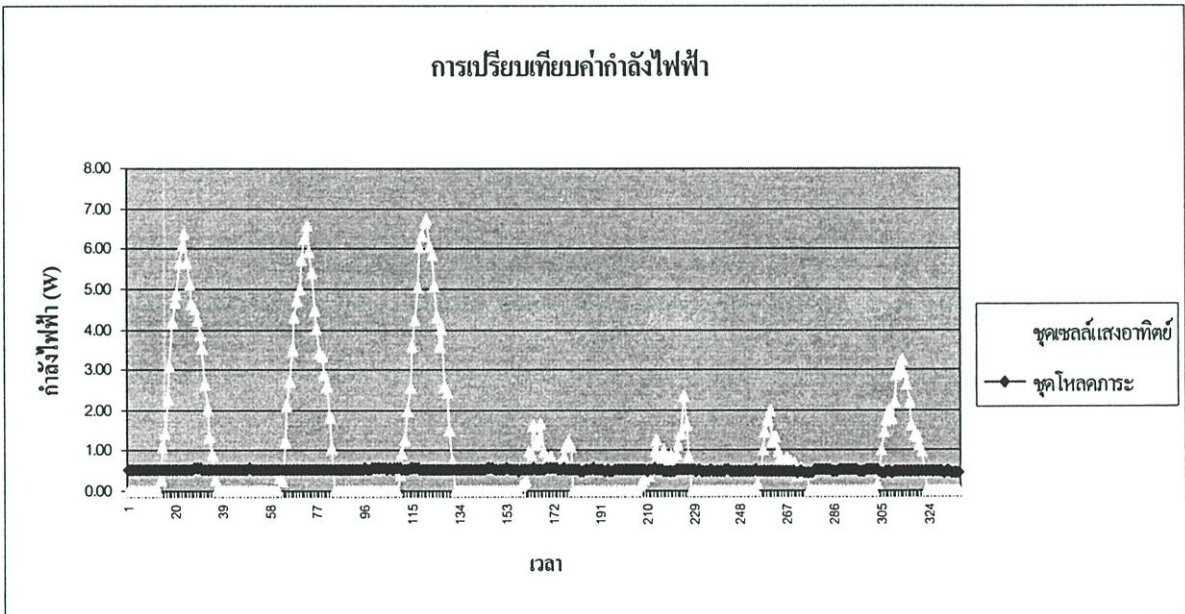


5.23 (ข) กระแสไฟฟ้า

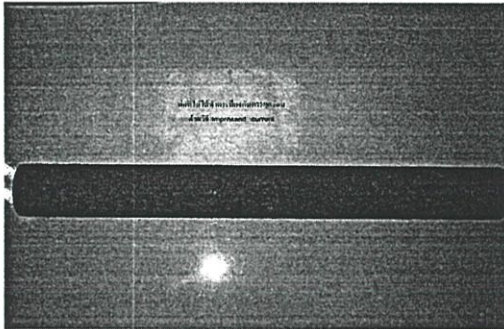
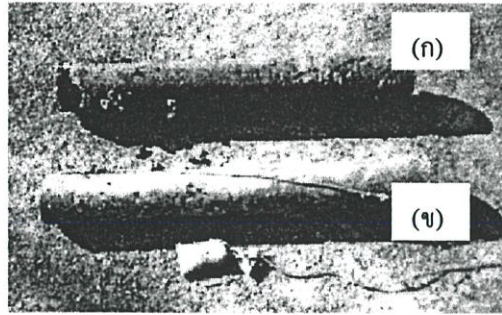


5.23 (ค) กำลังไฟฟ้า

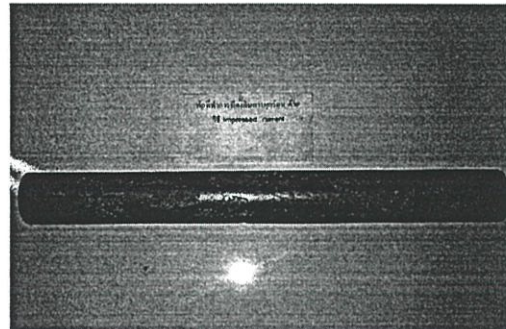
รูปที่ 5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่โหลดภาวะ  
ก) แรงดันไฟฟ้า ข) กระแสไฟฟ้า ค) กำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.24 ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กับพลังงานไฟฟ้าที่  
โหลดภาวะต้องการ



(ก) ท่อโลหะที่ไม่ได้รับการป้องกันการผุกร่อน



(ข) ท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการผุกร่อน

รูปที่ 5.25 ผลการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของท่อที่ไม่ได้รับการป้องกันการผุกร่อน กับท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

ก) ท่อโลหะที่ไม่ได้รับการป้องกันการผุกร่อน

ข) ท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current

### 5.6.7 บทวิเคราะห์การทดลอง

จากการวิเคราะห์พร้อมทั้งทดสอบการใช้งานเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องเหมาะสมของวิธีการและอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะพบว่าให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและได้รูปแบบของฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาวิเคราะห์ด้านการจ่ายพลังงานและช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้ได้ผลของการคำนวณที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงของระบบมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบดังกล่าวอีกด้วย

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการที่นำเสนอจะมีปริมาณที่แตกต่างโดยประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์จากวิธีการคำนวณค่าแบบดุลพลังงานปกติ ที่ใช้ปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้คูณกับระยะเวลาที่แผงเซลล์สามารถผลิตพลังงานได้ใน 1 วัน และให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากการวัดทดสอบข้อมูลจริง 7.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาขนาดความจุของชุดสะสมพลังงานจะทำให้ได้ขนาดเหมาะสมและเพียงพอที่จะเก็บสะสมพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ และนำไปจ่ายให้แก่โหลดภาระได้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย

เมื่อทำการติดตั้งใช้งานเพื่อทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impressed Current แล้ว ทำการวัดผลการป้องกันตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE standard RP 0169-1992 ทั้งก่อน และหลังการติดตั้งใช้งานเป็นเวลา 7 วัน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.14 ซึ่งแสดงโดยเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE standard RP 0169-1992 ที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างของท่อจากผลการเปรียบเทียบระหว่าง ท่อโลหะที่ฝังทดสอบในดินแบบไม่มีการป้องกันการผุกร่อน กับท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการผุกร่อนแบบ Impressed Current แสดงว่าระบบนั้นมีความสมบูรณ์สามารถป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะที่ทำการติดตั้งทดสอบได้ ดังรูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่าท่อที่ไม่ได้รับการป้องกันจะเกิดการผุกร่อนและเป็นสนิมที่บริเวณผิวของท่อเป็นอย่างมาก จึงเป็นการบ่งถึงคุณสมบัติที่ดีของการใช้ระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะจากวิธีการและขั้นตอนที่ได้แสดงไว้ข้างต้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์เพื่อการป้องกันการผุกร่อนของโครงสร้างเหล็ก หรือวัสดุโลหะอื่นๆ ได้ เช่นเดียวกับท่อโลหะ เช่น ระบบฐานรากของโครงสร้างอาคาร หรือเรือเดินสมุทร เป็นต้น

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 การทดสอบวิธีการเชิงเลข และอัลกอริทึมที่ใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

โครงการวิจัยนี้จะได้นำเสนอรูปแบบวิธีการวิเคราะห์และการพิจารณาด้านพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทางไฟฟ้า และอาศัยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและหาผลเฉลยแทนการวิเคราะห์ห่อแบบระบบในลักษณะเดิมที่มีการใช้งานกันอยู่ เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้จากตัวอย่างของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความผิดพลาดต่ำ ( $r^2 = 0.9989$ ) นอกจากนี้เส้นกราฟที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าของข้อมูลจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอยังสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ผลเฉลยที่ออกมาที่มีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด และยังสามารถนำวิธีการที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานและพัฒนาในการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ในสถานะการใช้งานต่างๆให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการทำงานเพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยรวม เพื่อให้การใช้งานของระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

ตัวอย่างการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ และทำการคำนวณหาผลลัพธ์จากการประมาณค่าของฟังก์ชัน  $f(x) = x \cdot \sin(x)$  จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง ( $r^2 = 0.9974$ ) ใกล้เคียงกับผลเฉลยจริงของฟังก์ชันดังกล่าวมากกว่าการประมาณค่า และคิดคำนวณด้วยฟังก์ชันอื่น สำหรับการทดสอบวิธีการเชิงเลขกับฟังก์ชันตัวอย่างทั้งที่เป็นแบบโพลีโนเมียล(Polynomial) และโมโนเมียล(Monomial) อื่นๆ ผลการวิเคราะห์ทดสอบให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำเช่นเดียวกัน

### 6.2 การทดสอบโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

สำหรับการทดสอบหาฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบและการเปรียบเทียบการใช้ฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function) กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) ดังรูปที่ 4.16, รูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.2 ข้างต้น (หัวข้อที่ 4.3.3.4) พบว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ คือฟังก์ชันพหุนามเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าข้อมูลที่ทำการทดสอบต่ำกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนการเปรียบเทียบความแตกต่างของ

อันดับ(order)ฟังก์ชันพหุนาม ที่ค่าอันดับต่ำ และค่าอันดับสูง ดังรูปที่ 4.18 พบว่าจำนวนอันดับสูงที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยค่า Correlation coefficient( $r$ ) และ Coefficient of determination( $r^2$ ) โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาคัดสินใจเลือกค่าสำหรับอันดับที่เหมาะสมที่สุดเป็น  $r = 1$  และ  $r^2 = 1$  หรือให้ค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียง 1 ที่สุด เพราะเป็นการแสดงว่า อันดับของฟังก์ชันพหุนามดังกล่าว เมื่อนำมาพล็อตกราฟเส้นที่มีค่าต่อเนื่องจะสามารถแทนข้อมูลได้ใกล้เคียงกับทุกจุดของข้อมูลมากที่สุด

### 6.3 การนำโปรแกรมจำลองการทำงาน และวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ไปใช้

#### วิเคราะห์กับระบบทดสอบตัวอย่าง

- เป้าหมาย และเงื่อนไขการทดสอบ
  - เพื่อตอบสนองความต้องการของโหลดที่มีการทำงานต่อเนื่อง
  - ขนาดของระบบสะสมพลังงาน(แบตเตอรี่) มีความใกล้เคียงกับความต้องการใช้งานจริง ไม่จำเป็นต้องทำการออกแบบให้มีการเผื่อมากจนเกินความจำเป็น เพราะจะทำให้ต้นทุนในการออกแบบระบบสูงตามไปด้วย
  - พิจารณารูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้มีปริมาณการจ่ายกระแส และพลังงานสูงสุด
  - การต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานและการดึงกำลังสูงสุดของระบบฯ
  - การทดลองประยุกต์ใช้งานในการช่วยออกแบบและวิเคราะห์ระบบสำหรับ โหลดที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวัน โดยพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้งาน
- การวิเคราะห์และประเมินผลการใช้งานเบื้องต้นก่อนนำไปประยุกต์ใช้งาน
 

ประเด็นในการพิจารณา :-

  - ความถูกต้อง/เหมาะสม ของวิธีการและอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบฯ ดังกล่าว
  - ช่วยในการตรวจสอบการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เพื่อลดปัญหาและปรับปรุงแก้ไขระบบฯ ก่อนการติดตั้งใช้งานจริง
- การวิเคราะห์ข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
  - ข้อมูลความยาวนานของแสงแดดประจำวันในรอบปีเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการใช้งานและออกแบบระบบฯ รวมถึงใช้ประกอบในการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเผื่อของระบบสะสมพลังงานที่ใช้(แบตเตอรี่)
  - ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ ใช้ประกอบการพิจารณาและดูความเหมาะสมในการติดตั้งและใช้งานระบบฯ

สำหรับการทดสอบเพื่อหารูปแบบในการปรับมุมเอียง และติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมแสดงให้เห็นว่าบางช่วงฤดูในรอบปีรูปแบบที่ 1 (การติดตั้งแบบตายตัว ในแนวระนาบ) จะสามารถผลิตพลังงานได้สูงกว่า รูปแบบที่ 2 (การติดตั้งแบบตายตัว ตามมุมของตำแหน่งละติจูด) ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากพฤติกรรมเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (ตามที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 2) โดยมีลักษณะการเอียงของตำแหน่งดวงอาทิตย์ไปทางทิศเหนือค่อนข้างมาก ในขณะที่รูปแบบที่ 2 แผงเซลล์จะหันไปทางทิศใต้ ทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงเซลล์ของรูปแบบที่ 1 มากกว่ารูปแบบที่ 2 นั้นเอง

จากผลการทดสอบระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะแบบ Impress Current ตามตารางที่ 5.14 นั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ NACE Standard (RP-0169-1992) เป็นไปตามมาตรฐานที่อ้างอิงไว้ และสามารถวิเคราะห์ได้ว่า

1) คุณสมบัติของวัสดุที่ควรจะนำมาใช้เป็นแอโนดต้องเป็นวัสดุที่ทำมาจากโลหะผสม เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับโลหะทั่วไป

2) ระบบที่ใช้แอโนดแบบแมกนีเซียม เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เหล็ก เป็นแอโนดนั้น ระบบที่ใช้แมกนีเซียมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบน้อยกว่าที่ใช้เหล็กเป็นแอโนด ดังนั้นการกัดกร่อนของแอโนดแบบแมกนีเซียม จึงมีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าแบบที่ใช้เหล็กเป็นแอโนด

3) เมื่อเปรียบเทียบท่อโลหะที่ได้รับการป้องกันการสุกร่อน กับท่อโลหะที่ไม่ได้รับการป้องกัน (รูปที่ 5.25) พบว่าท่อเหล็กที่ได้รับการป้องกันจะไม่เกิดการกัดกร่อน แต่ท่อเหล็กที่ไม่ได้รับการป้องกันจะเป็นสนิม และเกิดการกัดกร่อนเป็นรอยลึก

4) เมื่อทำการปลดชุดแหล่งจ่ายของระบบเป็นเวลา 5 วัน เพื่อทดสอบระบบในสภาวะการขาดพลังงานไฟฟ้าหลัก แล้วทำการวัดผลการป้องกันการสุกร่อนตามมาตรฐาน NACE Standard (RP-0169-1992) ดังตารางที่ ผ.5.1.3 ปรากฏว่าระบบยังสามารถมีการป้องกันได้อยู่ นั้นแสดงว่าระบบที่มีเฉพาะแบตเตอรี่สำหรับการสำรองไฟตามที่เลือกใช้งาน ยังสามารถจ่ายพลังงานให้แก่ชุดป้องกันการสุกร่อนได้

## 6.4 ข้อเสนอแนะ

- ข้อจำกัดบางประการของการต่อรวมเซลล์ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์
  - เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ตามที่ต้องการ จะต้องนำเซลล์จำนวนหนึ่งมาต่ออนุกรม และขนานกันตามจำนวน ขนาด และลักษณะการต่อที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 (หัวข้อที่ 2.5)
  - การเลือกเซลล์ให้คู่ควรกัน โดยทั่วไป เซลล์ที่นำมาต่อขนานกันควรมีแรงดันวงจรเปิดเท่ากันทุกตัว และที่สำคัญที่สุดคือเซลล์ทุกตัวจะต้องมีแรงดันที่จุดกำลังไฟสูงสุดเหมือนกัน

หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ส่วนเซลล์ที่จะนำมาต่ออนุกรมควรมีกระแสลัดวงจรเหมือนกัน และมีกระแสที่จุดกำลังไฟสูงสุดเท่ากัน ถ้าหากใช้เซลล์ที่ไม่คู่ควรกัน ผลก็คือจะได้แผงเซลล์ที่ไม่สมบูรณ์ เพราะเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าจะถ่ายทอดกำลังเกินพอของมันเข้าไปทำให้สั้นเปลืองกำลังไฟฟ้าในเซลล์ที่มีลักษณะด้อยกว่า ผลลัพธ์ก็คือการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดดังกล่าวจะด้อยลง หรือ โน้มเอียงไปทางเซลล์ที่ด้อยที่สุด เมื่อเกิดกำลังสั้นเปลืองในเซลล์ก็ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแผงลดลงตามไปด้วย

- การป้องกันการเกิดปัญหาจากร้อนบนแผงเซลล์ ให้ใช้เซลล์ต่อขนานจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ แล้วจึงนำมาต่ออนุกรมเป็นสตริง กรณีนี้ถ้ามีเซลล์ซำรุด 1 ตัว กำลังไฟฟ้าจะไม่ตกมาก ถ้าการต่อเซลล์ขนานจำนวนมากๆ เป็นไปได้ยาก อาจแก้ปัญหาโดยการต่อบายพาสไดโอดคล่อมเซลล์ขนานในสตริง

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงวิธีการของ curve fitting และ interpolation ไว้เพียงบางส่วนเท่านั้น อย่างไรก็ตามสำหรับผู้่านที่จะนำหัวข้อเหล่านี้ไปใช้งานขอให้พิจารณาสั่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่ค่าชุดข้อมูลที่ได้นั้นได้มาเป็นค่าที่ถูกต้องไม่มีการผิดพลาดของข้อมูล เช่นได้จากสมการคณิตศาสตร์แต่เราไม่ทราบสมการที่แน่ชัด วิธีการที่เหมาะสมในการหาค่าที่อยู่ระหว่างจุดข้อมูลควรจะใช้ การหาค่าแทรก เพราะค่าที่ได้จะผ่านจุดข้อมูลทุกจุดซึ่งเป็นสิ่งที่ถูกต้อง แต่วิธีการนี้จะเป็วิธีการที่ใช้เวลาในการคำนวณมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าข้อมูลมีมาก
- ในกรณีที่ข้อมูลที่ได้อาจมีความผิดพลาดบ้าง เช่นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง วิธีที่เหมาะสมที่น่าจะเป็น วิธีการใช้การปรับโค้ง และการประมาณค่าด้วยโพลีโนเมียล เพราะข้อมูลที่ได้จากการทดลองก็เชื่อว่าจะไม่ม่ข้อผิดพลาดจากการวัดเลย ดังนั้นกราฟที่ได้ก็ไม่จำเป็นต้องผ่านจุดข้อมูลทุกจุดแต่ควรจะเป็นเส้นที่ทำให้เกิดความผิดพลาดจากข้อมูลโดยรวมทั้งหมดน้อยที่สุดมากกว่า

#### ■ สิ่งที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม

- ขนาดพิกัดของโพลดิการะที่นำมาทำการทดสอบยังมีขนาดพิกัดที่ยังต่ำอยู่ อันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของชุดแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์จำลองที่มีค่าความเข้มแสงที่ต่ำ จึงควรได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลกับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ชุดจำลองแสงอาทิตย์มาตรฐาน ที่สามารถจ่ายพลังงาน และมีความเข้มแสงที่สูงกว่าปัจจุบัน
- ข้อมูลที่ทำการทดสอบเก็บผลจากการวัดค่าในสภาพการใช้งานจริง จะไม่มีความต่อเนื่องในบางช่วงเวลา จึงควรทำการหาค่าแทรก และประมาณค่าด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม และใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุดก่อน ที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการคำนวณค่าต่อไป

- เมื่อมีความผิดปกติจากการแสดงผลของข้อมูลที่ทำทดสอบในรูปของภาพโครงร่าง 3 มิติ เช่น มีค่าบางตำแหน่งพุ่งสูงขึ้นมาอย่างผิดปกติ แก้ไขได้โดยการตรวจสอบจากระบบฐานข้อมูลอ้างอิงที่ได้ทำการเก็บบันทึกไว้
- ทำการทดสอบเก็บข้อมูลเป็นเวลานาน ๆ และละเอียดขึ้น (เพื่อเพิ่มจำนวน และความหลากหลายของข้อมูลในการวิเคราะห์ให้สูงขึ้น)
- เพิ่มจำนวนความแตกต่างของข้อมูล และรูปแบบการทดสอบให้สูงขึ้นเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

## 6.5 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป

### ■ การพัฒนางานต่อเนื่องในเบื้องต้น

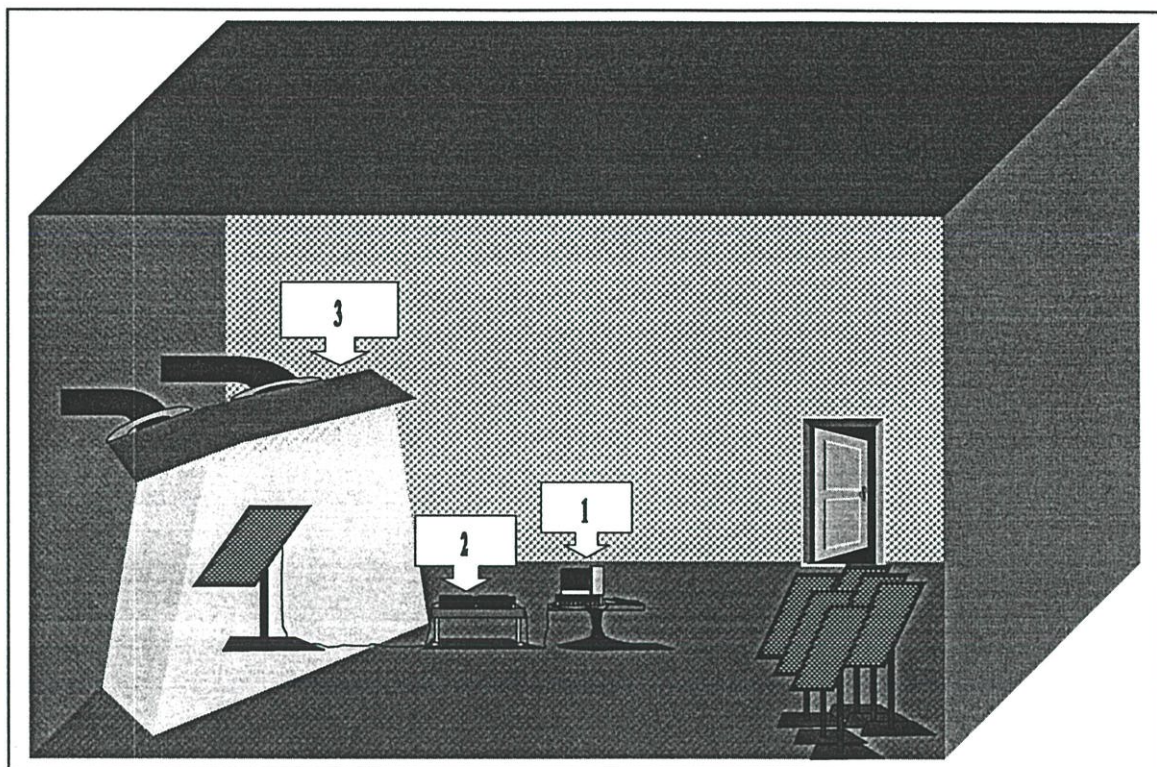
- นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านการจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เมื่อมีรูปแบบการติดตั้งและการต่อร่วมเซลล์ ที่แตกต่างกัน และมีความหลากหลายรูปแบบมากกว่าปัจจุบัน
- วิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนจุดกำลังสูงสุด และการดึงพลังงานสูงสุดของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เมื่อมีการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกัน รวมทั้งการพิจารณาผลของค่าความสูญเสียจากส่วนต่างๆ ในระบบฯ ประกอบการพิจารณาด้วย
- ช่วยในการออกแบบหาปริมาณการจ่ายกระแสของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ สำหรับโหลดที่มีการใช้งานไม่ต่อเนื่อง หรือทำงานเป็นคาบเวลา
- การพิจารณาผลของปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น อุณหภูมิ และ ผลของรังสีประกอบจากส่วนอื่น เป็นต้น

### ■ การพัฒนางานในอนาคต

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นการแสดงภาพโดยรวมของระบบทั้งหมดที่ควรจะเป็นซึ่งเป็นห้องทดสอบมาตรฐาน และวัดผลลัพธ์ข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการควบคุมพารามิเตอร์และปัจจัยต่างๆ ได้ อันประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ดังนี้

- ส่วนที่ 1 : ชุดเก็บบันทึกฐานข้อมูล ที่สามารถจำลองการทำงาน และออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์กับโหลดภาระแบบต่างได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- ส่วนที่ 2 : อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
- ส่วนที่ 3 : ชุดจำลองแสงอาทิตย์เทียม (SUNSIMULATOR)

เนื่องจากโครงการงานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นเฉพาะการวิจัยในรายละเอียดของส่วนที่ 1 เท่านั้น ผลลัพธ์ และรูปแบบของข้อมูลการใช้งานจึงยังคงมีข้อจำกัดอยู่บ้างในบางส่วน ดังนั้นจึงควรมีการวิจัย และพัฒนางานในส่วนอื่น ๆ ประกอบด้วยเพื่อให้การใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป



รูปที่ 6.1 ภาพโดยรวมของห้องทดสอบมาตรฐาน และวัดผลลัพธ์ข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการควบคุมพารามิเตอร์ และปัจจัยต่างๆ ได้

## เอกสารอ้างอิง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] M.A. Egido and E. Lorenzo. "The sizing of stand-alone PV systems. A review and a proposed new method." *Solar Energy Materials and Solar cell* 26, 1992. pp. 51-69.
- [2] F.Lasnier and T. Gan Ang. **Photovoltaic Engineering Handbook**. New York : Adam Hilger, 1990.
- [3] Shockley, W. and Queisser, H.J. "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells." *Journal of Applied Physics*, 32, 1961. pp. 510-519.
- [4] T. Markvart. **Solar Electricity**. London : John Wiley & Sons, Ltd. 1994.
- [5] Muirhead, I.J. and Kuhn, D.J. "Photovoltaic Power System Design Using Available Meteorological Data." *Proceedings, 4th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sydney, 1989*. pp. 947-953.
- [6] R. H. B. Exell and K. Saricali. "The Availability of Solar Energy in Thailand." *Research Report No. 63*. AIT, Bangkok, 1976.
- [7] The Photovoltaics CDROM is supported by a web site at <http://www.pv.unsw.edu.au/pvcdrom/> and an email address: [pvcdrom@unsw.edu.au](mailto:pvcdrom@unsw.edu.au) .
- [8] ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์. เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์. โครงการตำราวิชาการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] ยุทธ อัครมาส. **ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ**. คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [10] บุญสร้าง คิเรกสถาพร. "การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ ต่ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทย." *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่23 ฉบับที่ 2, 2539*. หน้า 51-73.
- [11] ยุทธ อัครมาส และ พิฑูรย์ ตรีวิจิตรเกษม. "Photovoltaic Solar Systems." *เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ โดย IEEE (THAILAND SECTION), 2526*. หน้า 1-22.
- [12] P. Wibulswas and K. Kirtikara. "Research and Development on Solar Energy in Thailand." *UNIDO Consultative Meeting on Solar Energy Research & Applications , December 1992*. pp. 356-362.
- [13] Dunlop, J., Bower, W. and Harrington, S. "Performance of Battery Charge Controllers." *22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, 1991*. pp. 640-645.

- [14] IEEE Std 1013-1990. **IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Photovoltaic (PV) Systems**. New York : IEEE, Inc. 1990.
- [15] Curtis F. Gerald and Patrick O. Wheatley. **Applied Numerical Analysis**. California : Addison-Wesley, Sixth edition, 1997.
- [16] S.C. Chapra and R.P. Canale. **Numerical Methods for Engineers**. New York : McGraw-Hill , Inc. 1990.
- [17] I.D. Hoffman. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. New York : McGraw-Hill, Inc. 1993
- [18] ศิริพงษ์ ศรีพิพัฒน์. **คณิตศาสตร์เชิงตัวเลข สำหรับคอมพิวเตอร์**. ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [19] สุวิมล ตันกมลასน์. **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นพื้นฐาน**. โครงการตำราวิชาการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2541.
- [20] อุดม ไยเจริญ. **วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข 1**. คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [21] Eva Part-Enander, Anders Sjoberg, Bo Melin and Pernilla Isaksson. **THE MATLAB HANDBOOK**. Harlow : Addison-Wesley, 1996.
- [22] กนต์ธร ชำนิประศาสน์. **MATLAB โปรแกรมเพื่อการคำนวณเชิงเลขและการสร้างภาพสมรรถนะสูง**. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [23] จเร สุรวัดณ์ปัญญา. **การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย BASIC**. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2533.
- [24] แสนศักดิ์ ดีอ่อน และ ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล. “การวิเคราะห์หาระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณด้วยโพลีโนเมียล.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544. หน้า 234-239.
- [25] W. Von baeckmann, W. Schwenk and W. Prinz. **Handbook of Cathodic Corrosion Protection**. Hoston United States of America : Gulf Publishing Company, Third Edition, 1997. pp. 207-224
- [26] E. W Mcallister. **Pipe Line Rules of Thumb Handbook**. United States of America ,Third Edition, 1996.
- [27] R. S. Charlton and B. H. Levelton. **Effect of Microstructure on the Corrosion Resistance and Mechanical Properties of High Silicon Cast Iron**. Anotec Industries LTD, 1995.
- [28] Chaya Jivacate. “PV projects connected to grid system in Thailand.” Proc. of Int. Conf. On Energy and Environment. Natural Resources Div. ESCAP, November 1990. pp. 188-198.

- [29] K.Y. Khouzam. "Optimum load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems Application to Resistive Loads." IEEE Transactions on Energy Conversion. EC-5, No.2, June 1990. pp.265-271.
- [30] Serreze, H.B. "Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations." 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C., 1978. pp. 609-614.
- [31] Exell, R.H.B. "Mapping Solar Radiation by Meteorological Satellite." Renewable Energy Review. 6 , 1984. pp. 27-39.
- [32] S. Deeon, S. Potivejkul and W. Khan-ngern. "Simulation of Battery Sizing for Continuous Load in PV System." IEE International Power Engineering Conference, Singapore, 1999. pp. 453-457.
- [33] แสนศักดิ์ ดีอ่อน และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. "การวิเคราะห์รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข." การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2543.
- [34] M. Saied and M. Jaboori. "Optimal solar Parameters for Maximum Annual Output Mechanical Energy." IEEE Transactions on Energy Conversion. EC-4, No. 3, September 1989. pp. 459-465.
- [35] A. W peabody. **Control of pipeline corrosion.** Hoston United States of America : National Association of Corrosion Engineers, 1991.
- [36] N. Chotiwanaporn, S. Potivejkul, V. Kinnares, S. Deeon and W. Samlee. "Technical Design of Corrosion Protection of Buried Steel Pipelines Based on Impressed Current Using Solar Energy System." IEE International Power Engineering Conference Tokyo, Japan, 2000.

**ภาคผนวก ก.**

**รายละเอียดของข้อมูลประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์  
ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์**

ตารางที่ ผ.1.1 ข้อมูลคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

คำศัพท์	ความหมาย
a-Si	วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิกอน เป็นการพ่นซิลิกอนในสถานะก๊าซเพื่อทำให้เกิดฟิล์มบางๆ ลงบนแผ่นรองรับ ภายในห้องสุญญากาศ
Amorphous semiconductor	วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอสัณฐาน (ไม่เป็นผลึก) ซึ่งโครงสร้างของอะตอมมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบในระยะยาว
Antireflection coating	เป็นการเคลือบสารบางๆ ลงบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง และทำให้แสงส่องผ่านได้ดีขึ้น
Balance-of-system (BOS)	ส่วนประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในระบบโฟโตโวลเทอิก (ยกเว้นตัวแผง) โดยรวมถึง อุปกรณ์ทางไฟฟ้า (เครื่องแปลงกระแส, เครื่องควบคุมการชาร์จกระแส, สายไฟ และอื่นๆ) โครงสร้างที่ใช้ยึดและติดตั้งแผง ค่าออกแบบ (ทางสถาปัตยกรรม ทางวิศวกรรม ทางกฎหมายและอื่นๆ) ที่ดิน การจัดเตรียมสถานที่และการขออนุญาต ค่าติดตั้ง (แรงงาน ค่าวัสดุรับเหมา และอื่นๆ) และค่าใช้จ่ายอื่นๆที่เกี่ยวข้อง (ค่าขนส่ง ค่าเก็บรักษา เป็นต้น) ซึ่งราคาของ BOS มีค่าใกล้เคียงกับค่าแผงที่ใช้ติดตั้งในระบบเดียวกันนั้น
Base load	กำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่การไฟฟ้าจะต้องจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้า ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง
BIPV (Building Integrated Photovoltaics)	เป็นคำที่ใช้เรียกการออกแบบและประกอบโฟโตโวลเทอิกเข้าเป็นส่วนหนึ่งของผนังอาคาร โดยสามารถใช้แทนที่ผนังอาคารเดิมได้
Blocking diode	ไดโอดที่ใช้ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับสู่แผงโฟโตโวลเทอิก หรืออาจใช้ไดโอดหนึ่งตัวต่อแบบอนุกรมกับเซลล์โฟโตโวลเทอิกหนึ่งแถว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับ และก่อให้เกิดความร้อนที่จะสร้างความเสียหายให้กับตัวเซลล์ได้
Bypass diode	ไดโอดที่ใช้ต่อระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ขึ้นไปในแผงโฟโตโวลเทอิก โดยที่ไดโอดนั้นจะทำงานเมื่อตัวเซลล์เกิดการไบแอสย้อนกลับ

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_1)

คำศัพท์	ความหมาย
CdTe	Cadmium Telluride; แคดเมียม เทลลูไรด์ เป็นวัสดุโฟโตโวลเทอิกแบบฟิล์มบางชนิดหลายผลึก
Cathodic protection	วิธีหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิมของโครงสร้างโลหะ (เช่น สะพาน หรือ ท่อส่ง) โดยการให้แรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ต่อระหว่างตัวโครงสร้างกับกราวด์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ด้านการไหลของอิเล็กตรอนอันเป็นขบวนการเกิดสนิม (ออกซิเดชัน)
Cogeneration	ขบวนการที่เชื้อเพลิงถูกใช้ไปในการสร้างไอน้ำเพื่อปั่นกังหันและสร้างความร้อนสำหรับการใช้งานอื่นๆ กังหันจะขับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมา ความร้อนที่เหลือจะนำไปใช้ในงานอื่นที่มีการใช้ไอน้ำ
Concentrator	เซลล์หรือแผงโฟโตโวลเทอิกที่มีการสะท้อนแสงไปยังจุดโฟกัส เพื่อเพิ่มปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์ แผงที่มีการรวมความเข้มแสงจะหมุนตามดวงอาทิตย์ และใช้งานได้มีประสิทธิภาพเฉพาะกับแสงที่ตกกระทบบนโดยตรง (Direct light) เนื่องจากส่วนของแสงกระจาย (Diffuse light) จะไม่สามารถรวมความเข้มเพื่อตกกระทบบนอุปกรณ์ได้
Conversion efficiency	อัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตโดยอุปกรณ์โฟโตโวลเทอิกต่อพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนอุปกรณ์
CIS or CuInSe2	Copper Indium Diselenide; คอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นวัสดุโฟโตโวลเทอิกแบบฟิล์มบางชนิดหลายผลึก (บางครั้งรวมกับแคดเมียม (CIGS) และ/หรือ ซัลเฟอร์
Czochralski process	ขบวนการที่ใช้ปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำคุณภาพสูงขนาดใหญ่ โดยการดึงเมล็ดผลึกขึ้นจากถาดหลอมของวัสดุอย่างช้าๆ ควบคู่ไปกับการควบคุมอุณหภูมิที่เย็นตัวลง
Diffuse insolation	แสงอาทิตย์ที่ได้รับโดยทางอ้อม จากแสงที่สะท้อนกระจายมาจากพื้นผิวโลก เมฆ หมอก กว้น ผุ่น หรือสิ่งขวางกั้นอื่นๆ ในชั้นบรรยากาศ

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_2)

คำศัพท์	ความหมาย
Distributed system	ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่ใกล้หรือที่มีการใช้ไฟฟ้าซึ่งตรงกันข้ามกับระบบการจ่ายไฟจากส่วนกลางผ่านโครงข่ายไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่ง การใช้ระบบโฟโตรีโวลเทอิกสำหรับที่อยู่อาศัยจัดว่าเป็นระบบแยกย่อย
Dopant	ธาตุทางเคมี (สารเจือปน) ในปริมาณเล็กน้อยที่เติมลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารนั้น การเจือสารชนิด n จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น การเจือสารชนิด p จะทำให้อิเล็กตรอนหายไป (เกิดโฮล)
Doping	การเติมสารเจือปนลงในวัสดุสารกึ่งตัวนำ
Efficiency	ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์โฟโตรีโวลเทอิก โดยมีค่าเท่ากับไฟฟ้าที่ผลิตได้หารด้วยปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ตัวเลขที่ได้จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์
Fill factor	อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงจากอุปกรณ์โฟโตรีโวลเทอิกต่อกำลังไฟฟ้าเมื่อกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด เป็นลักษณะที่สำคัญในการประเมินคุณสมบัติของอุปกรณ์
Fuel cell	อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานจากตัวของมันเองไปเป็นไฟฟ้าและความร้อน โดยไม่ต้องผ่านขบวนการสันดาป และเนื่องจากไม่มีขบวนการสันดาป จึงมีการปล่อยมลพิษออกมาน้อยมาก
Gel-type battery	แบตเตอรี่ชนิด Lead-Acid ซึ่ง electrolyte เป็นส่วนประกอบของซิลิกาเจล
Gigawatt (GW)	พันล้านวัตต์ 1,000 เมกะวัตต์
Glazing	วัสดุใส (เช่น กระจก หรือ พลาสติก) ซึ่งยอมให้แสงผ่านลงไปสู่แผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์และอาคารพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกักความร้อนไว้ภายใน
Greenhouse gases	ก๊าซ (ส่วนมากเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์) ซึ่งกักความร้อนจากแสงอาทิตย์ไว้ในชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางความร้อนแบบเรือนกระจก

## ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_3)

คำศัพท์	ความหมาย
Grid	โครงข่ายระบบสายส่ง สถานีย่อย สายจ่าย และหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการไฟฟ้าใช้จ่ายไฟจากส่วนกลาง
Grid connected PV system	ระบบโฟโตโวลเทอิกที่มีแผงโฟโตโวลเทอิกทำหน้าที่เช่นเดียวกับโรงกำเนิดไฟฟ้า คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบโครงข่าย
Hetero-junction	เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุสารกึ่งตัวนำตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอยู่แยกชั้นกัน
Hybrid system	ระบบโฟโตโวลเทอิกซึ่งใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น (เช่น พลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล)
Incident ligh	แสงที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวของอุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์
Indium oxide	สารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง ซึ่งสามารถเจือด้วยดีบุก เพื่อทำฟิล์มบางใสที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (โปรคดู “TCO”) มักใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าทางด้านหน้าหรือเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Hetero-junction
Insolation	การวัดแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงบนพื้นผิว เช่น แผงโฟโตโวลเทอิก
Insulation	ฉนวน; วัสดุที่ใช้กันความร้อน
Intrinsic semiconductor	สารกึ่งตัวนำที่ไม่มีการเจือสารอื่น (บริสุทธิ์) มักใช้ค้ำกับซิลิกอนในอุปกรณ์โฟโตโวลเทอิก
Inverter	อุปกรณ์ที่ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)
IV curve	เป็นการแสดงกราฟที่พล็อตระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์โฟโตโวลเทอิก โดยที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากภาวะลัดวงจร (ไม่มีกระแสไฟฟ้า) จนถึงภาวะเปิดวงจร (แรงดันสูงสุด) รูปของเส้นโค้งแสดงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้น

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_4)

คำศัพท์	ความหมาย
Junction	บริเวณที่อยู่ตรงกลางระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิด เช่นรอยต่อ p/n ซึ่งจะเริ่มจากบริเวณที่มีความหนาแน่นของตัวรับ (acceptor) สูง (p-type) ไปถึงบริเวณที่มีความหนาแน่นของตัวให้ (donor) สูง (n-type)
Junction box	กล่องกันน้ำที่ใช้ใส่จุดเชื่อมต่อของสายไฟฟ้าในระบบโฟลต์ โวลเทอิก
Kilowatt (kW)	1,000 วัตต์
Kilowatt hour (kWh)	1,000 วัตต์ชั่วโมง; หน่วยไฟฟ้า โดยปกติบิลค่าไฟจะระบุค่าไฟเป็นจำนวนบาทต่อหน่วยไฟฟ้า
Lattice	การจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบภายในวัสดุแบบผลึก
Light trapping	การกักแสงภายในวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยการหักเหและสะท้อนแสงที่มุมวิกฤต แสงที่ถูกกักไว้จะผ่านลึกเข้าไปในวัสดุ ทำให้เพิ่มโอกาสในการดูดกลืนแสงได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดพาหะตัวนำไฟฟ้ามากขึ้น
Line commutated inverter	เครื่องแปลงกระแสที่มีการต่อเข้ากับโครงข่ายหรือสายไฟฟ้า การแปลงกำลัง (จากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ) จะถูกควบคุมโดยสายไฟฟ้า ถ้าหากเกิดไฟฟ้าดับในระบบโครงข่ายกำลัง ระบบโฟลต์ โวลเทอิกจะไม่สามารถป้อนกำลังเข้าสู่โครงข่ายได้
Load	ภาระไฟฟ้า; อุปกรณ์ใดๆ ในวงจรไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร
Maximum power point (MPP)	จุดหนึ่งบนเส้นโค้งกระแส – แรงดัน (IV curve) ของแผงเซลล์อาทิตย์เมื่อมีแสงตกกระทบ และผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่ประมาณ 0.45 โวลต์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน
Megawatt (MW)	1 ล้านวัตต์; 1,000 กิโลวัตต์

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_5)

คำศัพท์	ความหมาย
Monolithic structure	อุปกรณ์โฟโตโวลเทอิกที่มีโครงสร้างติดกันเป็นหนึ่งเดียว ซึ่งต่างจากแบบที่มีหลายๆ ส่วนประกอบที่ต้องมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า
Multicrystalline	วัสดุที่ถูกปล่อยให้แข็งตัวในอัตราที่ทำให้เกิดผลึกเล็กๆ หลายๆ ผลึก ก่อตัวขึ้น อะตอมภายในแต่ละผลึกมีการเรียงตัวกันอย่างสมมาตร แต่ที่รอยต่อระหว่างผลึกมีขอบที่ไม่ตรงกัน ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์มีค่าลดลง
Multijunction device	อุปกรณ์โฟโตโวลเทอิกที่มีรอยต่อเซลล์มากกว่าสองส่วนขึ้นไป โดยที่แต่ละส่วนจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สเปกตรัมต่างกัน จึงทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
N-type semiconductor	สารกึ่งตัวนำที่มีการเจือด้วยสารอื่น เพื่อให้มีจำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้น (เช่น การเติมฟอสฟอรัสในซิลิกอน)
NREL	National Renewable Energy Laboratory; เดิมเป็น SERI (Solar Energy Research Institute) ก่อตั้งขึ้นโดยสภานิติบัญญัติของสหรัฐอเมริกาในปี 1974 เพื่อให้เป็นสถาบันวิจัยทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ ได้รับเงินสนับสนุนจาก DOE (Department of Energy ตั้งอยู่ที่เมือง Golden มลรัฐ Colorado ประเทศสหรัฐอเมริกา
Ohm	หน่วยการวัดค่าความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า
Parallel connection	การต่อกันของอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่าสองส่วนขึ้นไป (เช่น เซลล์ แผง หรือ แถว) โดยการต่อสายด้านบวกของอุปกรณ์เข้าด้วยกัน และต่อสายด้านลบของอุปกรณ์เข้าด้วยกัน การเชื่อมต่อลักษณะนี้ทำให้กระแสไฟฟ้ารวมมีค่าเพิ่มขึ้น
pc-Si	Polycrystalline silicon material; เป็นเทคโนโลยีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีซิลิกอน โดยการเทซิลิกอนเหลวลงในแบบ ปล่อยให้เย็นลงจนได้แท่งซิลิกอน แล้วปล่อยให้เย็นผ่านบางๆ

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_6)

คำศัพท์	ความหมาย
Peak load (peak demand)	ภาระไฟฟ้า (การใช้ไฟฟ้า) สูงสุดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยปกติจะกำหนดเป็นวัน
Peak watt (Wp)	วัตต์สูงสุด; หน่วยที่ใช้วัดปริมาณไฟฟ้าที่อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้สูงสุดที่ความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด (1000 วัตต์/ตารางเมตร) ซึ่งมักจะเป็นช่วงเที่ยงของวันที่อากาศแจ่มใส
Peaking electricity	ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้ภาระไฟฟ้าสูงสุดของวัน ซึ่งการไฟฟ้าจะเรียกเก็บค่าไฟแพงขึ้นในช่วงเวลานั้น
Phosphorous (P)	ธาตุทางเคมี (หมายเลขอะตอม 15) ที่ใช้เป็นสารเจือปนในการทำชั้นสารกึ่งตัวนำชนิด n
Photon	อนุภาคแสงซึ่งถือเป็นก้อนพลังงาน
Photovoltaic cell	อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการดูดกลืนลำแสงโฟตอนเข้าไปในชั้นพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำให้พาหะทางไฟฟ้าเกิดการไหลเป็นกระแสไฟฟ้า
Photovoltaic module	เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าและเข้าแผงโดยใช้วัสดุอื่นเช่นกระจกมาครอบเพื่อให้ทนต่อสภาพอากาศ
Photovoltaic peak watt	ค่าพิกัดขาออกสูงสุดของเซลล์ แผง หรือระบบ โดยปกติสภาวะที่พิกัด คือ แสงอาทิตย์ที่ 0.645 วัตต์ต่อตารางนิ้ว (1000 วัตต์ต่อตารางเมตร) อุณหภูมิบรรยากาศที่ 68°F (20°C) และความเร็วลมที่ $6.2 \times 10^{-3}$ ไมล์ต่อวินาที (1 เมตรต่อวินาที)
Photovoltaic system	ส่วนประกอบทั้งหมดของขบวนการโฟโวลเทอิกที่แปลงแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้า รวมถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ Balance-of-system
Polycrystalline	วัสดุที่ถูกปล่อยให้แข็งตัวในอัตราที่ทำให้เกิดผลึกเล็กๆ หลายๆ ผลึก ก่อตัวขึ้น อะตอมภายในแต่ละผลึกมีการเรียงตัวกันอย่างสมมาตร แต่ที่รอยต่อระหว่างผลึกมีขอบที่ไม่ตรงกัน ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์มีค่าลดลง

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_7)

คำศัพท์	ความหมาย
Shunt regulator	การชาร์จเรียงกระแสของแบตเตอรี่วิธีหนึ่งที่กระแสชาร์จถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติ โดยการต่อสวิตช์แบบขนานเข้ากับโฟลต์โวลเทจ เพื่อป้องกันการชาร์จกระแสเกินให้แบตเตอรี่
Silicon (Si)	ธาตุเคมี (หมายเลขอะตอม 14) ซึ่งเป็นสารกึ่งโลหะโดยธรรมชาติ มีสีเทาเข้ม เป็นสารกึ่งตัวนำที่ดี เป็นส่วนประกอบที่พบในทรายและควอตซ์ (อยู่ในรูปออกไซด์, SiO <sub>2</sub> ) ซิลิกอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการนำมาใช้ทำอุปกรณ์โฟลต์โวลเทจมากที่สุด
Solar constant	ความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีค่าเท่ากับ 1,353 วัตต์ต่อตารางเมตรในอวกาศ และประมาณ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตรที่ระดับน้ำทะเลที่เส้นศูนย์สูตร ณ เวลาเที่ยงอาทิตย์ (Solar noon)
Solar noon	เวลาหนึ่งของวันที่แบ่งชั่วโมงที่มีแสงออกเป็นสองส่วนที่เท่ากัน การคำนวณหาเวลาเที่ยงอาทิตย์ ทำได้โดยคำนวณหาช่วงเวลาจากพระอาทิตย์ขึ้นถึงพระอาทิตย์ตก จากนั้นหารด้วยสอง
Solar photovoltaic technology	เทคโนโลยีที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์แปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้า ความสามารถในการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้านี้ (ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์) ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แตกต่างจากเทคโนโลยีพลังงานทดแทนชนิดอื่น เช่น ความร้อนแสงอาทิตย์ ชีวมวล ความร้อนในน้ำทะเล และพลังงานลม
Solar spectrum	ช่วงความถี่ทั้งหมดของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์
Stand-alone PV system	ระบบโฟลต์โวลเทจหรือมีการใช้ร่วมกันกับระบบพลังงานชนิดอื่นที่ไม่ได้มีการต่อเชื่อมเข้ากับโครงข่ายกำลัง ระบบเดี่ยวส่วนมากจะมีแบตเตอรี่หรือการสำรองพลังงานในรูปแบบอื่น
Standard test conditions (STC)	สภาวะทดสอบมาตรฐาน ซึ่งโดยทั่วไปแผงโฟลต์โวลเทจจะถูกทดสอบในห้องทดลองที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (0.645 วัตต์ต่อตารางนิ้ว); สเปกตรัมแสงอาทิตย์อ้างอิงที่มวลอากาศ 1.5; และอุณหภูมิของเซลล์หรือแผงที่ 25 องศาเซลเซียส (77 องศาฟาเรนไฮต์)

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_8)

คำศัพท์	ความหมาย
Substrate	แผ่นปิดด้านที่หันไปทางพื้นดิน (ด้านหลัง) ของแผงโฟโตโวลเทอิก ซึ่งป้องกันไม่ให้วัสดุโฟโตโวลเทอิกภายในเกิดความเสียหายจากสิ่งรบกวนหรือสภาพแวดล้อม
Superstrate	แผ่นปิดด้านที่หันไปทางดวงอาทิตย์ (ด้านหน้า) ของแผงโฟโตโวลเทอิก ซึ่งป้องกันไม่ให้วัสดุโฟโตโวลเทอิกภายในเกิดความเสียหายจากสิ่งรบกวนหรือสภาพแวดล้อม โดยที่ยอมให้แสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ ส่องผ่านได้สูงสุด
TCO	Transparent Conducting Oxide (โปรดคดู tin oxide)
Tin oxide (SnO <sub>2</sub> )	สารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้างซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับอินเดียมออกไซด์ที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายรอยต่อ (heterojunction) ใช้ทำฟิล์มใสตัวนำออกไซด์ (TCO) บนกระจก
Tracking array	แถวของโฟโตโวลเทอิกที่หมุนตามทิศทางของดวงอาทิตย์ เพื่อให้ได้รับแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงมากที่สุดทั้งแสงโดยตรงและแสงกระจาย ทิศทางที่แผงหมุนจะแบ่งเป็นแบบ “หมุนแกนเดียว” ซึ่งแผงจะหมุนตามดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก และแบบ “หมุนสองแกน” ซึ่งแผงจะหันตามดวงอาทิตย์เสมอ (ทั้งทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก และ ทิศเหนือ-ทิศใต้) การหมุนสองแกนนี้ทำให้แผงสามารถรับพลังงานได้สูงที่สุดในแต่ละวัน
Transformer	อุปกรณ์แปลงแรงดันต่ำไปเป็นแรงดันที่สูงขึ้น เพื่อใช้ส่งผ่านสายส่งไปยังศูนย์กลางที่มีการใช้ไฟฟ้า เช่น ในเมือง หรือ โรงงาน
Transmission lines	สายตัวนำที่ส่งผ่านไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังระบบจ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ ผ.1.1 (ต่อ\_9)

คำศัพท์	ความหมาย
Utility-interactive inverter	เครื่องแปลงกระแสที่ทำงานเมื่อมีการต่อเชื่อมเข้ากับโครงข่ายของการไฟฟ้าเท่านั้น เครื่องแปลงกระแสชนิดนี้ใช้ความถี่ของแรงดันในสายไฟฟ้าในการควบคุมค่าพารามิเตอร์ของกำลังขาออกของระบบโฟโต้โวลเทอิก เพื่อให้แน่ใจว่ามีการซิงโครไนส์กับกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า
Wafer	วัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นบางๆ จากการเลื่อยออกมาจากแท่งผลึก
Watt (W)	การวัดค่ากำลังไฟฟ้า; กำลัง (ในหน่วยวัตต์) = กระแส (ในหน่วยแอมป์) x แรงดัน (ในหน่วยโวลต์)
Watt hour (Wh)	1 วัตต์ที่ใช้ในเวลา ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.1.2 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

Symbol	Value	Description
q	$1.602 \times 10^{-19}$ coulomb	electronic charge
$m_0$	$9.100 \times 10^{-31}$ kg	electron rest mass
c	$2.998 \times 10^8$ m/s	speed of light in vacuum
$\epsilon_0$	$8.85418 \times 10^{-14}$ farad/cm $8.85418 \times 10^{-12}$ farad/m	permittivity of free space
h	$6.626 \times 10^{-27}$ erg·s $6.626 \times 10^{-34}$ joule·s	Planck's constant
k	$1.380 \times 10^{-16}$ erg/K $1.380 \times 10^{-23}$ joule/K	Boltzmann's constant
$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$ J/m <sup>2</sup> s K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmann constant
kT/q	0.02586 V	thermal voltage at 300 K
$\lambda_0$	wavelength of 1eV photon	1.24 $\mu$ m

ตารางที่ ผ.1.3 หน่วยและการแปลงค่าต่างๆ

Energy and Power Conversions	
1kWh	$3.6 \times 10^6$ J
1 hp (horsepower)	746 W
1 Btu	1.055 kJ
Time Conversions	
1 year	8765.8 hours
1 hour	3600 sec
1 year	$3.157 \times 10^7$ sec
Solar Radiation Conversions	
1 kWh/m <sup>2</sup>	1 Peak Sun Hour
1 kWh/m <sup>2</sup>	3.6 MJ/m <sup>2</sup>
1 kWh/m <sup>2</sup>	0.0116 Langley
1 kWh/m <sup>2</sup>	860 cal/m <sup>2</sup>
1 MJ/m <sup>2</sup> /day	0.01157 kW/m <sup>2</sup>
1 kW/m <sup>2</sup>	100 mW/cm <sup>2</sup>
Miscellaneous	
1 ft <sup>2</sup>	0.093 m <sup>2</sup>

ตารางที่ ผ.1.4 สัญลักษณ์อักษรกรีก และคำอ่าน

Alpha	A $\alpha$	Nu	N $\nu$
Beta	B $\beta$	Xi	$\Xi$ $\xi$
Gamma	$\Gamma$ $\gamma$	Omicron	O $o$
Delta	$\Delta$ $\delta$	Pi	$\Pi$ $\pi$
Epsilon	E $\epsilon$	Rho	P $\rho$
Zeta	Z $\zeta$	Sigma	$\Sigma$ $\sigma$
Eta	H $\eta$	Tau	T $\tau$
Theta	$\Theta$ $\theta$	Upsilon	Y $\upsilon$
Iota	I $\iota$	Phi	$\Phi$ $\phi$

ตารางที่ ผ.1.5 ตัวอย่างคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

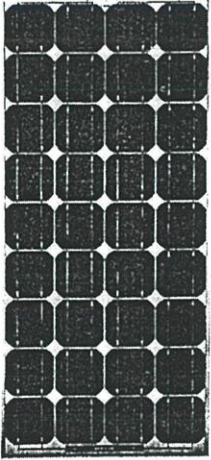
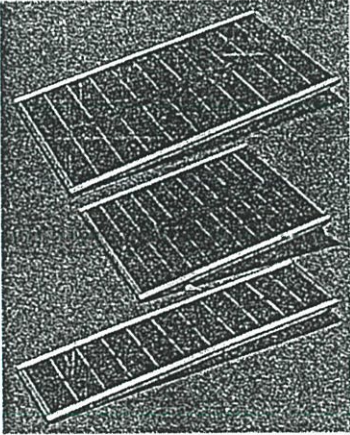
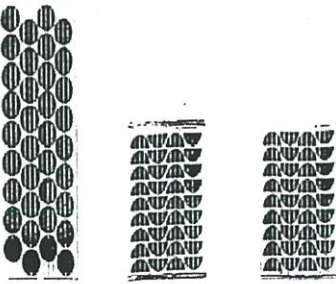
Classification	Effici. (%)	Area. (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF <sub>max</sub> (%)	Test Centre. (and Date)	Description
<b>Silicon Cells</b>							
Si (crystalline)	24.7	4.00 (da)	0.706	42.2	82.8	Sandia (3/99)	UNSW PERL
Si (multicrystalline)	19.8	1.09 (ap)	0.654	38.1	79.5	Sandia (2/98)	UNSW/Eurosolare
Si (supported film)	16.6	0.98 (ap)	0.608	33.5	81.5	NREL (3/97)	AstroPower (Si-Film)
<b>III-V</b>							
GaAs (crystalline cell)	25.1	3.91 (t)	1.022	28.2	87.1	NREL (3/90)	Kopin, AlGaAs window
GaAs (thin film cell)	23.3	4.00 (ap)	1.011	27.6	83.8	NREL (4/90)	Kopin, 5 μm CLEFT
GaAs (multicrystalline cell)	18.2	4.011 (t)	0.994	23.0	79.7	NREL (11/95)	RTI, Ge substrate
InP (crystalline cell)	21.9	4.02 (t)	0.878	29.3	85.4	NREL (4/90)	Spire, epitaxial
<b>Polycrystalline Thin Film</b>							
CdTe (cell)	16.0	1.0 (ap)	0.840	26.1	773.1	JQA (3/97)	Matsushita 3.5 mm CSS
CdTe (submodule)	10.6	63.8 (ap)	6.565	2.26	71.4	NREL (2/95)	ANTEC, 12 cells
CIGS (cell)	18.2	1.129 (t)	0.667	36.5	74.9	NREL (2/99)	NREL, CIGS on glass
CIGS (submodule)	14.2	51.7 (ap)	6.808	3.1	68.3	JQA (10/96)	Showa Shell
<b>Amorphous Si</b>							
a-Si (cell)	12.7	1.0 (da)	0.887	19.4	74.1	JQA (4/92)	Sanyo
a-Si (submodule)	12.0	100 (ap)	12.5	1.3	73.5	JQA (12/92)	Sanyo
<b>Photochemical</b>							
Nanocrystalline Dye	6.5	1.6 (ap)	0.769	13.4	63.0	FhG-ISE (1/97)	INAP
Nanocrystalline Dye (large)	4.7	141.4 (ap)	0.795	11.3	59.2	FhG-ISE (2/98)	INAP
<b>Multijunction Cells</b>							
GaInP/GaAs	30.3	4.0 (t)	2.488	14.22	85.6	JQA (4/96)	Japan Energy (monolithic)
GaAs/CIS (thin film)	25.8	4.00 (t)	-	-	-	NREL (11/89)	Kopin/Boeing (4 terminal)
a-Si/CIGS (thin film)	14.6	2.40 (ap)	-	-	-	NREL (6/88)	ARCO (4 terminal)
a-Si/a-Si/a-SiGe <sub>x</sub>	13.5	0.27 (da)	2.375	7.72	74.4	NREL (10/96)	USSC (monolithic)

หมายเหตุ : ที่มาของข้อมูล นำมาจากข้อมูลการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย  
นิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย



ภาคผนวก ข.

เครื่องมือ และอุปกรณ์ประกอบการวิจัย

ตารางที่ ผ.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ประกอบการวิจัย (หมวดที่ 1 : ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์)

รูปภาพ และลักษณะ โครงสร้าง	รายละเอียด
	<p>แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ของบริษัทบีพีไทยโซลาร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขนาดพิกัดกำลัง 55 วัตต์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้าปกติ 12.0 โวลท์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร 21.2 โวลท์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้า ณ. จุดสูงสุด 17.0 โวลท์</li> <li>- กระแสไฟฟ้า ณ. จุดสูงสุด 3.32 แอมแปร์</li> <li>- กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 3.54 แอมแปร์</li> </ul>
	<p>แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิกอน รุ่น US 64 ของบริษัท UNITED SOLAR SYSTEM Corp.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขนาดพิกัดกำลัง 64 วัตต์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.5 โวลท์</li> <li>- กระแสไฟฟ้าปกติ 3.88 แอมแปร์</li> </ul>
	<p>แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น S13 ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขนาดพิกัดกำลัง 13.59 วัตต์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.45 โวลท์</li> <li>- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร 21.46 โวลท์</li> <li>- กระแสไฟฟ้าปกติ 0.83 แอมแปร์</li> <li>- กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 0.92 แอมแปร์</li> </ul>

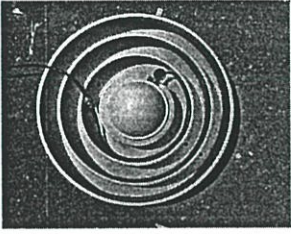
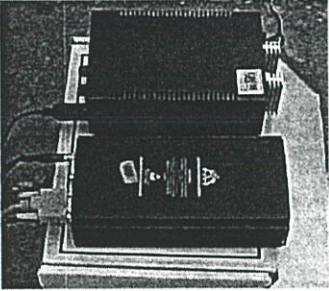
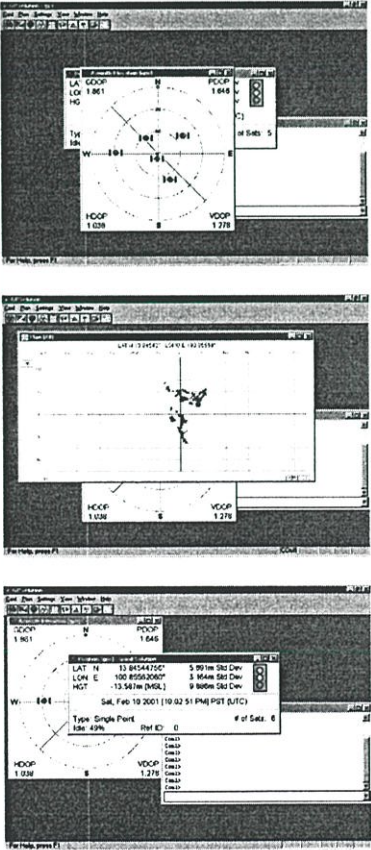
ตารางที่ ผ.2.1 (ต่อ)

รูปภาพ และลักษณะ โครงสร้าง	รายละเอียด
	<p>อุปกรณ์ควบคุม (Control Unit)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- System Voltage                    12.0    Volt</li> <li>- High Voltage Cut Off                15.1    Volt (Solar Panel cut off)</li> <li>- Low Voltage Cut Off                10.8    Volt</li> <li>- Charge &amp; Load Current            30.0    amps.</li> </ul>
	<p>แบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งาน        12        โวลท์</li> <li>- ค่าความจุ                            70        แอมป์-ชั่วโมง</li> </ul>
	<p>แบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด แบบปิดผนึก</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งาน        12        โวลท์</li> <li>- ค่าความจุ                            7.5        แอมป์-ชั่วโมง</li> </ul>
	<p>ลักษณะ โครงสร้างที่รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์</p>

ตารางที่ ผ.2.2 อุปกรณ์ประกอบการทดลองชุดป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ

รูปภาพ และลักษณะ โครงสร้าง	รายละเอียด
	<p>ชุดเครื่องมือสำหรับการวัด และทดสอบผลการป้องกันการผุกร่อน ตามมาตรฐาน (NACE RP 0169-1992)</p>
	<p>หัววัดแบบ Cu/CuSO<sub>4</sub> เพื่อประกอบการวัดผลการป้องกันการผุกร่อน</p>
	<p>เครื่องทดสอบ และวัดค่าความต้านทานดิน ณ. จุดที่ทำการติดตั้งทดสอบระบบ</p>
	<p>ชุดอานอดแบบ Magnesium Anode สำหรับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ</p>

ตารางที่ ผ.2.3 เครื่องมือวัดตำแหน่งที่ตั้ง (GPS)

รูปภาพ และลักษณะโครงสร้าง	รายละเอียด
	<p>อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม</p>
	<p>ชุดแปลงสัญญาณจากอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม เพื่อนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ตำแหน่ง และบอกพิกัดที่ตั้งนั้นๆ</p>
	<p>โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ และแสดงตำแหน่งพิกัดที่ตั้ง โดยมีผลการวัดตำแหน่งที่ทำการทดสอบระบบเป็นดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ตำแหน่งละติจูด : Lat : 13.04543647 ° N</li> <li>- ตำแหน่งลองจิจูด : Long : 100.45561647 ° E</li> </ul>

ตารางที่ ผ.2.4 เครื่องมือวัดประกอบการวิจัย

รูปภาพ และลักษณะโครงสร้าง	รายละเอียด
	<p>มิเตอร์วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า รุ่น FLUKE 77 ที่มีความละเอียด แม่นยำสูง</p>
	<p>มิเตอร์วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้า รุ่น FLUKE 89</p>
	<p>มิเตอร์วัดค่า รุ่น FLUKE 41B เป็นมิเตอร์ที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า และสามารถส่งผ่านข้อมูลในการวัดบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ได้</p>
	<p>มิเตอร์วัดค่า รุ่น FLUKE 64 เป็นมิเตอร์วัดอุณหภูมิด้วยแสงอินฟราเรด</p>

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลสรุปสถิติภูมิอากาศ และความยาวนานแสงแดดที่กรุงเทพฯ

ระหว่างปี 1969 - 2000

## ข้อมูลสรุปสถิติภูมิอากาศ ในช่วงปี 1969-2000

Station <b>BANGKOK</b>	Elevation of station above MSL	3.00 m
Latitude 13.6 N	Height of thermometer above ground	1.25 m
Longitude 100.6 E	Height of wind vane above ground	10.00 m
	Height of rain gauge	1.00 m

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
<b>Air temperature (celsius)</b>													
Extreme maximum	35.9	37.0	37.6	40.0	39.2	37.8	38.1	36.6	37.1	35.2	35.5	35.1	40.0
Date	24/99	14/91	29/98	23/90	1/91	8/77	11/77	2/71	1/72	9/97	7/90	7/97	
Mean maximum	31.8	32.7	33.7	34.9	34.4	33.3	32.9	32.3	32.2	31.7	31.1	30.6	32.6
Mean	26.6	28.1	29.3	30.5	30.2	29.3	29.1	28.8	28.4	28.0	27.1	25.8	28.4
Mean minimum	21.2	23.3	25.0	26.1	25.8	25.5	25.2	25.1	24.7	24.4	23.0	21.0	24.2
Extreme minimum	11.0	14.5	16.0	21.3	21.8	22.2	22.0	21.6	21.4	18.3	15.0	11.5	11.0
Date	15/76	12/74	3/86	6/69	5/00	27/91	16/76	2/93	5/76	25/94	17/71	31/75	
● <b>Grass minimum temperature (celsius)</b>													
Mean minimum	17.9	20.4	22.9	24.6	24.6	24.2	23.9	23.7	23.6	22.8	20.4	17.7	22.2
Extreme minimum	7.0	8.8	11.6	18.0	20.2	17.2	20.0	20.0	17.3	14.0	9.7	3.7	3.7
Date	16/72	12/74	4/72	7/69	26/72	14/70	16/76	29/79	23/69	25/94	17/71	25/99	
● <b>Water temperature (celcius)</b>													
Mean maximum	30.8	32.6	34.1	35.2	35.0	34.2	33.6	33.4	33.3	32.9	31.6	29.9	33.1
Mean	25.1	26.7	28.0	29.4	29.3	28.7	28.3	28.2	28.3	27.8	26.2	24.1	27.5
Mean minimum	19.3	20.6	22.2	23.7	23.8	23.5	23.2	23.1	23.1	22.7	20.7	18.3	22.0
● <b>Relative humidity (%)</b>													
Extreme maximum	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Mean maximum	92	94	94	95	95	94	94	95	95	94	93	90	94
Mean	67	69	72	72	74	75	75	77	78	76	73	69	73
Mean minimum	42	47	51	51	55	59	58	60	59	59	54	48	54
Extreme minimum	10	7	17	14	23	27	25	25	28	25	22	19	7
Date	26/80	1/83	7/80	5/92	20/83	14/83	1/83	31/82	13/82	9/82	24/82	31/82	
● <b>Soil temperature (celcius)</b>													
Mean at surface	29.6	31.1	32.9	33.4	32.2	31.3	30.5	30.2	29.8	29.4	29.0	28.4	30.7
Mean at 5 cm	29.7	31.1	33.1	33.8	32.5	31.5	30.8	30.1	30.1	29.8	29.2	28.4	30.8
Mean at 10 cm	29.0	30.6	32.5	33.6	32.7	31.4	30.9	30.4	30.2	29.9	29.2	28.4	30.7
Mean at 20 cm	28.8	30.5	32.3	33.3	32.5	31.6	31.2	30.5	30.2	29.9	29.4	28.4	30.7
Mean at 50 cm	28.6	29.9	31.5	32.6	32.3	31.5	31.5	30.9	30.6	30.2	29.5	28.7	30.7
Mean at 100 cm	29.4	29.4	30.6	31.4	31.7	31.4	31.4	31.2	31.0	30.8	30.2	29.3	30.7

- **Rainfall (mm)**

Total amount	12.5	23.2	27.3	79.2	197.0	149.0	143.7	206.9	322.0	229.5	55.9	7.2	1453.4
Number of rainy day	2	4	4	6	13	15	17	19	20	15	6	3	124
Greatest in 24 hr	64.1	63.5	62.3	101.8	198.1	128.4	79.2	106.1	133.7	134.8	125.3	41.8	198.1
Date	11/98	9/88	5/89	23/82	8/86	28/98	7/98	31/83	17/87	18/83	27/77	8/72	

- **Evaporation (mm)**

Mean	4.7	5.5	6.2	6.4	5.8	5.3	5.1	4.8	4.6	4.5	4.8	4.9	5.2
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- **Wind**

Prevailing direction	NE	S	S	S	S	SW	SW	SW	SW	NE	NE	NE	
Mean speed (m/s)	1.4	1.5	2.0	1.7	1.5	1.6	1.5	1.5	1.2	1.3	1.6	1.4	

- **Sunshine duration (hr)**

Extreme maximum	10.7	11.4	11.0	11.4	11.6	11.7	11.8	11.3	10.9	11.2	10.7	10.6	11.8
Date	8/69	21/79	21/87	14/70	4/69	18/97	8/99	12/70	24/69	17/69	10/69	1/69	
Mean	8.0	8.2	8.2	8.0	6.6	5.0	4.8	4.4	4.7	5.8	7.1	7.7	6.5

Remark : "-" indicate missing data

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการทดสอบชุดจำลองรังสีแสงอาทิตย์

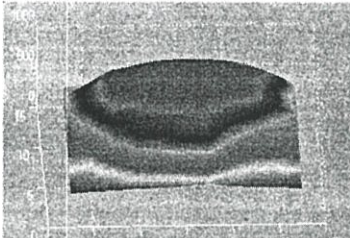
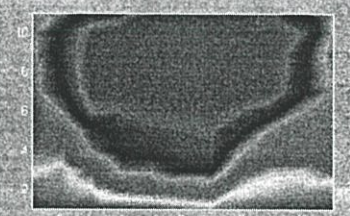
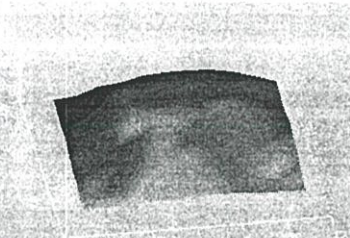

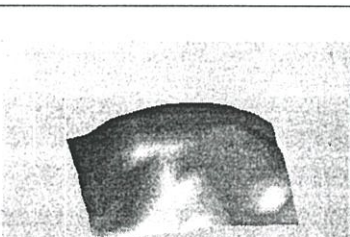

### ฐานข้อมูลการทดสอบชุดจำลองแสงอาทิตย์ (SUN SIMULATOR)

- ใช้หลอดทั้งสแตนขนาด 200 วัตต์ จำนวน 48 หลอด
- พื้นที่ทดสอบ 2.0 x 2.0 เมตร
- หน่วยที่ใช้วัดค่าเป็น ฟุตแคนเดิล
- ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการทดสอบการส่องสว่าง (ห้องมืด) ที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ และปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อ เช่น อุณหภูมิ และการถูกรบกวนจากแสงในส่วนอื่นๆ เป็นต้น

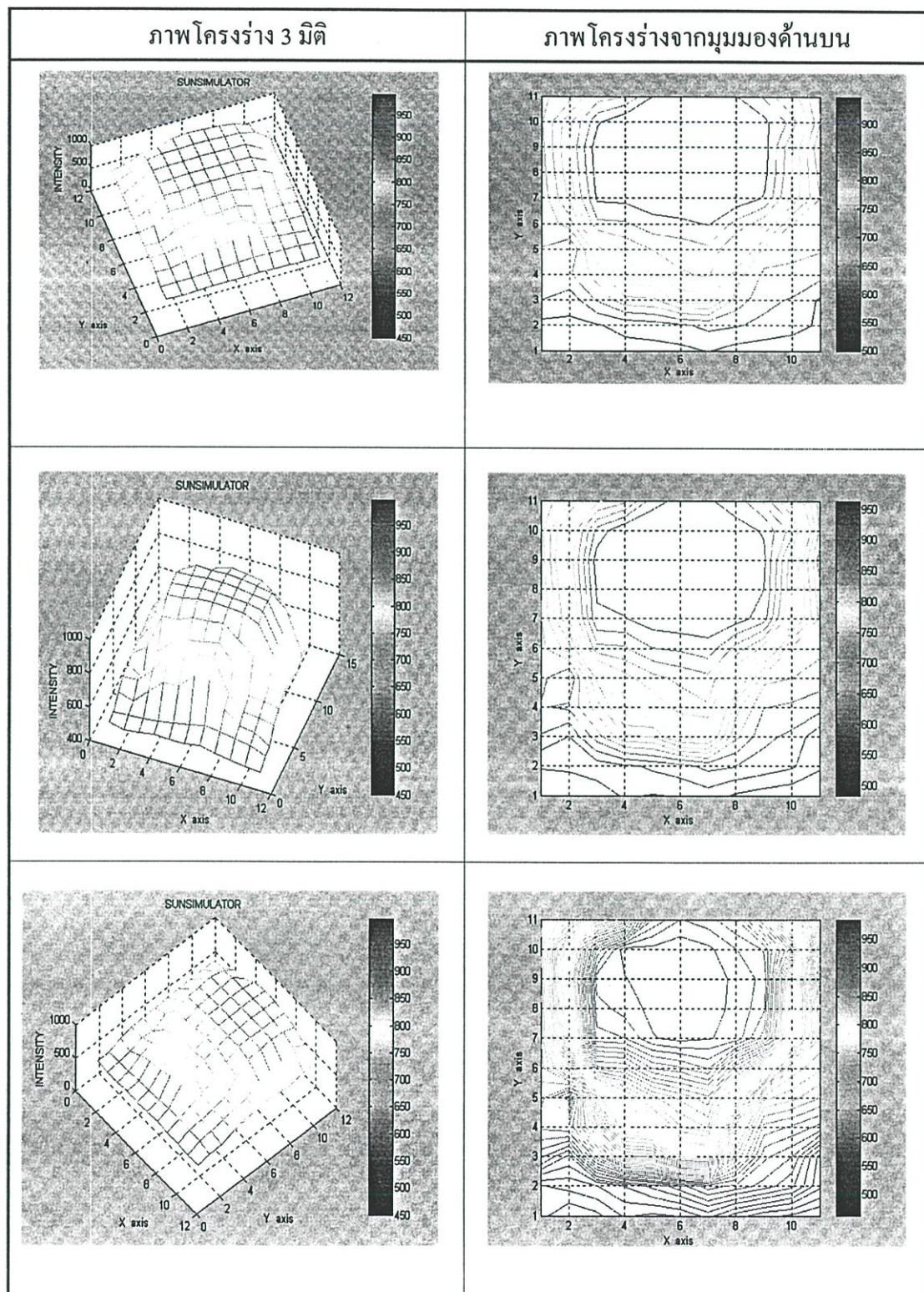
โดยสามารถแสดงผลการทดสอบวัดค่าได้ดังนี้

```
sun_simulator_data =[478 462 470 487 482 486 501 479 465 459 450;
                    485 490 497 510 525 540 563 553 540 524 489;
                    549 518 606 684 690 772 775 630 560 545 492;
                    584 593 671 784 795 841 855 670 588 579 565;
                    598 550 732 813 850 869 886 790 631 621 604;
                    611 673 886 890 927 935 950 880 810 648 630;
                    618 760 957 961 984 990 986 981 943 783 649;
                    623 785 968 978 989 991 987 984 963 796 630;
                    635 801 980 984 995 997 992 982 969 801 604;
                    642 783 940 994 990 993 988 974 960 878 650;
                    638 680 820 850 950 974 967 950 890 780 643];
```

และสามารถแสดงผลการกระจายแสงภายใต้พื้นที่ทดสอบใช้งาน ในมุมมองต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้  
 ตารางที่ ผ.4.1 ผลการกระจายแสงภายใต้พื้นที่ทดสอบใช้งาน ของชุดจำลองแสงอาทิตย์  
 ในมุมมองต่างๆ

ภาพโครงสร้าง 3 มิติ	ภาพโครงสร้างจากมุมมองด้านบน
 <pre data-bbox="189 733 518 873">z=peaks(75); surf(z); shading interp; colormap(hsv);</pre> <p>Command Window</p>	 <pre data-bbox="735 743 1064 862">z=peaks(75); pcolor(z); shading interp; colormap(hsv);</pre> <p>Command Window</p>
 <pre data-bbox="189 1196 518 1315">z=peaks(75); surf(z); shading interp; colormap(copper);</pre> <p>Command Window</p>	 <pre data-bbox="735 1207 1064 1304">z=peaks(75); pcolor(z); shading interp; colormap(hot);</pre> <p>Command Window</p>
 <pre data-bbox="189 1660 518 1778">z=peaks(75); surf(z); shading interp; colormap(gray);</pre> <p>Command Window</p>	 <pre data-bbox="735 1692 1064 1789">z=peaks(75); pcolor(z); shading interp; colormap(gray);</pre> <p>Command Window</p>

ตารางที่ ๔.๑ (ต่อ)



**ภาคผนวก จ.**

**ฐานข้อมูลการทดสอบชุดป้องกันการผูกרוןของท่อโลหะ**

ตารางที่ ผ.5.1.1 ผลการทดสอบสภาวะการประจุแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เวลา	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	เวลา	แรงดัน (V)	กระแส (mA)
6.00	6.05	0.00	12.30	15.11	389.40
6.30	10.20	0.00	13.00	15.14	392.20
7.00	13.80	25.23	13.30	15.09	373.40
7.30	14.30	55.26	14.00	15.11	364.32
8.00	14.61	100.54	14.30	15.01	355.54
8.30	14.84	182.20	15.00	14.92	340.20
9.00	14.71	292.90	15.30	14.90	286.34
9.30	14.76	332.60	16.00	14.83	220.20
10.00	14.96	372.40	16.30	14.87	173.30
10.30	14.98	386.30	17.00	14.82	110.10
11.00	15.01	398.40	17.30	14.50	65.43
11.30	15.05	415.20	18.00	13.93	32.10
12.00	15.09	412.40			

ตารางที่ ผ.5.1.2 การทดสอบผลการป้องกันการผุกร่อน ในช่วงเวลา 7 วันที่ทำการทดสอบระบบ (ตามมาตรฐาน NACE RP 0169-1992)

วันที่ทดสอบ	ค่าที่โหนดภาระ		P/S [ON] (V)	P/S [OFF] (V)	P/S[ON] ทันทีทันใด (V)	P/S[OFF] ทันทีทันใด (V)	ผลการตรวจสอบ
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)					
1	11.43	44.46	-2.00	-0.43	-1.15	-0.90	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
2	11.44	43.32	-1.98	-0.44	-1.17	-0.92	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
3	11.41	45.86	-1.98	-0.44	-1.16	-0.87	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
4	11.41	43.29	-1.99	-0.42	-1.17	-0.88	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
5	11.50	46.32	-1.99	-0.43	-1.15	-0.86	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
6	11.52	45.46	-1.97	-0.44	-1.14	-0.89	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ
7	11.40	43.61	-2.00	-0.42	-1.16	0.88	มีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ

ตารางที่ ผ.5.1.3 ผลการป้องกันการผุกร่อนหลังจากการจำลองสภาวะการขาดพลังงานของระบบ เป็นเวลา 5 วัน (ตามมาตรฐาน NACE RP 0169-1992)

ค่าที่โหนดภาระ		P/S [ON] (V)	P/S [OFF] (V)	P/S[ON] ทันทีทันใด (V)	P/S[OFF] ทันทีทันใด (V)	ผลการตรวจสอบ
แรงดัน (V)	กระแส (mA)					
10.90	43.40	-1.95	-0.42	-1.15	-0.87	ยังคงมีสภาวะการป้องกันเป็นปกติ

ตารางที่ ผ.5.2.1 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 1

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.50	11.75	43.68	0.51
1.00	12.03	0.00	0.00	0.00	12.46	11.75	43.92	0.52
1.30	12.01	0.00	0.00	0.00	12.49	11.74	43.82	0.51
2.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.43	11.74	44.03	0.52
2.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.45	11.74	44.26	0.52
3.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.46	11.75	43.92	0.52
3.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.49	11.74	44.36	0.52
4.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.47	11.74	45.01	0.53
4.30	12.05	0.00	0.00	0.00	12.43	11.74	45.86	0.54
5.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.45	11.74	44.24	0.52
5.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.43	11.73	44.53	0.52
6.00	12.06	6.10	0.00	0.00	12.44	11.72	45.12	0.53
6.30	12.05	10.25	0.00	0.00	12.45	11.72	44.13	0.52
7.00	12.03	12.50	23.12	0.29	12.44	11.71	44.58	0.52
7.30	12.04	13.85	80.00	1.11	12.47	11.70	44.26	0.52
8.00	12.02	14.03	100.50	1.41	12.46	11.73	43.92	0.52
8.30	12.05	14.25	160.30	2.28	12.47	11.74	44.16	0.52
9.00	12.02	14.65	210.10	3.08	12.48	11.76	45.52	0.54
9.30	12.01	14.78	284.20	4.20	12.47	11.75	44.18	0.52
10.00	12.03	14.98	310.60	4.65	12.49	11.73	44.91	0.53
10.30	12.09	14.84	328.40	4.87	12.50	11.79	44.86	0.53
11.00	12.07	15.05	374.10	5.63	12.51	11.80	45.16	0.53
11.30	12.04	15.25	400.20	6.10	12.58	11.85	45.18	0.54
12.00	12.05	15.30	415.80	6.36	12.57	11.87	45.11	0.54

ตารางที่ ผ.5.2.1 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.03	15.14	372.40	5.64	12.63	11.93	44.88	0.54
13.00	12.04	15.03	341.30	5.13	12.61	11.91	45.21	0.54
13.30	12.03	14.87	312.25	4.64	12.57	11.89	45.82	0.54
14.00	12.05	15.01	300.12	4.50	12.58	11.90	46.16	0.55
14.30	12.01	14.85	284.80	4.23	12.59	11.92	45.85	0.55
15.00	12.06	14.72	262.40	3.86	12.57	11.89	46.31	0.55
15.30	12.04	14.65	242.30	3.55	12.54	11.85	45.13	0.53
16.00	12.03	14.30	184.30	2.64	12.56	11.87	45.32	0.54
16.30	12.00	14.10	145.50	2.05	12.55	11.85	45.25	0.54
17.00	12.06	13.25	102.80	1.36	12.56	11.85	45.32	0.54
17.30	12.08	12.25	73.46	0.90	12.55	11.80	45.11	0.53
18.00	12.01	12.01	25.12	0.30	12.56	11.82	44.94	0.53
18.30	12.06	10.12	0.00	0.00	12.54	11.81	44.96	0.53
19.00	12.07	3.21	0.00	0.00	12.54	11.80	45.08	0.53
19.30	12.05	0.40	0.00	0.00	12.55	11.80	44.44	0.52
20.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.52	11.81	44.26	0.52
20.30	12.03	0.00	0.00	0.00	12.51	11.81	45.12	0.53
21.00	12.02	0.00	0.00	0.00	12.50	11.80	44.86	0.53
21.30	12.00	0.00	0.00	0.00	12.49	11.79	44.12	0.52
22.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.51	11.79	44.06	0.52
22.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.49	11.75	44.29	0.52
23.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.49	11.76	45.18	0.53
23.30	12.04	0.00	0.00	0.00	12.47	11.75	44.36	0.52
24.00	12.05	0.00	0.00	0.00	12.48	11.74	44.02	0.52

ตารางที่ ผ.5.2.2 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 2

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.04	0.00	0.00	0.00	12.55	11.86	45.72	0.54
1.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.56	11.85	46.02	0.55
1.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.54	11.84	45.96	0.54
2.00	12.06	0.00	0.00	0.00	12.51	11.80	44.85	0.53
2.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.53	11.82	44.38	0.53
3.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.52	11.83	45.92	0.54
3.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.53	11.80	45.48	0.54
4.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.52	11.81	45.32	0.54
4.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.51	11.81	45.86	0.54
5.00	12.10	0.00	0.00	0.00	12.50	11.79	45.91	0.54
5.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.51	11.77	45.93	0.54
6.00	12.02	4.10	0.00	0.00	12.54	11.73	45.12	0.53
6.30	12.03	9.65	0.00	0.00	12.53	11.74	45.32	0.53
7.00	12.05	12.48	25.12	0.31	12.54	11.75	45.36	0.53
7.30	12.06	12.98	65.03	0.24	12.54	11.75	45.18	0.53
8.00	12.06	13.79	86.42	1.20	12.55	11.74	45.32	0.53
8.30	12.00	14.11	150.26	2.12	12.56	11.75	45.29	0.53
9.00	12.03	14.32	190.31	2.73	12.58	11.76	44.86	0.53
9.30	12.05	14.54	240.12	3.49	12.61	11.75	43.18	0.51
10.00	12.07	14.78	290.17	4.29	12.64	11.77	43.36	0.51
10.30	12.07	14.92	316.71	4.73	12.63	11.78	44.29	0.52
11.00	12.06	15.05	332.69	5.01	12.71	11.82	44.36	0.52
11.30	12.07	15.18	376.52	5.72	12.73	11.82	44.92	0.53
12.00	12.09	15.28	410.39	6.27	12.70	11.83	44.82	0.53

ตารางที่ ผ.5.2.2 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.04	15.36	426.82	6.56	12.86	11.89	43.91	0.52
13.00	12.03	15.10	392.11	5.92	12.79	11.92	43.26	0.52
13.30	12.03	14.96	362.32	5.42	12.73	11.93	43.32	0.52
14.00	12.00	14.82	302.24	4.48	12.74	11.94	42.92	0.51
14.30	12.04	14.86	271.67	4.04	12.78	11.92	43.11	0.51
15.00	12.06	14.69	232.42	3.41	12.75	11.93	43.92	0.52
15.30	12.06	14.54	228.14	3.32	12.73	11.92	43.82	0.52
16.00	12.04	14.41	200.36	2.89	12.71	11.92	44.91	0.54
16.30	12.03	14.02	186.18	2.61	12.69	11.91	45.32	0.54
17.00	12.07	13.71	132.20	1.81	12.70	11.90	45.10	0.54
17.30	12.04	12.92	81.12	1.05	12.71	11.90	44.21	0.53
18.00	12.04	11.16	0.00	0.00	12.66	11.90	44.32	0.53
18.30	12.08	8.19	0.00	0.00	12.69	11.92	43.09	0.51
19.00	12.06	0.00	0.00	0.00	12.65	11.93	43.00	0.51
19.30	12.13	0.00	0.00	0.00	12.65	11.94	43.38	0.52
20.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.61	11.92	44.29	0.53
20.30	12.10	0.00	0.00	0.00	12.60	11.91	44.38	0.53
21.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.60	11.90	44.92	0.53
21.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.58	11.89	45.68	0.54
22.00	12.05	0.00	0.00	0.00	12.59	11.88	45.12	0.54
22.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.54	11.87	45.32	0.54
23.00	12.03	0.00	0.00	0.00	12.57	11.87	45.84	0.54
23.30	12.02	0.00	0.00	0.00	12.56	11.86	45.92	0.54
24.00	12.05	0.00	0.00	0.00	12.55	11.85	46.10	0.55

ตารางที่ ผ.5.2.3 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 3

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ (Vb)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.54	11.79	45.92	0.54
1.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.54	11.79	46.03	0.54
1.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.53	11.79	46.22	0.55
2.00	12.10	0.00	0.00	0.00	12.51	11.80	46.31	0.55
2.30	12.13	0.00	0.00	0.00	12.52	11.77	46.33	0.55
3.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.49	11.78	46.91	0.55
3.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.47	11.79	46.32	0.55
4.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.46	11.78	46.77	0.55
4.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.45	11.79	45.99	0.54
5.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.44	11.78	46.38	0.55
5.30	12.12	0.00	0.00	0.00	12.43	11.79	46.10	0.54
6.00	12.00	5.20	0.00	0.00	12.43	11.71	46.72	0.55
6.30	12.01	10.76	0.00	0.00	12.40	11.70	47.12	0.55
7.00	12.06	12.82	30.10	0.39	12.42	11.70	46.96	0.55
7.30	12.04	13.12	70.39	0.92	12.44	11.72	46.32	0.54
8.00	12.03	13.69	90.42	1.24	12.46	11.73	46.35	0.54
8.30	12.06	14.10	140.12	1.98	12.48	11.74	46.22	0.54
9.00	12.05	14.29	180.16	2.57	12.47	11.77	46.33	0.55
9.30	12.04	14.56	245.20	3.57	12.56	11.78	47.02	0.55
10.00	12.05	15.10	280.12	4.23	12.57	11.79	46.66	0.55
10.30	12.06	15.19	330.72	5.02	12.62	11.82	46.22	0.55
11.00	12.08	15.31	396.12	6.07	12.59	11.85	45.86	0.54
11.30	12.07	15.29	413.21	6.32	12.62	11.86	44.11	0.52
12.00	12.05	15.45	432.36	6.68	12.71	11.85	44.32	0.53

ตารางที่ ผ.5.2.3 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.08	15.68	430.40	6.75	12.69	11.90	44.82	0.53
13.00	12.04	15.10	401.02	6.06	12.62	11.91	44.28	0.53
13.30	12.00	15.18	386.12	5.86	12.64	11.92	44.38	0.53
14.00	12.01	14.96	340.20	5.09	12.61	11.91	44.62	0.53
14.30	11.99	14.76	292.46	4.32	12.63	11.91	43.19	0.51
15.00	12.01	14.62	245.82	3.59	12.61	11.89	44.29	0.53
15.30	12.06	14.49	276.91	4.01	12.59	11.88	45.26	0.54
16.00	12.05	14.32	180.62	2.59	12.58	11.86	45.63	0.54
16.30	12.04	14.01	172.63	2.42	12.63	11.89	45.54	0.54
17.00	12.05	13.59	110.82	1.51	12.62	11.90	44.28	0.53
17.30	12.09	12.44	60.28	0.75	12.63	11.88	43.19	0.51
18.00	12.07	11.18	0.00	0.00	12.65	11.89	43.36	0.52
18.30	12.10	4.12	0.00	0.00	12.63	11.88	43.92	0.52
19.00	12.11	0.00	0.00	0.00	12.64	11.87	43.18	0.51
19.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.61	11.88	44.02	0.52
20.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.58	11.87	45.36	0.54
20.30	12.05	0.00	0.00	0.00	12.57	11.88	45.44	0.54
21.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.57	11.86	45.38	0.54
21.30	12.05	0.00	0.00	0.00	12.58	11.85	45.28	0.54
22.00	12.10	0.00	0.00	0.00	12.57	11.85	45.19	0.54
22.30	12.11	0.00	0.00	0.00	12.56	11.84	45.33	0.54
23.00	12.12	0.00	0.00	0.00	12.55	11.83	45.69	0.54
23.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.53	11.82	45.83	0.54
24.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.55	11.80	45.72	0.54

ตารางที่ ผ.5.2.4 ผลการทดสอบระบบป้องกันการสุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 4

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.48	11.71	46.61	0.55
1.00	12.06	0.00	0.00	0.00	12.47	11.72	47.39	0.56
1.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.47	11.70	47.32	0.55
2.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.45	11.64	45.18	0.53
2.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.41	11.61	44.92	0.52
3.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.36	11.60	43.99	0.51
3.30	12.10	0.00	0.00	0.00	12.37	11.54	45.30	0.52
4.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.32	11.55	47.04	0.54
4.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.30	11.51	48.36	0.56
5.00	12.04	0.00	0.00	0.00	12.25	11.47	45.92	0.53
5.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.24	11.45	44.87	0.51
6.00	12.10	3.30	0.00	0.00	12.21	11.44	44.39	0.51
6.30	12.08	8.69	0.00	0.00	12.25	11.47	45.32	0.52
7.00	12.09	10.20	0.00	0.00	12.27	11.46	43.92	0.50
7.30	12.10	11.06	12.43	0.14	12.28	11.49	44.32	0.51
8.00	12.08	11.36	16.48	0.19	12.27	11.48	45.73	0.53
8.30	12.06	11.86	20.26	0.24	12.30	11.48	45.82	0.53
9.00	12.05	12.01	80.13	0.96	12.32	11.50	46.52	0.54
9.30	12.09	11.74	76.42	0.90	12.35	11.54	46.72	0.54
10.00	12.07	12.32	130.41	1.61	12.37	11.60	47.12	0.55
10.30	12.10	11.39	100.40	1.14	12.38	11.63	45.42	0.53
11.00	12.12	11.46	110.21	1.26	12.40	11.67	43.44	0.51
11.30	12.11	12.10	138.12	1.67	12.38	11.65	44.46	0.52
12.00	12.09	11.12	89.36	0.99	12.39	11.66	44.39	0.52

ตารางที่ ผ.5.2.4 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.07	10.92	70.72	0.77	12.39	11.67	48.92	0.57
13.00	12.06	10.16	68.12	0.69	12.37	11.66	47.11	0.55
13.30	12.05	11.11	75.39	0.84	12.35	11.67	47.31	0.55
14.00	12.01	10.36	65.72	0.68	12.36	11.65	46.92	0.55
14.30	12.05	10.11	60.19	0.61	12.37	11.66	46.84	0.55
15.00	12.07	10.36	62.13	0.64	12.36	11.60	46.86	0.54
15.30	12.09	10.11	70.33	0.71	12.35	11.65	45.92	0.54
16.00	12.10	11.01	76.19	0.84	12.33	11.64	47.14	0.55
16.30	12.11	11.86	92.86	1.10	12.35	11.63	45.33	0.53
17.00	12.09	11.89	102.34	1.22	12.34	11.64	44.11	0.51
17.30	12.10	12.32	88.92	1.10	12.33	11.64	44.86	0.52
18.00	12.11	11.12	0.00	0.00	12.31	11.63	43.92	0.51
18.30	12.10	8.04	0.00	0.00	12.28	11.60	43.82	0.51
19.00	12.08	0.04	0.00	0.00	12.29	11.60	44.69	0.52
19.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.31	11.60	42.82	0.50
20.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.32	11.58	43.29	0.50
20.30	12.06	0.00	0.00	0.00	12.28	11.59	44.28	0.51
21.00	12.08	0.00	0.00	0.00	12.27	11.57	46.12	0.53
21.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.28	11.57	45.86	0.53
22.00	12.11	0.00	0.00	0.00	12.27	11.56	47.38	0.55
22.30	12.13	0.00	0.00	0.00	12.28	11.55	45.32	0.52
23.00	12.10	0.00	0.00	0.00	12.25	11.54	44.52	0.51
23.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.26	11.52	45.62	0.53
24.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.27	11.52	44.78	0.52

ตารางที่ ผ.5.2.5 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 5

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.07	0.00	0.00	0.00	12.18	11.44	43.82	0.50
1.00	12.05	0.00	0.00	0.00	12.16	11.42	44.69	0.51
1.30	12.09	0.00	0.00	0.00	12.17	11.40	42.82	0.50
2.00	12.10	0.00	0.00	0.00	12.15	11.40	43.29	0.50
2.30	12.10	0.00	0.00	0.00	12.16	11.41	44.28	0.51
3.00	12.11	0.00	0.00	0.00	12.15	11.38	46.12	0.53
3.30	12.12	0.00	0.00	0.00	12.14	11.36	45.86	0.52
4.00	12.09	0.00	0.00	0.00	12.14	11.38	45.38	0.52
4.30	12.08	0.00	0.00	0.00	12.12	11.37	45.32	0.52
5.00	12.07	0.00	0.00	0.00	12.13	11.35	44.52	0.51
5.30	12.10	0.00	0.00	0.00	12.13	11.35	45.62	0.52
6.00	12.08	3.00	0.00	0.00	12.12	11.33	46.87	0.53
6.30	12.12	6.25	0.00	0.00	12.10	11.31	46.61	0.53
7.00	12.11	8.96	0.00	0.00	12.08	11.32	47.39	0.54
7.30	12.16	10.00	11.22	0.13	12.09	11.32	47.32	0.54
8.00	12.12	10.12	12.86	0.20	12.09	11.33	45.18	0.51
8.30	12.06	10.72	18.92	0.28	12.06	11.32	44.92	0.51
9.00	12.08	10.68	18.80	0.35	12.07	11.30	43.99	0.50
9.30	12.09	11.13	25.32	0.36	12.07	11.31	45.30	0.51
10.00	12.06	11.32	30.46	0.58	12.05	11.28	47.44	0.54
10.30	12.07	10.36	35.12	0.97	12.04	11.29	48.36	0.55
11.00	12.10	11.42	50.82	1.24	12.04	11.30	45.92	0.52
11.30	12.11	12.03	80.49	0.80	12.02	11.28	44.87	0.51
12.00	12.09	12.36	100.31	0.94	12.02	11.27	44.99	0.51

ตารางที่ ผ.5.2.5 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.07	11.28	70.72	1.00	12.01	11.25	45.32	0.49
13.00	12.06	11.43	82.10	0.73	12.00	11.24	43.12	0.49
13.30	12.10	11.22	89.22	0.75	12.01	11.25	43.82	0.49
14.00	12.12	10.39	70.11	0.89	11.96	11.24	44.79	0.50
14.30	12.10	10.86	69.33	0.75	11.98	11.31	44.36	0.50
15.00	12.11	11.32	78.63	0.89	11.97	11.28	46.44	0.52
15.30	12.09	12.11	92.11	1.12	11.98	11.33	45.11	0.51
16.00	12.10	12.82	112.36	1.44	11.92	11.40	45.75	0.52
16.30	12.08	12.39	190.82	2.36	11.93	11.38	46.54	0.53
17.00	12.08	12.40	132.14	1.64	11.95	11.36	45.18	0.51
17.30	12.10	12.00	70.26	0.84	11.92	11.41	46.88	0.54
18.00	12.12	10.32	0.00	0.00	11.90	11.37	47.10	0.54
18.30	12.09	3.36	0.00	0.00	11.84	11.32	46.22	0.52
19.00	12.08	0.00	0.00	0.00	11.85	11.35	44.12	0.50
19.30	12.07	0.00	0.00	0.00	11.83	11.29	46.22	0.52
20.00	12.06	0.00	0.00	0.00	11.76	11.25	44.82	0.50
20.30	12.09	0.00	0.00	0.00	11.78	11.26	43.99	0.50
21.00	12.10	0.00	0.00	0.00	11.79	11.23	43.82	0.49
21.30	12.11	0.00	0.00	0.00	11.74	11.19	44.86	0.50
22.00	12.12	0.00	0.00	0.00	11.73	11.08	45.92	0.51
22.30	12.10	0.00	0.00	0.00	11.72	11.14	44.10	0.49
23.00	12.04	0.00	0.00	0.00	11.71	11.05	43.82	0.48
23.30	12.06	0.00	0.00	0.00	11.70	10.98	44.31	0.49
24.00	12.07	0.00	0.00	0.00	11.71	10.99	43.92	0.48

ตารางที่ ผ.5.2.6 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 6

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.08	0.00	0.00	0.00	11.70	10.98	45.44	0.50
1.00	12.06	0.00	0.00	0.00	11.69	10.96	46.12	0.51
1.30	12.08	0.00	0.00	0.00	11.65	10.94	46.13	0.51
2.00	12.10	0.00	0.00	0.00	11.66	10.89	45.14	0.49
2.30	12.10	0.00	0.00	0.00	11.64	10.92	44.32	0.48
3.00	12.09	0.00	0.00	0.00	11.58	10.91	43.92	0.48
3.30	12.08	0.00	0.00	0.00	11.57	10.86	44.14	0.48
4.00	12.12	0.00	0.00	0.00	11.55	10.88	46.28	0.50
4.30	12.08	0.00	0.00	0.00	11.56	10.84	45.44	0.49
5.00	12.07	0.00	0.00	0.00	11.48	10.85	43.12	0.47
5.30	12.05	0.00	0.00	0.00	11.44	10.82	44.36	0.48
6.00	12.06	4.62	0.00	0.00	11.47	10.80	44.59	0.48
6.30	12.06	8.29	0.00	0.00	11.45	10.75	45.69	0.49
7.00	12.08	10.12	0.00	0.00	11.44	10.74	47.11	0.51
7.30	12.10	10.32	14.12	0.15	11.39	10.70	46.82	0.50
8.00	12.11	11.62	36.99	0.43	11.44	10.72	46.32	0.50
8.30	12.10	12.86	80.24	1.03	11.45	10.71	46.18	0.50
9.00	12.09	12.92	112.43	1.45	11.47	10.68	46.00	0.49
9.30	12.09	13.12	132.14	1.73	11.49	10.65	45.41	0.48
10.00	12.10	13.43	149.81	2.01	11.50	10.65	45.28	0.48
10.30	12.08	12.22	100.21	1.23	11.46	10.64	44.14	0.47
11.00	12.07	12.31	110.32	1.36	11.45	10.66	44.01	0.47
11.30	12.08	11.36	86.42	0.98	11.41	10.64	44.98	0.48
12.00	12.09	11.46	70.11	0.80	11.40	10.63	44.92	0.48

ตารางที่ ผ.5.2.6 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.10	11.11	66.22	0.74	11.36	10.60	45.14	0.48
13.00	12.11	11.09	68.14	0.76	11.27	10.58	44.99	0.48
13.30	12.08	11.32	70.22	0.80	11.24	10.55	45.84	0.48
14.00	12.09	10.81	69.44	0.75	11.25	10.53	46.88	0.49
14.30	12.10	10.86	50.13	0.54	11.16	10.50	47.10	0.50
15.00	12.11	10.92	62.14	0.68	11.15	10.51	45.09	0.47
15.30	12.10	9.86	36.81	0.36	11.17	10.50	44.12	0.46
16.00	12.07	10.71	48.96	0.52	11.19	10.47	44.38	0.47
16.30	12.06	10.96	50.59	0.55	11.10	10.47	46.10	0.48
17.00	12.13	10.67	41.49	0.44	11.07	10.49	43.48	0.46
17.30	12.12	10.32	39.12	0.40	11.03	10.30	43.49	0.45
18.00	12.08	11.14	0.00	0.00	10.98	10.22	44.92	0.46
18.30	12.09	6.03	0.00	0.00	10.96	10.21	44.98	0.46
19.00	12.10	0.00	0.00	0.00	10.85	11.34	45.41	0.52
19.30	12.11	0.00	0.00	0.00	10.84	11.36	46.33	0.53
20.00	12.08	0.00	0.00	0.00	10.83	11.34	46.43	0.53
20.30	12.11	0.00	0.00	0.00	10.84	11.39	45.12	0.51
21.00	12.08	0.00	0.00	0.00	10.83	11.32	44.78	0.51
21.30	12.07	0.00	0.00	0.00	10.80	11.33	45.12	0.51
22.00	12.10	0.00	0.00	0.00	10.82	11.34	46.18	0.52
22.30	12.09	0.00	0.00	0.00	10.84	11.36	44.18	0.50
23.00	12.08	0.00	0.00	0.00	10.82	11.37	43.86	0.50
23.30	12.07	0.00	0.00	0.00	10.84	11.31	44.29	0.50
24.00	12.09	0.00	0.00	0.00	10.83	11.30	46.34	0.52

ตารางที่ ผ.5.2.7 ผลการทดสอบระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ วันที่ 7

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่	ชุดโหลดภาวะ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
0.30	12.10	0.00	0.00	0.00	10.85	11.34	45.41	0.52
1.00	12.11	0.00	0.00	0.00	10.84	11.36	46.33	0.53
1.30	12.08	0.00	0.00	0.00	10.83	11.34	46.43	0.53
2.00	12.11	0.00	0.00	0.00	10.84	11.39	45.12	0.51
2.30	12.08	0.00	0.00	0.00	10.83	11.32	44.78	0.51
3.00	12.07	0.00	0.00	0.00	10.80	11.33	45.12	0.51
3.30	12.10	0.00	0.00	0.00	10.82	11.34	46.18	0.52
4.00	12.09	0.00	0.00	0.00	10.84	11.36	44.18	0.50
4.30	12.08	0.00	0.00	0.00	10.82	11.37	43.86	0.50
5.00	12.07	0.00	0.00	0.00	10.84	11.31	44.29	0.50
5.30	12.09	0.00	0.00	0.00	10.83	11.30	46.34	0.52
6.00	12.08	4.62	0.00	0.00	10.84	11.38	45.44	0.52
6.30	12.06	8.29	0.00	0.00	10.83	11.36	46.12	0.52
7.00	12.08	10.12	0.00	0.00	10.83	11.34	46.13	0.52
7.30	12.10	10.32	14.12	0.15	10.85	11.37	45.14	0.51
8.00	12.10	11.62	36.99	0.43	10.85	11.30	44.32	0.50
8.30	12.09	12.86	80.24	1.03	11.02	10.28	43.92	0.45
9.00	12.08	12.92	112.43	1.45	11.06	10.31	44.14	0.46
9.30	12.12	13.12	132.14	1.73	11.12	10.40	46.28	0.48
10.00	12.08	13.43	149.81	2.01	11.16	10.44	45.44	0.47
10.30	12.07	13.44	134.14	1.80	11.18	10.50	43.12	0.45
11.00	12.05	13.51	162.91	2.20	11.24	10.52	44.36	0.47
11.30	12.06	13.68	210.18	2.88	11.27	10.54	44.59	0.47
12.00	12.06	13.70	223.14	3.06	11.31	10.57	45.69	0.48

ตารางที่ ผ.5.2.7 (ต่อ)

เวลา	แรงดันของ ชุดAC-DC (V)	ชุดเซลล์แสงอาทิตย์			ชุดแบตเตอรี่ แรงดัน(Vb) (V)	ชุดโหลดภาระ		
		แรงดัน(Vs) (V)	กระแส(Is) (mA)	กำลัง(Ps) (W)		แรงดัน(Vload) (V)	กระแส(Iload) (mA)	กำลัง(Pload) (W)
12.30	12.08	13.86	234.40	3.25	11.33	10.60	47.11	0.50
13.00	12.10	13.71	212.80	2.92	11.36	10.64	46.82	0.50
13.30	12.11	13.22	200.04	2.65	11.40	10.67	46.32	0.49
14.00	12.10	13.10	167.18	2.19	11.38	10.71	46.18	0.50
14.30	12.09	12.46	131.59	1.64	11.41	10.68	46.00	0.49
15.00	12.09	12.12	112.92	1.37	11.35	10.65	45.41	0.48
15.30	12.10	11.92	110.80	1.32	11.36	10.65	45.28	0.48
16.00	12.08	11.55	96.88	1.12	11.35	10.64	44.14	0.47
16.30	12.07	11.18	86.14	0.96	11.32	10.66	44.01	0.47
17.00	12.08	10.96	41.49	0.46	11.31	10.64	44.98	0.48
17.30	12.09	10.10	0.00	0.00	11.28	10.63	44.92	0.48
18.00	12.10	9.21	0.00	0.00	11.26	10.60	45.14	0.48
18.30	12.11	6.16	0.00	0.00	11.27	10.58	44.99	0.48
19.00	12.08	0.00	0.00	0.00	11.24	10.55	45.84	0.48
19.30	12.09	0.00	0.00	0.00	11.25	10.53	46.88	0.49
20.00	12.10	0.00	0.00	0.00	11.16	10.50	47.10	0.50
20.30	12.11	0.00	0.00	0.00	11.15	10.51	45.09	0.47
21.00	12.10	0.00	0.00	0.00	11.17	10.50	44.12	0.46
21.30	12.07	0.00	0.00	0.00	11.19	10.47	44.38	0.47
22.00	12.06	0.00	0.00	0.00	11.10	10.47	46.10	0.48
22.30	12.13	0.00	0.00	0.00	11.07	10.49	43.48	0.46
23.00	12.12	0.00	0.00	0.00	11.03	10.30	43.49	0.45
23.30	12.08	0.00	0.00	0.00	10.98	10.22	44.92	0.46
24.00	12.09	0.00	0.00	0.00	10.96	10.21	44.98	0.46

**ภาคผนวก ฉ. ( ส่วนที่ 1 )**

**ฐานข้อมูลการทดสอบชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด**

## ฐานข้อมูลการทดสอบชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เนื้อหาภายในภาคผนวกนี้ได้ทำการรวบรวม และแสดงฐานข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในทุกหัวข้อที่ทำการทดลอง อันได้แก่

- ภาคผนวกที่ ผ.6.1 เป็นข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์ 2 แบบคือ
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.1.1 : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ ที่โหลดภาระ 5 วัตต์
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.1.2 : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ ที่โหลดภาระ 3 วัตต์
- ภาคผนวกที่ ผ.6.2 เป็นข้อมูลทดสอบผลของมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ในแต่ละวัน ตามช่วงฤดูกาลต่างๆ ประกอบด้วย
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.2.1 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวระดับที่ไม่มีการปรับมุมเอียง โดยติดตั้งตายตัวอยู่กับที่
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.2.2 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทำมุมตามตำแหน่งเส้นรุ้ง ของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และติดตั้งแบบอยู่กับที่
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.2.3 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการคำนวณค่าเหมาะสมการมุมเอียงที่เหมาะสม ในแต่ละวัน
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.2.4 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอซิมูท (เป็นการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน คือในแนวทิศเหนือ – ใต้ และ ตะวันออก – ตะวันตก พร้อมกัน)
- ภาคผนวกที่ ผ.6.3 เป็นข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การจำลองรังสีแสงอาทิตย์ ภายในห้องทดสอบที่สามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ และปัจจัยต่างๆ ได้ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์
  - ภาคผนวกที่ ผ.6.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์
- ภาคผนวกที่ ผ.6.4 เป็นฐานข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้กับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ในแต่ละวัน ตามช่วงฤดูกาลต่างๆ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น S13 ขนาด 13.59 วัตต์

- ภาคผนวกที่ ผ.6.1.1 เป็นข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ ที่โหลดภาระ 5 วัตต์

ตารางที่ ผ.6.1.1 ผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 55 วัตต์

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
10.88	0.14	0.12	10.88	2.06	40.26	10.88	2.68	109.74
10.88	0.28	0.37	10.88	3.34	43.84	10.88	2.34	112.14
10.88	1.12	1.46	10.88	2.90	46.86	10.88	2.14	114.33
10.88	1.18	2.58	10.88	2.55	49.50	10.88	1.82	116.19
10.88	1.17	3.73	10.88	3.09	52.72	10.88	1.98	118.19
10.88	1.01	4.70	10.88	2.89	55.74	10.88	3.04	121.40
10.88	0.90	5.57	10.88	1.60	57.33	10.88	3.33	124.97
10.88	1.33	6.87	10.88	2.21	59.58	10.88	2.28	127.31
10.88	2.03	8.92	10.88	2.97	62.68	10.88	2.29	129.66
10.88	1.97	10.90	10.88	2.03	64.74	10.88	2.27	131.94
10.88	1.13	12.01	10.88	1.90	66.70	10.88	1.38	133.35
10.88	0.88	12.85	10.88	1.88	68.57	10.88	2.40	135.84
10.88	1.04	13.85	10.88	1.29	69.83	10.88	2.06	137.98
10.88	0.77	14.58	10.88	0.97	70.78	10.88	3.82	142.04
10.88	0.81	15.35	10.88	2.83	73.74	10.88	2.22	144.34
10.88	1.18	16.50	10.88	2.93	76.78	10.88	1.87	146.24
10.88	1.64	18.16	10.88	3.86	80.87	10.88	2.84	149.24
10.88	3.48	21.84	10.88	4.03	85.24	10.88	2.75	155.69
10.88	1.34	23.15	10.88	3.99	89.56	10.88	2.95	158.77
10.88	2.96	26.23	10.88	3.76	93.50	10.88	2.11	160.95
10.88	3.06	29.43	10.88	2.41	95.99	10.88	2.93	164.01
10.88	3.41	33.02	10.88	2.76	98.86	10.88	3.45	167.67
10.88	1.79	34.82	10.88	2.59	101.55	10.88	3.36	171.30
10.88	1.84	36.65	10.88	3.05	104.75	10.88	1.44	172.76
10.88	1.53	38.17	10.88	2.10	106.90	12.86	3.87	176.90

ตารางที่ ผ.6.1.1 (ต่อ 1)

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
12.74	3.30	180.40	11.67	0.27	218.74	11.44	-0.39	211.56
12.45	1.70	182.16	11.74	0.03	218.77	11.43	-0.39	211.19
12.10	1.47	183.63	11.52	0.24	218.99	11.43	-0.39	210.83
11.57	0.53	184.13	11.76	0.16	219.14	11.42	-0.39	210.46
12.51	2.55	186.79	11.92	0.01	219.15	11.42	-0.39	210.09
12.01	1.34	188.13	11.48	-0.16	219.00	11.43	-0.39	209.73
12.41	1.71	189.89	11.49	-0.40	218.63	10.97	-0.39	209.38
12.48	1.63	191.58	11.50	-0.40	218.24	11.26	-0.39	209.02
12.39	1.26	192.88	11.49	-0.40	217.87	11.09	-0.39	208.66
12.67	3.57	196.65	11.48	-0.40	217.49	11.22	-0.39	208.30
12.51	1.94	198.68	11.48	-0.40	217.12	11.40	-0.39	207.93
12.59	2.93	201.74	11.48	-0.40	216.74	11.40	-0.39	207.57
12.95	2.70	204.65	11.48	-0.40	216.37	11.39	-0.39	207.20
12.89	2.73	207.58	11.48	-0.40	215.99	10.95	-0.39	206.85
12.17	0.84	208.43	11.48	-0.39	215.62	11.00	-0.39	206.50
12.80	2.88	211.48	11.48	-0.39	215.24	10.99	-0.39	206.15
12.51	2.02	213.59	11.47	-0.39	214.87	11.35	-0.39	205.78
12.02	1.35	214.93	11.46	-0.39	214.50	11.34	-0.39	205.42
11.87	0.71	215.63	11.46	-0.39	214.13	11.35	-0.39	205.05
11.83	0.61	216.23	11.45	-0.39	213.77	11.36	-0.39	204.68
11.81	0.45	216.67	11.46	-0.39	213.40	11.34	-0.39	204.32
11.89	0.59	217.25	11.45	-0.39	213.03	11.33	-0.39	203.95
11.71	0.50	217.73	11.46	-0.39	212.66	11.33	-0.39	203.58
11.68	0.44	218.16	11.43	-0.39	212.29	11.11	-0.39	203.23
11.68	0.33	218.48	11.45	-0.39	211.93	11.09	-0.39	202.87

ตารางที่ ผ.6.1.1 (ต่อ 2)

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.08	-0.39	202.51	10.99	-0.41	193.23	11.03	-0.41	183.92
11.33	-0.41	202.13	10.99	-0.41	192.87	11.04	-0.41	183.55
11.37	-0.40	201.75	11.07	-0.41	192.49	11.04	-0.41	183.18
11.34	-0.40	201.38	11.08	-0.41	192.12	11.04	-0.41	182.82
11.26	-0.39	201.02	11.07	-0.41	191.74	11.03	-0.41	182.45
11.33	-0.40	200.65	11.04	-0.41	191.37	11.05	-0.41	182.08
11.27	-0.39	200.28	11.05	-0.41	190.99	11.05	-0.41	181.70
11.39	-0.40	199.91	11.07	-0.41	190.62	11.03	-0.41	181.33
10.95	-0.40	199.55	11.04	-0.41	190.24	11.01	-0.41	180.96
11.09	-0.40	199.18	11.04	-0.41	189.87	11.29	-0.41	180.58
11.10	-0.40	198.82	10.99	-0.41	189.49	11.33	-0.41	180.19
11.20	-0.40	198.45	11.06	-0.41	189.12	11.32	-0.41	179.81
11.11	-0.41	198.08	11.04	-0.41	188.74	11.31	-0.41	179.43
10.82	-0.42	197.70	10.97	-0.41	188.37	11.31	-0.41	179.04
10.79	-0.42	197.33	11.03	-0.41	187.99	11.32	-0.41	178.66
10.78	-0.42	196.95	11.05	-0.41	187.62	11.30	-0.41	178.28
10.82	-0.41	196.58	11.04	-0.41	187.24	11.09	-0.41	177.90
11.00	-0.41	196.21	11.04	-0.41	186.88	11.25	-0.41	177.52
11.02	-0.41	195.84	11.04	-0.41	186.51	11.29	-0.41	177.13
11.01	-0.41	195.47	11.05	-0.41	186.13	11.31	-0.41	176.75
10.96	-0.41	195.09	11.02	-0.41	185.77	11.22	-0.41	176.37
10.99	-0.41	194.72	11.04	-0.41	185.40	11.29	-0.41	175.99
11.02	-0.41	194.34	11.05	-0.41	185.03	11.22	-0.41	175.60
11.02	-0.41	193.97	11.04	-0.41	184.67	11.25	-0.41	175.22
10.99	-0.41	193.60	11.05	-0.41	184.29	11.29	-0.41	174.84

ตารางที่ ผ.6.1.1 (ต่อ 3 )

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.21	-0.41	174.45	11.18	-0.41	164.66	10.77	-0.39	155.30
11.28	-0.41	174.07	11.16	-0.40	164.29	10.64	-0.42	154.94
11.11	-0.41	173.69	11.14	-0.40	163.92	10.69	-0.42	154.57
11.24	-0.41	173.31	11.17	-0.40	163.54	10.73	-0.41	154.20
11.08	-0.41	172.94	11.16	-0.41	163.17	10.70	-0.42	153.84
11.06	-0.41	172.56	11.18	-0.41	162.79	10.72	-0.41	153.47
11.16	-0.41	172.19	10.87	-0.41	162.43	10.78	-0.41	153.10
11.22	-0.41	171.80	10.88	-0.40	162.06	10.75	-0.41	152.74
10.97	-0.43	171.41	10.90	-0.41	161.69	10.78	-0.41	152.37
11.21	-0.41	171.04	10.87	-0.41	161.33	10.78	-0.41	152.00
11.23	-0.41	170.66	10.81	-0.41	160.97	10.70	-0.42	151.64
11.22	-0.41	170.29	10.80	-0.40	160.61	10.80	-0.41	151.27
11.23	-0.41	169.91	10.81	-0.41	160.25	10.79	-0.41	150.90
11.24	-0.41	169.54	10.81	-0.41	159.89	10.79	-0.41	150.54
11.22	-0.41	169.16	10.80	-0.41	159.54	10.80	-0.41	150.18
11.23	-0.41	168.79	10.79	-0.40	159.18	10.79	-0.41	149.82
11.23	-0.41	168.41	10.81	-0.40	158.82	10.79	-0.40	149.46
11.20	-0.41	168.04	10.78	-0.40	158.46	10.78	-0.40	149.10
11.23	-0.41	167.66	10.78	-0.40	158.11	10.80	-0.41	148.74
11.22	-0.41	167.29	10.78	-0.40	157.75	10.78	-0.40	148.39
11.22	-0.41	166.91	10.79	-0.40	157.40	10.81	-0.41	148.03
11.22	-0.41	166.54	10.77	-0.40	157.05	10.78	-0.41	147.67
11.21	-0.41	166.16	10.78	-0.40	156.70	10.78	-0.40	147.31
11.21	-0.41	165.79	10.79	-0.40	156.35	10.75	-0.40	146.95
11.21	-0.41	165.41	10.76	-0.39	156.00	10.71	-0.40	146.60
11.17	-0.41	165.04	10.78	-0.40	155.65	10.71	-0.40	146.25
						10.71	-0.40	145.90

ตารางที่ ผ.6.1.2 ผลการวัดค่าอุณหภูมิจากการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสี  
แสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน  
ขนาด 55 วัตต์

ลำดับที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลำดับที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	8.00	33.6	21	13.00	48.6
2	8.15	33.5	22	13.15	48.2
3	8.30	34.3	23	13.30	49.1
4	8.45	38.0	24	13.45	48.6
5	9.00	39.5	25	14.00	49.3
6	9.15	37.8	26	14.15	49.0
7	9.30	38.1	27	14.30	49.2
8	9.45	42.7	28	14.45	48.8
9	10.00	42.5	29	15.00	47.8
10	10.15	46.8	30	15.15	45.8
11	10.30	52.3	31	15.30	43.3
12	10.45	54.8	32	15.45	44.7
13	11.00	46.8	33	16.00	46.0
14	11.15	46.5	34	16.15	42.3
15	11.30	47.1	35	16.30	45.8
16	11.45	49.9	36	16.45	46.1
17	12.00	48.8	37	17.00	35.5
18	12.15	49.4	38	17.15	35.2
19	12.30	46.2	39	17.30	35.3
20	12.45	46.4	40	17.45	33.2
			41	18.00	31.9

โดยฐานข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์ ที่โหลดภาระ 5 วัตต์ สามารถแสดงได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้า (V) = [1.3 2.3 7.2 8.9 11.2 13.3 16.4 17.2 18.6;  
 1.1 2.2 7.1 9.0 11.4 13.6 16.4 17.3 18.6;  
 1.0 2.0 5.4 8.1 10.3 12.7 15.9 16.8 18.4;  
 1.4 2.5 7.9 9.7 11.8 13.6 16.3 17.1 18.5;  
 1.6 3.0 8.2 11.4 12.9 14.3 16.3 17.0 18.5;  
 1.6 3.0 8.0 10.8 12.5 13.9 16.1 16.8 18.3;  
 1.8 3.3 8.8 11.6 13.1 14.2 16.4 17.1 18.4;  
 2.7 5.3 11.3 13.0 14.0 14.9 16.6 17.3 18.7;  
 1.9 3.5 10.2 11.6 12.9 14.0 16.1 16.7 18.2;  
 2.5 4.4 10.0 12.2 13.3 14.2 16.2 16.8 18.0;  
 3.6 6.3 10.8 12.3 13.2 14.1 15.9 16.5 17.8;  
 3.7 6.6 11.1 12.6 13.5 14.4 16.0 16.6 17.8;  
 1.9 4.9 12.1 13.0 14.0 14.9 16.7 17.3 18.8;  
 3.8 6.7 12.1 13.1 14.0 14.9 16.5 17.1 18.4;  
 3.9 6.8 8.6 10.4 12.4 13.3 16.6 17.4 18.7;  
 3.8 6.1 10.4 13.2 14.2 15.1 16.9 17.5 18.7;  
 2.4 4.6 11.3 12.3 13.3 14.2 16.1 16.8 18.4;  
 2.8 5.2 11.3 12.2 13.2 14.1 16.0 16.8 18.3;  
 1.6 3.1 9.6 11.1 12.4 13.6 15.7 16.5 17.8;  
 1.8 3.6 10.1 11.5 12.7 13.8 15.7 16.2 17.9;  
 3.2 5.9 11.4 12.6 13.9 14.8 16.7 17.3 18.6;  
 3.2 6.0 11.9 12.8 13.8 14.7 16.5 17.2 18.4;  
 2.1 4.7 11.2 12.1 13.6 14.5 16.4 17.0 18.2;  
 2.9 5.4 11.4 12.3 13.1 14.0 16.2 16.9 18.2;  
 2.9 5.3 11.5 12.1 13.2 14.1 16.2 16.9 18.2;  
 2.7 5.1 11.4 12.4 13.3 14.3 16.2 16.7 18.1;

2.7 5.1 11.3 12.2 13.2 14.3 16.1 16.8 18.0;  
 2.5 4.7 11.1 12.0 13.1 14.0 15.9 16.6 17.9;  
 2.1 3.7 10.3 11.5 12.9 14.2 16.1 16.8 18.3;  
 1.6 3.1 9.4 10.8 12.3 13.5 15.6 16.3 17.8;  
 1.4 2.7 8.5 10.4 12.2 13.5 15.8 16.6 18.1;  
 1.9 3.5 10.3 11.6 12.7 13.8 16.0 16.7 18.2;  
 1.6 3.1 9.6 11.3 12.7 13.9 15.9 16.8 18.2;  
 1.1 2.2 7.0 8.6 10.7 12.7 15.5 16.4 17.8;  
 1.6 3.0 9.6 11.1 12.3 13.4 15.4 16.1 17.1;  
 2.0 3.7 10.8 12.0 13.1 14.3 16.3 17.0 18.3;  
 0.7 2.3 4.3 5.4 7.0 9.4 15.0 16.1 18.0;  
 0.6 1.0 3.4 4.3 5.7 7.8 14.4 15.9 17.8;  
 0.4 0.8 2.6 3.3 4.4 6.0 13.2 15.4 17.6;  
 0.2 0.5 1.5 1.9 2.4 3.3 8.3 13.5 17.0;  
 0.2 0.3 1.1 1.4 1.9 2.6 6.5 11.4 16.8];

กระแสไฟฟ้า(A) = [1.73 1.72 1.69 1.67 1.59 1.39 0.63 0.33 0;  
 1.70 1.70 1.70 1.70 1.64 1.43 0.66 0.36 0;  
 1.55 1.55 1.54 1.53 1.49 1.35 0.65 0.35 0;  
 2.07 1.98 1.89 1.83 1.70 1.44 0.66 0.36 0;  
 2.35 2.34 2.32 2.15 1.85 1.50 0.66 0.35 0;  
 2.32 2.28 2.22 2.06 1.82 1.48 0.66 0.36 0;  
 2.58 2.56 2.51 2.20 1.89 1.51 0.68 0.37 0;  
 4.17 4.13 3.17 2.46 2.03 1.56 0.68 0.37 0;  
 2.81 2.68 2.41 2.18 1.85 1.49 0.66 0.36 0;  
 3.56 3.35 2.87 2.32 1.91 1.51 0.67 0.36 0;  
 5.35 4.81 3.05 2.31 1.90 1.48 0.65 0.35 0;  
 5.56 5.06 3.18 2.40 1.96 1.53 0.06 0.36 0;  
 4.15 4.15 2.89 2.49 2.04 1.60 0.69 0.37 0;

5.83 5.23 2.90 2.49 2.04 1.59 0.68 0.37 0;  
5.30 5.27 2.79 1.98 1.76 1.42 0.68 0.38 0;  
5.77 5.10 2.84 2.49 2.06 1.61 0.70 0.38 0;  
3.58 3.56 2.73 2.35 1.92 1.52 0.67 0.36 0;  
4.30 4.02 2.74 2.32 1.91 1.51 0.66 0.36 0;  
2.40 2.40 2.28 2.11 1.79 1.44 0.65 0.35 0;  
2.60 2.62 2.42 2.18 1.84 1.47 0.65 0.34 0;  
4.76 4.65 2.75 2.37 2.02 1.58 0.69 0.35 0;  
4.81 4.60 2.83 2.45 2.01 1.57 0.68 0.35 0;  
2.89 2.70 2.68 2.26 1.95 1.56 0.67 0.37 0;  
4.25 4.23 2.72 2.36 1.90 1.48 0.65 0.36 0;  
4.28 4.18 2.75 2.32 1.92 1.51 0.68 0.35 0;  
4.08 4.01 2.73 2.36 1.94 1.53 0.67 0.35 0;  
4.03 3.97 2.71 2.34 1.92 1.52 0.67 0.36 0;  
3.77 3.63 2.64 2.30 1.89 1.49 0.66 0.34 0;  
3.02 2.80 2.48 2.20 1.85 1.51 0.67 0.36 0;  
2.35 2.32 2.21 2.06 1.76 1.44 0.65 0.36 0;  
2.15 2.09 2.03 1.98 1.77 1.44 0.65 0.36 0;  
2.76 2.69 2.46 2.22 1.85 1.48 0.66 0.36 0;  
2.40 2.38 2.31 2.13 1.87 1.47 0.66 0.36 0;  
1.72 1.69 1.67 1.64 1.56 1.36 0.64 0.35 0;  
2.31 2.31 2.30 2.08 1.78 1.42 0.64 0.35 0;  
2.83 2.81 2.54 2.26 1.88 1.51 0.68 0.36 0;  
1.04 1.04 1.03 1.03 1.02 1.01 0.62 0.35 0;  
0.83 0.83 0.82 0.81 0.81 0.81 0.59 0.34 0;  
0.64 0.64 0.64 0.64 0.63 0.63 0.55 0.33 0;  
0.36 0.36 0.36 0.35 0.35 0.35 0.34 0.27 0;  
0.27 0.27 0.27 0.27 0.27 0.27 0.27 0.24 0];

- ภาคผนวกที่ ผ.6.1.2 เป็นข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 64 วัตต์ ที่โหลดภาระ 3 วัตต์

ตารางที่ ผ.6.1.3 ผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ขนาด 64 วัตต์

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.94	0.82	0.82
11.60	0.66	1.45
11.98	0.75	2.20
11.55	0.50	2.68
11.47	0.19	2.86
11.48	0.08	2.93
11.48	0.17	3.10
11.46	0.23	3.32
11.50	0.33	3.63
11.60	0.43	4.04
11.57	0.45	4.47
11.54	0.44	4.89
11.69	0.43	5.30
11.60	0.47	5.75
12.31	1.34	7.12
12.45	1.59	8.77
12.68	1.89	10.76
12.81	1.64	12.51
12.76	1.71	14.32
12.92	2.11	16.58
13.01	2.40	19.17
12.52	1.48	20.71
13.15	2.76	23.73
12.44	1.19	24.97

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
12.50	1.11	26.12
12.00	0.94	27.05
12.32	1.30	28.38
12.37	1.33	29.75
12.49	1.27	31.07
12.51	1.41	32.53
12.51	1.46	34.05
12.38	1.32	35.41
12.00	1.04	36.45
12.02	1.04	37.49
12.50	1.14	38.67
12.39	1.18	39.89
13.09	2.66	42.78
13.28	2.73	45.79
13.24	2.72	48.79
13.09	2.84	51.88
13.16	3.08	55.26
13.05	3.15	58.68
13.19	3.04	62.02
13.23	3.00	65.33
12.73	1.69	67.12
12.53	1.49	68.67
12.50	1.58	70.31
12.52	1.53	71.91

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
12.60	1.66	73.65
12.64	1.43	75.15
12.32	1.00	76.17
12.10	0.73	76.90
12.10	0.73	77.63
12.54	1.75	79.46
12.59	1.82	81.36
12.67	1.85	83.31
12.78	1.95	85.39
12.89	2.01	87.55
12.94	2.09	89.79
12.73	2.15	92.06
12.70	2.27	94.46
13.00	2.39	97.05
12.95	2.35	99.57
12.69	2.31	102.00
12.97	2.19	104.36
12.48	0.83	105.22
12.02	0.77	105.99
12.24	0.72	106.71
11.99	0.64	107.35
12.24	0.58	107.94
12.11	0.55	108.49
11.75	0.51	108.99

ตารางที่ ผ.6.1.3 (ต่อ1)

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.97	0.48	109.46
11.86	0.45	109.90
11.92	0.42	110.32
11.74	0.40	110.70
11.67	0.37	111.06
11.79	0.34	111.40
11.75	0.32	111.70
11.88	0.30	112.00
11.99	0.28	112.27
11.63	0.23	112.50
11.57	0.19	112.67
11.93	0.14	112.81
11.69	0.11	112.92
11.67	0.09	113.00
11.55	0.06	113.06
11.68	0.05	113.10
11.52	0.25	113.35
11.56	0.20	113.54
11.53	0.12	113.65
11.54	0.06	113.70
11.53	-0.12	113.60
11.46	-0.22	113.40
11.45	-0.22	113.20
11.44	-0.22	113.00

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.47	-0.21	112.80
11.50	-0.21	112.60
11.52	-0.21	112.40
11.52	-0.21	112.21
11.51	-0.20	112.02
11.51	-0.21	111.83
11.48	-0.20	111.64
11.48	-0.20	111.45
11.47	-0.20	111.26
11.46	-0.19	111.09
11.44	-0.19	110.91
11.38	-0.18	110.75
11.39	-0.18	110.57
11.46	-0.17	110.41
11.44	-0.17	110.26
11.32	-0.16	110.12
11.29	-0.16	109.98
11.38	-0.14	109.85
11.50	-0.14	109.71
11.47	-0.13	109.59
11.47	-0.13	109.46
11.42	-0.12	109.35
11.42	-0.28	109.10
10.98	-0.22	108.90

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.34	-0.21	108.70
11.34	-0.21	108.50
11.33	-0.21	108.30
11.31	-0.22	108.10
11.30	-0.22	107.90
11.31	-0.22	107.70
11.30	-0.22	107.50
11.30	-0.22	107.30
11.30	-0.22	107.10
11.30	-0.22	106.90
11.31	-0.21	106.70
11.33	-0.21	106.50
11.33	-0.21	106.30
11.36	-0.21	106.10
11.46	-0.21	105.90
11.37	-0.21	105.71
11.36	-0.21	105.52
11.35	-0.21	105.32
11.35	-0.21	105.13
11.29	-0.21	104.93
11.31	-0.21	104.73
11.30	-0.21	104.53
11.46	-0.21	104.34
11.45	-0.21	104.15

ตารางที่ ผ.6.1.3 (ต่อ2)

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.37	-0.21	103.95	11.31	-0.21	99.33	11.37	-0.20	94.75
11.45	-0.21	103.76	11.27	-0.21	99.14	11.38	-0.20	94.56
11.43	-0.21	103.57	11.34	-0.21	98.95	11.37	-0.20	94.38
11.43	-0.21	103.38	11.30	-0.21	98.75	11.19	-0.19	94.20
11.35	-0.21	103.19	11.40	-0.21	98.56	11.09	-0.18	94.04
11.36	-0.21	103.00	11.38	-0.21	98.37	11.25	-0.17	93.88
11.28	-0.21	102.80	11.27	-0.21	98.18	11.24	-0.17	93.72
11.29	-0.21	102.61	11.37	-0.21	97.99	11.44	-0.14	93.60
11.26	-0.21	102.42	11.44	-0.21	97.80	11.43	-0.15	93.64
11.30	-0.21	102.23	11.42	-0.21	97.60	11.20	-0.23	93.42
11.22	-0.21	102.03	11.32	-0.21	97.41	11.17	-0.23	93.21
11.25	-0.21	101.84	11.44	-0.21	97.22	11.10	-0.22	93.01
11.27	-0.21	101.65	11.41	-0.21	97.03	11.08	-0.22	92.81
11.33	-0.21	101.45	11.35	-0.21	96.84	11.06	-0.22	92.61
11.25	-0.21	101.26	11.43	-0.20	96.65	11.08	-0.22	92.42
11.19	-0.22	101.06	11.43	-0.21	96.45	11.05	-0.22	92.22
11.29	-0.21	100.87	11.43	-0.21	96.26	11.06	-0.22	92.03
11.25	-0.21	100.68	11.43	-0.21	96.07	11.04	-0.22	91.83
11.21	-0.21	100.48	11.43	-0.20	95.88	11.04	-0.22	91.64
11.40	-0.21	100.29	11.42	-0.20	95.69	11.04	-0.22	91.45
11.33	-0.21	100.10	11.42	-0.20	95.50	11.04	-0.22	91.25
11.35	-0.21	99.90	11.42	-0.20	95.30	11.08	-0.21	91.06
11.25	-0.21	99.71	11.41	-0.20	95.11	11.07	-0.21	90.87
11.34	-0.21	99.52	11.38	-0.20	94.93	11.08	-0.21	90.68

ตารางที่ ผ.6.1.3 (ต่อ3)

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.04	-0.22	90.49
11.07	-0.21	90.30
11.32	-0.21	90.10
11.09	-0.21	89.91
11.25	-0.21	89.72
11.02	-0.22	89.53
11.07	-0.21	89.34
11.31	-0.21	89.15
11.18	-0.21	88.95
11.12	-0.21	88.76
11.24	-0.21	88.57
11.29	-0.21	88.38
11.09	-0.21	88.19
11.11	-0.21	88.00
11.16	-0.21	87.80
11.17	-0.21	87.61
11.30	-0.21	87.42
11.29	-0.21	87.23
11.30	-0.21	87.04
11.29	-0.21	86.85
11.16	-0.21	86.65
11.27	-0.21	86.46
11.13	-0.21	86.27
11.15	-0.21	86.08

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.18	-0.21	85.89
11.23	-0.21	85.70
11.29	-0.21	85.50
11.29	-0.21	85.31
11.15	-0.21	85.12
11.21	-0.21	84.93
11.28	-0.21	84.74
11.19	-0.21	84.55
11.22	-0.21	84.35
11.28	-0.21	84.16
11.27	-0.21	83.97
10.93	-0.21	83.79
10.96	-0.21	83.60
10.96	-0.21	83.42
10.92	-0.21	83.24
10.96	-0.21	83.06
10.97	-0.21	82.87
10.94	-0.21	82.69
10.91	-0.21	82.51
10.96	-0.21	82.32
10.96	-0.21	82.14
10.90	-0.21	81.96
10.93	-0.21	81.77
10.64	-0.21	81.59

แรงดัน (V)	กระแส (A)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
11.25	-0.21	81.40
11.26	-0.21	81.21
11.26	-0.21	81.01
11.23	-0.21	80.82
11.25	-0.21	80.63
11.25	-0.21	80.44
11.21	-0.21	80.25
11.24	-0.21	80.06
11.23	-0.21	79.86
11.24	-0.21	79.67
11.21	-0.20	79.49
11.21	-0.21	79.30
11.20	-0.21	79.11
11.20	-0.21	78.91
11.22	-0.21	78.72
11.22	-0.21	78.53
11.21	-0.21	78.34
11.21	-0.21	78.15
11.21	-0.21	77.96
11.21	-0.21	77.76
11.20	-0.21	77.57
11.12	-0.21	77.38
10.76	-0.21	77.20

ตารางที่ ผ.6.1.4 ผลการวัดค่าอุณหภูมิจากการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสี  
แสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน  
ขนาด 64 วัตต์

ลำดับที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ลำดับที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	9.00	34.3	21	14.00	40.9
2	9.15	33.1	22	14.15	40.8
3	9.30	31.9	23	14.30	37.9
4	9.45	27.5	24	14.45	35.6
5	10.00	25.8	25	15.00	35.6
6	10.15	26.8	26	15.15	35.7
7	10.30	27.3	27	15.30	35.8
8	10.45	29.5	28	15.45	36.8
9	11.00	29.4	29	16.00	37.9
10	11.15	30.0	30	16.15	35.9
11	11.30	31.9	31	16.30	33.8
12	11.45	33.9	32	16.45	32.9
13	12.00	35.2	33	17.00	32.3
14	12.15	36.6	34	17.15	30.5
15	12.30	36.2	35	17.30	30.0
16	12.45	37.8	36	17.45	29.0
17	13.00	40.8	37	18.00	27.4
18	13.15	40.6			
19	13.30	40.7			
20	13.45	39.7			

โดยฐานข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ จากดวงอาทิตย์ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์ที่ โหลดภาระ 3 วัตต์ สามารถแสดงได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้า (V) = [0.8 1.4 4.0 5.0 6.4 8.6 16.6 18.4 20.1;  
 0.7 1.4 4.2 5.3 6.8 9.0 16.7 18.3 20.2;  
 0.6 1.0 3.4 4.1 5.3 7.2 15.6 18.1 20.5;  
 0.2 0.4 1.3 1.7 2.2 3.0 7.6 14.0 20.7;  
 0.4 0.8 2.6 3.3 4.2 5.7 13.4 17.6 20.8;  
 0.5 0.9 2.9 3.6 4.7 6.3 14.6 18.0 21.4;  
 0.6 1.0 3.3 4.1 5.4 7.2 15.7 18.4 20.5;  
 0.8 1.4 4.7 5.5 7.1 9.5 17.4 19.0 20.8;  
 0.8 1.6 4.9 6.0 7.8 10.3 17.7 19.2 20.9;  
 1.0 1.7 5.4 6.8 8.8 11.6 18.2 19.4 21.0;  
 1.1 2.2 6.7 8.4 10.8 13.7 18.6 19.6 21.1;  
 1.0 2.0 6.4 8.0 10.2 13.2 18.2 19.3 20.8;  
 0.9 1.8 5.7 7.1 9.3 11.9 17.8 18.9 20.4;  
 1.1 2.3 6.9 8.6 10.9 13.9 18.3 19.2 21.3;  
 1.1 2.1 6.8 8.5 10.9 13.9 18.3 19.2 21.1;  
 1.2 2.3 7.1 8.8 11.3 14.2 18.3 19.2 21.1;  
 1.3 2.5 7.8 9.7 12.2 14.8 18.2 19.0 20.3;  
 1.4 2.5 7.8 9.8 12.4 15.0 18.3 19.1 21.0;  
 1.4 2.8 8.5 10.5 13.1 15.5 18.5 19.3 21.9;  
 1.3 2.4 7.4 9.3 11.9 14.6 18.3 19.2 20.6;  
 1.4 2.7 8.6 10.6 13.0 15.2 18.3 19.1 22.6;  
 1.3 2.5 7.6 9.5 12.0 14.8 18.1 19.0 20.2;  
 0.8 1.6 5.0 6.2 8.1 10.8 17.1 18.3 19.8;  
 0.7 1.4 4.5 5.5 7.0 9.3 16.8 18.3 20.0;  
 0.7 1.4 4.5 5.6 7.4 9.7 17.0 18.5 20.1;  
 0.8 1.5 4.6 5.9 7.5 10.0 17.1 18.5 20.2;

0.8 1.5 4.8 6.0 7.8 10.3 17.2 18.6 22.2;  
 1.0 1.7 5.5 6.8 8.7 10.8 17.6 18.8 22.2;  
 0.9 1.8 5.8 7.2 9.3 12.2 17.7 18.8 21.4;  
 0.7 1.5 4.6 5.8 7.5 10.0 17.0 18.4 22.2;  
 0.7 1.0 3.4 4.2 5.4 7.3 15.5 17.8 19.8;  
 0.5 0.9 2.9 3.7 4.8 6.5 14.6 17.6 20.3;  
 0.4 0.9 2.6 3.2 4.2 5.7 13.3 17.2 20.1;  
 0.3 0.6 1.8 2.3 3.0 4.1 10.2 15.9 19.4;  
 0.2 0.4 1.4 1.8 2.3 3.2 8.0 13.9 19.2;  
 0.2 0.4 1.2 1.4 1.9 2.6 6.4 12.0 18.9;  
 0.1 0.3 0.5 0.6 0.8 1.1 2.7 5.1 17.9];

กระแสไฟฟ้า(A) = [0.95 0.95 0.93 0.92 0.91 0.89 0.66 0.35 0;  
 1.03 1.02 1.00 0.98 0.97 0.94 0.67 0.35 0;  
 0.76 0.76 0.76 0.76 0.75 0.75 0.62 0.34 0;  
 0.30 0.30 0.29 0.29 0.29 0.28 0.27 0.23 0;  
 0.60 0.60 0.59 0.58 0.57 0.56 0.50 0.32 0;  
 0.69 0.69 0.68 0.68 0.67 0.67 0.59 0.38 0;  
 0.80 0.79 0.78 0.78 0.77 0.76 0.64 0.39 0;  
 1.09 1.08 1.06 1.05 1.04 1.01 0.72 0.41 0;  
 1.19 1.18 1.16 1.15 1.13 1.10 0.73 0.41 0;  
 1.34 1.33 1.30 1.29 1.27 1.24 0.75 0.42 0;  
 1.66 1.65 1.61 1.58 1.55 1.47 0.77 0.42 0;  
 1.58 1.57 1.53 1.51 1.49 1.41 0.75 0.42 0;  
 1.43 1.40 1.37 1.35 1.33 1.27 0.74 0.40 0;  
 1.69 1.68 1.64 1.62 1.58 1.48 0.76 0.41 0;  
 1.68 1.67 1.63 1.62 1.58 1.48 0.76 0.40 0;  
 1.76 1.74 1.69 1.67 1.63 1.51 0.75 0.40 0;  
 1.93 1.92 1.86 1.85 1.77 1.58 0.75 0.39 0;  
 1.95 1.93 1.86 1.84 1.79 1.59 0.75 0.39 0;

2.12 2.11 2.02 1.98 1.88 1.64 0.75 0.41 0;  
 1.86 1.81 1.74 1.72 1.67 1.49 0.68 0.31 0;  
 2.17 2.09 2.04 2.01 1.89 1.61 0.74 0.39 0;  
 1.92 1.90 1.82 1.81 1.75 1.57 0.75 0.39 0;  
 1.23 1.22 1.19 1.18 1.17 1.15 0.70 0.38 0;  
 1.05 1.05 1.02 1.01 1.00 0.97 0.67 0.35 0;  
 1.10 1.09 1.07 1.06 1.05 1.03 0.69 0.37 0;  
 1.14 1.13 1.11 1.10 1.08 1.06 0.69 0.38 0;  
 1.18 1.18 1.15 1.14 1.12 1.10 0.71 0.39 0;  
 1.31 1.30 1.27 1.25 1.23 1.18 0.68 0.33 0;  
 1.42 1.41 1.37 1.36 1.33 1.28 0.71 0.37 0;  
 1.13 1.12 1.10 1.09 1.08 1.06 0.69 0.37 0;  
 0.78 0.78 0.76 0.75 0.73 0.71 0.54 0.25 0;  
 0.69 0.69 0.67 0.67 0.66 0.64 0.54 0.29 0;  
 0.59 0.59 0.58 0.57 0.56 0.55 0.48 0.27 0;  
 0.41 0.40 0.40 0.39 0.39 0.38 0.34 0.23 0;  
 0.33 0.32 0.32 0.32 0.31 0.31 0.30 0.26 0;  
 0.25 0.25 0.25 0.24 0.24 0.23 0.22 0.21 0;  
 0.08 0.08 0.08 0.08 0.08 0.07 0.06 0.06 0];

## หมายเหตุ

สำหรับฐานข้อมูลการทดสอบชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนอื่นๆ ประกอบด้วย

### ■ ภาคผนวก ฉ. ( ส่วนที่ 2 )

ภาคผนวกที่ ผ.6.2 เป็นข้อมูลทดสอบผลของมุมเอียง และรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ในแต่ละวัน ตามช่วงฤดูกาลต่างๆ ประกอบด้วย

ภาคผนวกที่ ผ.6.2.1 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวระดับที่ไม่มีมุมเอียง โดยติดตั้งตายตัวอยู่กับที่

ภาคผนวกที่ ผ.6.2.2 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทำมุมตามตำแหน่งเส้นรุ้ง ของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และติดตั้งแบบอยู่กับที่

ภาคผนวกที่ ผ.6.2.3 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการคำนวณค่าจากสมการมุมเอียงที่เหมาะสม ในแต่ละวัน

ภาคผนวกที่ ผ.6.2.4 : ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอสซิมูท (เป็นการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน คือในแนวทิศเหนือ – ใต้ และ ตะวันออก – ตะวันตก พร้อมกัน)

#### ■ ภาคผนวก ฉ. ( ส่วนที่ 3 )

ภาคผนวกที่ ผ.6.3 เป็นข้อมูลการศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การจำลองรังสีแสงอาทิตย์ ภายในห้องทดสอบที่สามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ และปัจจัยต่างๆ ได้ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ

ภาคผนวกที่ ผ.6.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น BPTS 1255 HP ขนาด 55 วัตต์

ภาคผนวกที่ ผ.6.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน รุ่น US 64 ขนาด 64 วัตต์

#### ■ ภาคผนวก ฉ. ( ส่วนที่ 4 )

ภาคผนวกที่ ผ.6.4 เป็นฐานข้อมูลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้กับระบบป้องกันการผุกร่อนของท่อโลหะ ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ ในแต่ละวัน ตามช่วงฤดูกาลต่างๆ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น S13 ขนาด 13.59 วัตต์

เนื่องจากข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ลักษณะต่างๆ ในภาคผนวก ฉ. ส่วนที่เหลืออีก 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 2 , ส่วนที่ 3 และ ส่วนที่ 4 ดังมีรายละเอียดแสดงไว้ข้างต้น มีจำนวนของข้อมูลปริมาณมาก (มากกว่า 200 หน้ากระดาษ A4) ไม่สามารถนำมาแสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทั้งหมด แต่เพื่อความสมบูรณ์ของเนื้อหาผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวเขียนลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล พร้อมทั้งแนบไว้ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ภาคผนวก ช.

คู่มือการติดตั้งระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

### คู่มือการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนสำคัญที่จะทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าได้ผลสมบูรณ์เต็มขีดความสามารถของแผงในแต่ละรุ่น ผู้ใช้จำเป็นต้องพิถีพิถันในการติดตั้งให้เกิดประโยชน์สูงสุด ข้อเสนอแนะในการติดตั้งดังนี้

#### การเลือกสถานที่ติดตั้ง

การเลือกติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ประโยชน์สูงสุด จะต้องคำนึงถึงสถานที่ตั้งของแต่ละประเทศเป็นหลัก สำหรับประเทศไทยนั้น ตำแหน่งที่ตั้งจะอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ประมาณ 15 องศาเหนือ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ผลดีที่สุดคือ หันแผงด้านหน้าหรือด้านรับแสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ โดยทำมุมกับพื้นราบ 15 องศา หรือกรณีติดตั้งรูปแบบอื่นสามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมที่อยู่ในส่วนเนื้อหาหลักข้างต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องเลือกสถานที่ที่สามารถติดตั้งให้แผงสามารถหันด้านที่จะรับแสงอาทิตย์ไปในทิศเหนือได้

สถานที่ติดตั้งต้องปราศจากเงาไม้มาบังในระหว่างวัน หรือปราศจากเศษใบไม้ที่จะตกมาปกปิดแผง ทั้งนี้ผู้ใช้ต้องหมั่นตรวจตราดูเป็นประจำ

#### ลักษณะของโครงสร้างรองรับแผง

โครงสร้างรองรับแผงโดยปกติจะออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่จะติดตั้ง และจำนวนแผงที่จะติดตั้ง สภาพพื้นที่โดยทั่วไปจะพิจารณาว่าเป็นพื้นที่ราบที่น้ำท่วมถึงหรือไม่ หรือพื้นที่ลาดชัน ทั้งนี้เพื่อจะได้กำหนดความสูงของฐานรองรับแผงได้ตามความเหมาะสม ในบางกรณี อาจใช้หลังคาบ้านเพื่อติดตั้งแผงได้ ถ้าหากแผงมีจำนวนไม่มาก และสภาพโครงหลังคาแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักได้ อีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึง คือสภาพพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง บางพื้นที่จะมีปัญหาเรื่องต้นไม้หรือเงาไม้ บางพื้นที่จะพบว่า จุดที่เหมาะสมในการติดตั้งจะเป็นแอ่งซึ่งต้องใช้ฐานแบบสูงเพื่อป้องกันน้ำท่วมในหน้าน้ำ ในบางงานที่จะมีปัญหาด้านการขนส่ง การออกแบบโครงสร้างรองรับแผงจึงต้องพิจารณาในปัญหาเหล่านี้ด้วย เช่น โครงสร้างเหล็กที่มีขนาดยาวและน้ำหนักมาก มีปัญหาด้านการขนส่งเข้าพื้นที่ในบางพื้นที่ พอจะสรุปได้ว่าลักษณะโครงสร้างรองรับแผงจะต้องคำนึงถึงจำนวนแผงและพื้นที่ติดตั้ง ตลอดจนการขนส่งเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม พอจะจำแนกลักษณะของโครงสร้างรองรับแผงได้เป็นลักษณะต่าง ๆ ได้ดังนี้

### การติดตั้งแผงจำนวนไม่มาก

สามารถทำการติดตั้งบนหลังคาบ้าน โดยหันทิศทางด้านหน้าแสงไปทางทิศใต้ โดยทำมุมกับพื้นราบ 15 องศา ในกรณีที่หลังคาบ้านทำมุมโดยประมาณ 15 องศาอยู่แล้ว ก็สามารถติดตั้งได้เลย ในกรณีที่หลังคาบ้านทำมุมมากกว่า 15 องศา ก็ให้รองแผงส่วนล่างขึ้นเพื่อให้ทำมุม 15 องศา และในกรณีที่หลังคาบ้านทำมุมน้อยกว่า 15 องศา หรือมีลักษณะแบนราบก็ให้ส่วนบนของแผงให้เงยขึ้น 15 องศา

### การติดตั้งแผงในกรณีเสาสูง

ให้หันทิศทางและปรับมุมแผง กรณีนี้มักนิยมใช้สถานที่ที่มีเงาไม้บัง และมีความจำเป็นต้องยกแผงให้สูงเพื่อหลบเงาไม้ หรือในกรณีที่ติดตั้งสำหรับไฟถนน ความสูงของเสาขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ ขนาดของเสาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความสูงและน้ำหนักของแผงเป็นหลัก กรณีติดตั้งลักษณะนี้ไม่ควรติดตั้งแผงมากเกินไปในคันเดียว ถ้ามีความจำเป็นต้องใช้หลายแผงควรจะทำเสาหลาย ๆ คัน จะเหมาะสมกว่า

### การติดตั้งแผงจำนวนมาก ๆ ซึ่งมีน้ำหนักรวมมาก

ควรติดตั้งบนฐานโครงสร้างเหล็กที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักแผงได้ หรืออาจใช้ฐานไม้ผสมโครงอลูมิเนียม ทั้งนี้การวางทิศทางก็ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้ว

### การต่อสายไฟหลังแผง

ควรต่อสายไฟหลังแผงก่อนการยึดแผงให้ติดแน่นกับโครงสร้างรองรับแผงที่เตรียมไว้แล้ว เพราะในบางกรณีเมื่อยึดแผงแล้วไม่สามารถเปิดกล่องชุมสายหลังแผงได้ การต่อสายไฟหลังแผงพอจะสรุปได้เป็น 4 กรณีคือ

#### กรณีแผงเดียว

จะไม่มีปัญหาอะไรมากนัก เนื่องจากในกล่องชุมสายจะมีสัญลักษณ์ บวก/ลบ ให้ผู้ใช้สามารถต่อขั้วได้เลย และจะได้แรงดันหรือโวลต์ออกมาเป็นระบบ 12 โวลต์

#### การต่อแผงมากกว่าหนึ่งแผงแบบขนาน(Parallel)

กรณีแผงมากกว่าหนึ่งแผง และต้องการต่อให้ได้แรงดันหรือโวลต์เท่าเดิม แต่ได้กระแส (แอมแปร์) เพิ่มขึ้นเป็นการต่อแบบขนาน โดยเอาขั้วบวกของแผงแรกต่อเข้ากับขั้วบวกของแผงที่สอง, สาม, สี่, ห้า... แล้วเอาขั้วลบของแผงแรกต่อเข้ากับขั้วลบของแผงต่อ ๆ ไปเช่นเดียวกัน เมื่อต่อจนครบทุกแผงแล้วจึงนำสายไฟทั้งสองขั้วไปใช้ วิธีต่อแบบนี้แรงดันหรือโวลต์ที่ได้จะยังคงเป็นระบบ

12 โวลต์ เหมือนเดิมแต่กระแส (แอมแปร์) จะได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนแผงที่ต่อ กรณีนี้จะนำมาใช้ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กินกระแสมากกว่ากระแสที่ได้จากแผงแผงเดียว หรือแผงแผงเดียวไม่สามารถประจุ (Charge) แบตเตอรี่ให้เพียงพอกับการใช้งานได้ จึงต้องเพิ่มแผงมากขึ้นเพื่อให้ได้กระแสเพียงพอต่อการใช้งานในแต่ละวัน

#### การต่อแผงมากกว่าหนึ่งแผงแบบอนุกรม (Series)

ในบางกรณีจะพบว่าอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง จะระบุว่าจะใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 48 โวลต์ หรือมากกว่านั้น ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงจะให้แรงดันเพียง 12 โวลต์ เท่านั้น จึงไม่เพียงพอจำเป็นต้องเพิ่มแรงดันจากแผงให้เท่ากับแรงดันที่อุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ต้องการ ในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนแผง และต่อแบบอนุกรม (Series) เพื่อให้ได้แรงดันเพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดันที่อุปกรณ์ไฟฟ้าระบุ ทั้งนี้การต่อแบบอนุกรมจะทำให้แรงดันหรือโวลต์เพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่กระแสไฟ (แอมแปร์) ที่ได้จะเท่าเดิม วิธีการต่อให้เอาสายไฟจากขั้วลบของแผงแรกต่อเข้ากับขั้วบวกของแผงที่สาม ทำสลับกันจนได้แรงดันตามต้องการ ซึ่งการต่อลักษณะนี้กระแส (แอมแปร์) ที่ได้จะเท่าเดิม ถ้าต้องการระบบ 36 โวลต์ หรือมากกว่า ก็ต่อสลับบวกไปลบ ลบไปบวก จนได้แรงดันที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการ 36 โวลต์ ก็ต่อ 3 แผง 48 โวลต์ ต่อ 4 แผง 120 โวลต์ ต่อ 10 แผง เรียงบวกสลับกันไปเสมอ ขั้วที่เหลือของแผงแรกกับแผงสุดท้าย จะเป็นขั้วบวกและลบ ซึ่งจะนำไปใช้งาน โดยปกติเพื่อความสะดวกและความสวยงาม จึงมักจะเดินสายจากขั้วที่เหลือจากแผงแรกไปเก็บไว้ที่กล่องชุมสาย (Junction Box) ของแผงสุดท้าย เพื่อจะได้สายคู่บวก/ลบออกมาจากกล่องเดียวกัน

#### การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสม

ในบางครั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าจะระบุว่าจะใช้แรงดันเกิน 12 โวลต์ และกินกระแสมากกว่าการต่อในข้อที่กล่าวมาแล้ว เช่น ระบุว่าจะใช้แรงดัน 48 โวลต์ และกินกระแส 6 แอมป์ สมมุติว่า เราต่ออนุกรมแผงขนาด 64 วัตต์ 4 แผง ก็จะได้แรงดัน 48 โวลต์ และ 6 แอมป์ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีต่อแบบผสมเข้ามาช่วย เพื่อให้แรงดันและกระแสที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการ การต่อแบบผสม คือการต่อให้แต่ละแถวมีแรงดันเท่ากับแรงดันที่อุปกรณ์นั้น ๆ ต้องการ โดยต่ออนุกรมให้ได้ 48 โวลต์ ในกรณีนี้ แล้วจึงนำแถวที่สองซึ่งต่ออนุกรมกันเหมือนแถวแรก มาต่อขนานกันให้ได้เพิ่มขึ้นตามต้องการ ในที่นี้สมมุติว่าต้องการแรงดัน 48 โวลต์ และกระแส 8 แอมป์ โดยใช้แผงขนาด 64 วัตต์ ซึ่งให้กระแสได้ 3.88 แอมป์ สองแถวต่อขนานกันจะได้ 7.76 แอมป์ตามต้องการ

หมายเหตุ : อาจมีค่าคาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของสายไฟซึ่งอาจจะมีมาตรฐานต่างจากนี้ จากมาตรฐานทั่วไปของสายไฟ จึงควรนำมาคำนวณขนาดของสายไฟที่ควรใช้ดังนี้

### การคำนวณระยะสายไฟ

$$\text{แรงดันที่หายไปทั้งหมด} = \frac{\text{ความยาวของสายไฟ} \times \text{กระแสสูงสุดที่ได้จากแผง} \times \text{อัตราสูญเสียแรงดันต่อเมตร}}{1000}$$

ถ้าหากค่าที่ออกมาแรงดันลดลงเกินกว่าร้อยละ 2.5 หรือประมาณ 0.3 โวลต์ในระบบ 12 โวลต์ ก็ควรเปลี่ยนขนาดสายไฟให้ใหญ่ขึ้น ยกตัวอย่างการคำนวณ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้กระแสไฟ 3 แอมป์ 1 แผง ใช้สายไฟขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร ความยาวจากแผงถึงแบตเตอรี่ 20 เมตร

ในที่นี้	ความยาวสายไฟ	=	20 เมตร
	กระแสสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์	=	3 แอมป์
	อัตราสูญเสียแรงดันต่อเมตร	=	17 มิลลิโวลต์/เมตร
	แรงดันที่ลดลง	=	1.02 โวลต์

$$\text{แรงดันที่ลดลง} = \frac{20 \times 3 \times 17}{1000}$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ลดลงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด จึงต้องแก้ไขโดยเปลี่ยนใช้สายไฟขนาดใหญ่ขึ้น หรือใช้สายไฟสั้นลง โดยขยับให้แผงเข้าใกล้แบตเตอรี่มากขึ้น เช่น ใช้สายไฟขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 10 ตารางมิลลิเมตร จะทำให้แรงดันที่ลดลงเป็น ดังนี้

$$\text{แรงดันที่หายไปทั้งหมด} = \frac{20 \times 3 \times 4.2}{1000} = 0.25 \text{ โวลต์}$$

หรือใช้สายไฟสั้นลงจาก 20 เมตร เหลือ 5 เมตร จะทำให้แรงดันลดลงเป็น ดังนี้

$$\text{แรงดันที่ลดลง} = \frac{5 \times 3 \times 17}{1000} = 0.25 \text{ โวลต์}$$

ในกรณีที่ใช้แผงมากกว่า 1 แผงต่อขนานกัน (Parallel) จะทำให้กระแสสูงขึ้น เช่น 2 แผง แผงละ 3 แอมป์ ก็จะได้กระแสเป็น  $2 \times 3 = 6$  แอมแปร์ (12 โวลต์) ในกรณีนี้จะทำให้การคำนวณแรงดันที่ลดลงเปลี่ยนไป เช่น สายไฟยาว 5 เมตร เหมือนเดิม ขนาดสายไฟ 2.5 มม. เหมือนเดิม แรงดันจะลดลงดังนี้

$$\begin{aligned} \text{แรงดันที่ลดลง} &= \frac{5 \times 6 \times 17}{1000} \\ &= 0.33 \quad \text{โวลท์} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าความยาวสายไฟ กระแสไฟฟ้าจากแผง และขนาดสายไฟ มีส่วนอย่างมากที่จะทำให้การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด การคำนวณนี้เป็นการคำนวณสำหรับระบบไฟ 12 โวลท์ เท่านั้นอย่างไรก็ตามแรงดันที่ลดลงที่มาตรฐานกำหนดไว้ว่าไม่ควรเกินร้อยละ 2.5 หรือ 0.3 โวลท์ ในระบบ 12 โวลท์ นั้น อาจแปรเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม เช่น แม้คำนวณได้ว่าแรงดันลดลง 1 โวลท์ ในระบบ 12 โวลท์ ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้ 0.3 โวลท์ ในระบบ 12 โวลท์ ผู้ใช้ก็อาจจะใช้ได้ถ้าหากคำนวณแล้วพบว่า โวลท์ที่ลดลงไม่กระทบต่อการประจุแบตเตอรี่หรือแรงดันที่ได้ยังสูงกว่าแบตเตอรี่อยู่มากกว่า 3 โวลท์ เช่น

แรงดันไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด (มี LOAD)	=	17	โวลท์
หักแรงดันที่ลดลงเนื่องจากขนาดหรือระยะของสายไฟ	=	1.5	โวลท์
แรงดันคงเหลือ	=	15.5	โวลท์

จะเห็นได้ว่าแรงดันคงเหลือ 15.5 โวลท์ ยังสูงกว่าแรงดันปกติของแบตเตอรี่ที่ 12 โวลท์ อยู่ถึง 3.5 โวลท์ ซึ่งเพียงพอต่อการประจุแบตเตอรี่ได้ เพียงแต่การประจุอาจช้าลงบ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าต้องการประจุเร็วหรือช้าเท่าไร ถ้าหากพิจารณาแล้วเห็นว่า การเปลี่ยนขนาดของสายไฟให้ใหญ่ขึ้นจะทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณมาก และผู้ใช้ก็ไม่มีเวลาจำเป็นต้องการให้แบตเตอรี่ได้รับการประจุอย่างรวดเร็ว ก็พอจะอนุโลมให้ใช้สายไฟขนาดเดิมได้ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงว่าแรงดันไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด (มี LOAD) จากแผงจะต้องสูงกว่าแรงดันแบตเตอรี่ไม่น้อยกว่า 3 โวลท์ จะเห็นได้ว่าการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งแผงให้ใกล้กับแบตเตอรี่จะประหยัดค่าใช้จ่ายของสายไฟได้

\* ข้อควรระวังในการต่อสายไฟจากกล่องชุมสาย (Junction Box) หลังแผงเซลล์ไปยังแบตเตอรี่ คือ จะต้องแน่ใจว่าการต่อขั้วบวก/ลบจะต้องไม่สลับกัน \*

### แบตเตอรี่ การติดตั้ง การบำรุงรักษา และขนาด

แบตเตอรี่เป็นตัวสะสมประจุไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีความสำคัญเป็นอันมาก การให้ความสนใจดูแลและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมออาจทำให้แบตเตอรี่มีอายุใช้งานนานขึ้น ลักษณะใหญ่ ๆ ของแบตเตอรี่พอจะแยกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบน้ำกลั่นหรือน้ำกรด กับแบบไม่ต้องเติม สำหรับในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้แบตเตอรี่แบบเติมน้ำกลั่นหรือน้ำกรด หรือที่มักเรียกกัน

ทั่วไปว่า แบตเตอรี่รถยนต์ เพราะหาง่ายและมีราคาถูกกว่าแบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่นมาก ในที่นี้จึงขอกล่าวถึงแบตเตอรี่แบบเติมน้ำกลั่นหรือน้ำกรดเท่านั้น

แบตเตอรี่รถยนต์ที่เห็นทั่ว ๆ ไปจะได้รับการประจุไฟแห้ง (Dry charge) มาจากโรงงานแล้วเมื่อนำมาใช้ ผู้ใช้เพียงเติมน้ำกรดก็จะมีไฟขึ้นมาประมาณ 80 % เช่น แบตเตอรี่ขนาด 100 แอมป์เมื่อเติมน้ำกรดก็จะมีไฟ 80 แอมป์ อีก 20 % จะต้องทำการประจุหรือชาร์จต่อ การเติมน้ำกรดจะเติมเพียงครั้งเดียว คือครั้งแรกเท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อน้ำกรดพร่อง จะต้องเติมน้ำกลั่นเท่านั้นห้ามเติมน้ำกรดอีกเป็นอันขาด

แบตเตอรี่ควรวางบนฐานที่เรียบและมั่นคง ไม่สั่นสะเทือนโดยง่าย เพราะการสั่นสะเทือนบ่อย ๆ จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง สถานที่วางจะต้องมีอากาศถ่ายเทสะดวก ไม่อยู่ใกล้แหล่งจ่ายความร้อนหรือมีสะเก็ดไฟ เช่น เต้าไฟ หรือไม่อยู่ในที่ที่ฝนสาดถึง และควรวางในที่ที่อยู่ใกล้แสงมากที่สุด เพื่อประหยัดขนาดของสายไฟตามที่กล่าวมาแล้ว ต้องคอยตรวจตราระดับน้ำกลั่นของแบตเตอรี่อยู่เสมอ การปล่อยให้แบตเตอรี่แห้ง จะทำให้แบตเตอรี่เสื่อมคุณภาพ อย่างไรก็ตาม การประจุไฟด้วยระบบพลังแสงอาทิตย์เป็นการประจุแบบช้า ไม่เหมือนการประจุแบตเตอรี่ในรถยนต์ น้ำกลั่นของแบตเตอรี่ที่ประจุด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงพร่องน้อยกว่าการประจุแบตเตอรี่ในรถยนต์ การเติมน้ำกลั่นจึงไม่ค่อยบ่อยเหมือนแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์

ต้องหมั่นตรวจสอบขั้วแบตเตอรี่ให้สะอาดอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้ขี้เกลือจับขั้วแบตเตอรี่ อันอาจทำให้การไหลของกระแสไฟจากแผงเข้าแบตเตอรี่มีปัญหา ถ้าหากสามารถหาแหวนรองขั้วแบตเตอรี่ใส่ก็จะช่วยได้มาก

ขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับงบประมาณของผู้ใช้แต่ละคน อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ขนาดใหญ่จะมีข้อได้เปรียบตรงที่ว่า กำลังไฟสะสมจะมีมากกว่า สามารถนำไปใช้ได้ ในกรณีที่สภาวะอากาศไม่เอื้ออำนวยต่อการประจุไฟจากแผงแสงอาทิตย์ เช่น ไม่มีแดดหรือมีแสงแดดน้อยในบางช่วงเวลา โดยทั่วไปการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณไฟที่ต้องการใช้ในแต่ละวันเป็นสำคัญ ปริมาณไฟรวมที่ใช้ในแต่ละวัน จะต้องสัมพันธ์กับกระแสไฟที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ในแต่ละวันด้วย โดยปกติขนาดกระแสไฟที่ใช้ในแต่ละวัน โดยรวมควรจะอยู่ระหว่าง 20-25 % ของขนาดแบตเตอรี่ หรืออย่างสูงไม่ควรเกิน 30 % เช่น แบตเตอรี่ขนาด 100 แอมป์ ควรใช้ไฟต่อวันประมาณ 20-25 แอมป์ หรืออย่างสูงไม่เกิน 30 แอมป์ต่อวัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ไฟมากกว่านี้จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานสั้นลง และจะต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อย การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณปริมาณไฟ ที่ใช้ในแต่ละวันก่อน เช่น

$$\begin{aligned} \text{ใช้ไฟขนาด 18 วัตต์ 4 หลอด วันละ 5 ชั่วโมง รวม} &= 18 \times 4 \times 5 = 360 \text{ วัตต์ ต่อ วัน} \\ \text{คิดเป็นกระแสไฟ (ในระบบ 12 โวลท์) ได้} &= \frac{360}{12} = 30 \text{ แอมแปร์ - ชั่วโมง} \\ \text{แบตเตอรี่ที่ควรใช้} &= 150 \text{ แอมแปร์ - ชั่วโมง} \\ \text{ปริมาณการใช้ไฟคิดเป็น} &= \frac{30 \times 100}{150} = 20 \% \text{ ของขนาดแบตเตอรี่} \end{aligned}$$

เมื่อแบตเตอรี่สูญเสียกระแสวันละ 30 แอมป์ จึงต้องทำการประจุในปริมาณที่เท่ากัน เพราะฉะนั้น จะต้องใช้แผงที่สามารถประจุไฟได้วันละ 30 แอมป์ เป็นอย่างต่ำ แผงเซลล์ขนาด 64 วัตต์ให้กระแส 3.88 แอมป์/ชั่วโมง คิดเฉลี่ยแสงแดดประเทศไทยวันละ 5 ชั่วโมง จะได้ 19.4 แอมป์/วัน ในกรณีนี้ จึงต้องใช้ 2 แผง

อย่างไรก็ตาม การติดตั้งไฟ 4 หลอด อาจจะได้เปิดพร้อมกันทั้ง 4 หลอด ตลอด 5 ชั่วโมง เพราะฉะนั้น ขนาดของแบตเตอรี่และจำนวนแผงอาจเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งนี้ผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนดได้ดีที่สุด อีกทั้งการกำหนดว่าแสงแดดปกติวันละ 5 ชั่วโมง ก็อาจคาดเคลื่อนได้ เพราะบางเดือนแสงแดดอาจมีมากกว่า 5 ชั่วโมง บางเดือนอาจจะน้อยกว่า และที่สำคัญการคิดคำนวณว่าอุปกรณ์ไฟฟ้ากินกระแสวันละเท่าไรนั้น เป็นการคำนวณโดยคร่าว ๆ เท่านั้น เพราะคุณภาพของตัวแปลงไฟ 18 วัตต์ 4 หลอด ใช้ 5 ชั่วโมง กินกระแสรวม 30 แอมป์ ถ้าตัวแปลงไฟในชุดหลอดไฟคุณภาพไม่ดี การกินกระแสไฟก็จะมากกว่า 30 แอมป์/วัน เช่นถ้าตัวแปลงไฟ (Inverter) มีประสิทธิภาพเพียง 80 % กระแสไฟรวมที่จะสูญเสียก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 36 แอมป์/วัน ชนิดและคุณภาพของตัวแปลงไฟจึงมีส่วนสำคัญในการคำนวณเป็นอย่างมาก

### อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Control Unit)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ว่าซึ่งให้แรงดันสูง อันจะก่อให้เกิดความเสียหายกับแบตเตอรี่ที่ได้รับการประจุจนเต็ม แล้วไม่ได้ตัดการประจ่ออก ดังนั้นในกรณีที่เกรงว่าแบตเตอรี่จะเสียหายจากการประจุเกิน (Overcharge) จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ นอกจากควบคุมไม่ให้แบตเตอรี่เสียหายจากการประจุเกินแล้ว ยังทำหน้าที่ตัดการใช้ไฟในกรณีที่แบตเตอรี่ถูกใช้มากเกินไป จนอาจทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ ตัวควบคุมการประจุจึงเป็นตัวควบคุมให้แบตเตอรี่มีแรงดันที่เหมาะสม ไม่สูงเกินไปและไม่ต่ำเกินไป

ลักษณะทั่วไปของตัวควบคุมการประจุ ตัวควบคุมการประจุจะมีขนาดต่าง ๆ กัน เช่น 5 แอมป์ 10 แอมป์ หรือ 30 แอมป์ การเลือกใช้ขนาดของตัวควบคุม จึงขึ้นอยู่กับปริมาณไฟที่ใช้และปริมาณไฟที่ประจุ เช่น ถ้าใช้แผงขนาด 3 แอมป์ 1 แผง และใช้ไฟขนาด 18 วัตต์ 2 หลอด ซึ่งคิดแล้วจะกินกระแสประมาณ 3 แอมป์/ชั่วโมง ก็สามารถเลือกใช้ตัวควบคุมขนาด 5 แอมป์ก็พอ

### การนำไฟที่ได้จากแผงแสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ไปใช้งานโดยผ่านตัวแปลงไฟ (Inverter)

เพื่อแปลงให้เป็นไฟบ้านหรือไฟกระแสสลับ (AC) 220 โวลต์ ซึ่งระบบนี้จะเหมาะสำหรับระบบไฟที่มีขนาดใหญ่ เช่น เกินกว่า 300 วัตต์ เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ DC มักมีขีดจำกัดด้านขนาดของกระแสไฟ ทำให้ไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่ทนกระแสสูง ๆ ได้ หรือหากได้ก็มีราคาแพงมาก อีกประการหนึ่งการเดินสายไฟบริเวณกว้าง ๆ นั้น จะเกิดปัญหาการสูญเสียแรงดันในสายไฟมาก (Volt Drop) ทำให้ต้องใช้สายไฟขนาดใหญ่ และมีราคาแพง อีกทั้งยังดูไม่สวยงามอีกด้วย ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงนิยมแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ ข้อควรคำนึงและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบมีดังนี้

เครื่องแปลงไฟ (Inverter) ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงไฟจากไฟกระแสตรงที่ได้จากแบตเตอรี่ให้เป็นกระแสสลับหรือไฟบ้านระบบ 220-240 โวลต์ ตัวแปลงไฟจะมีชนิดและขนาดต่าง ๆ กัน มีทั้งระบบแปลงไฟกระแสตรง 12 โวลต์ 24 โวลต์ 48 โวลต์ หรือ 120 โวลต์ ให้เป็นไฟกระแสสลับ 220-240 โวลต์ หรือแม้แต่แปลงเป็นไฟ 3 เฟส 380 โวลต์ ตัวแปลงไฟจะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 100 วัตต์ จนถึงหลายสิบลิกิโลวัตต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหรือความจำเป็นที่จะใช้งาน ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับตัวแปลงไฟที่สำคัญมี

- ประสิทธิภาพการทำงาน (Efficiency) ของเครื่องแปลงไฟ เครื่องแปลงไฟที่มีประสิทธิภาพสูง จะสามารถจ่ายไฟให้ได้ใกล้เคียงกับไฟที่ต้องการมากที่สุด เช่น เครื่องแปลงไฟขนาด 100 วัตต์ ประสิทธิภาพ 95 % เครื่องนี้จะสามารถจ่ายไฟให้ได้ 95 วัตต์ โดยกินกระแสเทียบเท่า 100 วัตต์ แต่ถ้าเครื่องแปลงไฟมีประสิทธิภาพเพียง 50 % ก็หมายความว่า เครื่องแปลงไฟดังกล่าวสามารถจ่ายไฟให้ได้เพียง 50 วัตต์ แต่จะกินกระแสไฟเทียบเท่า 100 วัตต์ เพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงไฟจึงมีความสำคัญมาก เครื่องแปลงไฟที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ จึงมักมีราคาแพง ผู้ใช้จึงควรศึกษาข้อมูลทางเทคนิคให้รอบคอบ มิฉะนั้น จะได้เครื่องแปลงไฟที่มีประสิทธิภาพต่ำ แต่กินไฟสูงมาใช้ จะทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้นกว่าราคาที่ถูกของเครื่องแปลงไฟ เช่น ถ้าแผงขนาด 64 วัตต์ 3 แผง รวมกันได้ 192 วัตต์ แต่พอไปผ่านเครื่องแปลงไฟที่มีประสิทธิภาพเพียง 50 % กำลังไฟที่จะได้ออกมาจะเหลือเพียง 96 วัตต์เท่านั้น

- ลักษณะรูปคลื่นของวงจร (Wave form) เครื่องแปลงไฟแต่ละชนิดจะให้ลักษณะลูกคลื่นออกมาไม่เหมือนกัน บางตัวจะออกมาเป็นแบบ Sine Wave บางตัวจะให้ออกมาเป็น Square Wave ซึ่งถ้าเป็นลักษณะ Square Wave จะทำให้เกิดปัญหาการใช้กับอุปกรณ์บางชนิด เช่น อุปกรณ์ที่มีมอเตอร์ เช่น พัดลม เพราะฉะนั้นผู้ใช้จะต้องดูด้วยว่าเครื่องแปลงไฟที่ใช้จะจ่ายไฟออกมาเป็น Sine

หรือ Square เพราะ โดยปกติแล้ว เครื่องแปลงไฟที่จ่ายไฟเป็น Square Wave จะมีราคาถูกกว่า Sine Wave แต่มีปัญหาการใช้งานกับอุปกรณ์บางอย่าง

- อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบนี้ จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับไฟบ้านหรือไฟกระแสสลับ (AC) โดยปกติจะเป็นระบบ 220-240 โวลต์ ในประเทศไทย

- อุปกรณ์ควบคุมแบตเตอรี่ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

- ขนาดของสายไฟที่ใช้ก็เป็นสายไฟที่ใช้ตามบ้านทั่ว ๆ ไป เนื่องจากเมื่อแปลงไฟเป็นไฟกระแสสลับแล้วก็จะไม่มีปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้ามากเหมือนไฟกระแสตรง

- การวางตำแหน่งเครื่องแปลงไฟ จะต้องวางตำแหน่งให้ใกล้กับแบตเตอรี่มากที่สุด และใช้สายไฟเส้นใหญ่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ การวางเครื่องแปลงไฟห่างจากแบตเตอรี่มากเกินไป จะทำให้แรงดันที่จะป้อนเข้าเครื่องแปลงไฟต่ำ และทำให้เครื่องแปลงไฟไม่สามารถทำงานได้

ข้อควรระวังในการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากับเครื่องแปลงไฟ มักจะมีการเข้าใจผิดเกิดขึ้นเสมอเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นลักษณะมอเตอร์หรือคอมเพรสเซอร์ ซึ่งผู้ขายมักจะระบุว่ากินไฟเท่านั้นวัตต์เท่านั้นวัตต์ ทำให้ผู้ใช้เข้าใจว่ากินไฟสูงสุดเท่าที่ระบุ เช่น ปั๊มน้ำ สว่านไฟฟ้า แอร์ ตู้เย็น จริงอยู่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่กล่าวมาอาจจะระบุว่ากินไฟแค่ 150 วัตต์ จะต้องใช้กำลังไฟสูงถึง 1000 วัตต์ ในการฉุดให้ปั๊มเริ่มทำงาน หรือสว่านไฟฟ้าที่ระบุว่ากินไฟ 500 วัตต์ หมายถึง สว่านที่หมุนโดยไม่ได้ทำงานเจาะ กำลังไฟระหว่างเจาะก็จะมากกว่าที่ระบุ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับแรงกดของผู้เจาะว่ากดมากน้อยเพียงไร ยิ่งกดมากก็ยิ่งกินไฟมาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าเครื่องแปลงไฟ จะต้องศึกษาให้รอบคอบเสียก่อน มิฉะนั้นเครื่องแปลงไฟจะเสียหายได้เพราะใช้ไฟมากเกินไป

### ปัญหาและวิธีการแก้ไขด้วยตัวเอง

บ่อยครั้งมักจะพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงอาทิตย์มักเกิดความผิดพลาดเล็ก ๆ น้อย ๆ ซึ่งผู้ใช้สามารถแก้ไขด้วยตัวเองได้ คือ

ปัญหา - แผงแสงอาทิตย์ที่ใช้งานอยู่เป็นปกติเกิดไม่มีไฟหรือไม่จ่ายไฟไปประจุแบตเตอรี่ ทั้ง ๆ ที่ยังมีแสงแดดเป็นปกติ

สาเหตุ - สายไฟที่ต่อจากแผงขาดหรือหลุดจากขั้วต่อในกล่องหลังแผง

- ตัวไดโอดที่อยู่ในกล่องหลังแผงใหม่ เนื่องจากบริเวณใกล้เคียงถูกฟ้าผ่าทำให้กระแสจากฟ้าผ่าวิ่งเข้าสู่แผงแสงอาทิตย์ได้

- ตัวควบคุมการประจุไฟ (ถ้ามี) เสีย

- ขั้วแบตเตอรี่หลวม หลุด สกปรก หรือ น้ำกลั่นขาด

- การแก้ไข
- สวิตช์ตัดไฟ (Breaker) ก่อนเข้าเบตเตอร์เสีย
  - สวิตช์ตัดไฟไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเปิด
  - ตรวจสอบว่าสวิตช์ไฟอยู่ในตำแหน่งเปิดหรือไม่ เพราะสวิตช์ตัดไฟอาจจะติดเนื่องจากมีกระแสจากฟ้าผ่า
  - ตรวจสอบขั้วเบตเตอร์ ถ้าหลวมให้ขันให้แน่น ถ้าขั้วสกปรกให้ใช้น้ำร้อนล้างแล้วหาแหวนรองเบตเตอร์ใส่ ตรวจสอบระดับน้ำกลั่น
  - ตรวจสอบสวิตช์ (Breaker) ตัวที่อยู่ระหว่างแผงกับเบตเตอร์ โดยวัดแรงดัน (Volt) ของขั้วที่ต่อสายไฟจากแผงสูงกว่าแรงดัน (Volt) ของขั้วที่สายไฟไปเบตเตอร์ในขณะที่มีแสงแดดปกติ แสดงว่าสวิตช์ตัดไฟเสียให้เปลี่ยนใหม่ หรือ ถ้าหากยังไม่สามารถกาเปลี่ยนได้ในขณะนั้น ให้ต่อสายตรงโดยไม่ผ่านสวิตช์ไป ใช้ชั่วคราวก่อน
  - ตรวจสอบตัวควบคุมการประจุไฟ (ถ้ามี) ก่อนทำการตรวจสอบให้เปิดอุปกรณ์ไฟที่มีอยู่ก่อน แล้วจึงถอดขั้วเบตเตอร์ออก จากนั้นจึงทำการวัดไฟจากขั้วที่ต่อสายไฟจากแผง และขั้วที่ต่อสายไฟไปเบตเตอร์ ถ้าขั้วสายไฟจากแผงมีไฟแต่ขั้วสายไฟไปเบตเตอร์ไม่มีไฟ แสดงว่าตัวควบคุมการประจุเสีย ให้ส่งซ่อมระหว่างส่งซ่อมหรือหาเปลี่ยนใหม่ อาจจะต่อตรงโดยไม่ผ่านตัวควบคุมก่อนเพื่อใช้ชั่วคราว ในกรณีนี้ผู้ใช้จะต้องคอยควบคุมการประจุไฟเกิน และการใช้ไฟจากเบตเตอร์มากเกินไปด้วยตนเอง เพื่อไม่ให้เบตเตอร์เสียหาย แต่ถ้าตรวจสอบแล้วตัวควบคุมไม่เสีย ให้ใส่ขั้วเบตเตอร์เข้าเหมือนเดิมก่อนปิดสวิตช์อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปิดไว้ตั้งแต่แรก เพราะถ้าปิดสวิตช์อุปกรณ์ไฟก่อนใส่ขั้วเบตเตอร์ให้เรียบร้อยอาจทำให้ตัวควบคุมเสียได้ หลังจากนั้นจึงตรวจสอบจุดอื่นต่อไป
  - ตรวจสอบกล่องชุมสาย (Junction Box) หลังแผง ถ้าหากการตรวจสอบที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าไม่มีไฟจากแผงเข้าสวิตช์ตัดไฟ หรือเข้าตัวควบคุมการประจุ ก็ถึงขั้นตอนการตรวจสอบสายไฟและไดโอดที่อยู่หลังแผง ให้ตรวจสอบว่าสายไฟที่ต่อหลังแผงมายังสวิตช์หรือตัวควบคุมหลุดหรือไม่แน่นก็ให้ขันใหม่ แต่ถ้าพบว่าตัวไดโอดใหม่ก็ให้หาเปลี่ยน ในกรณีที่ไม่สามารถหาได้ในเวลานั้น ก็อาจถอดไดโอดทิ้งไปก่อน แล้วต่อสายเหมือนเดิม จะทำให้สามารถใช้ไฟได้ชั่วคราว ข้อควรระวังคือ การเปลี่ยนไดโอดจะต้องระวังการกลับขั้วบวก/ลบของไดโอด ภาะนั้น ก่อนถอดไดโอดออก ต้องจำตำแหน่งและทิศทางของได

โอดไว้ให้แน่น มิฉะนั้น จะเกิดปัญหาเวลาใส่ไดโอดผิดข้าง วิธีสังเกตง่าย ๆ คือ ตัวอักษรบนไดโอดจะหันหัวไปทางด้านบวก

- ปัญหา - แผงแสงอาทิตย์ที่ใช้งานอยู่ ประจุไฟหรือชาร์จไฟได้น้อยลงหรือช้าลง
- การแก้ไข - ในกรณีเงาไม้บัง ฝุ่นเกาะ หรือใบไม้ปิด ให้ทำความสะอาดแผง และตัดกิ่งไม้ไม่ให้เงาบัง
- กรณีแบตเตอรี่เสื่อมให้เปลี่ยนใหม่
  - กรณีการย้ายแผง ย้ายแบตเตอรี่ หรือเพิ่มแผงจนทำให้แรงดันลดลงให้คำนวณหาสายไฟขนาดที่เหมาะสมใหม่ที่กล่าวมาแล้วนั้น แล้วเปลี่ยนสายไฟใหม่
- ปัญหา - อุปกรณ์ไฟไม่สว่างเท่าที่ควร หรือมีลักษณะเป็นลูกคลื่นวิ่งในหลอดไฟ
- สาเหตุ - สายไฟที่ไซ้ขนาดเล็กเกินไป หรือมีการย้ายไฟจากจุดเดิมไปไกลกว่าเดิมหรือการเพิ่มหลอดไฟมากขึ้น และไม่ได้เปลี่ยนแปลงขนาดสายไฟ
- แบตเตอรี่เสื่อม
  - หลอดไฟเสื่อม สังเกตได้จากขั้วหลอดดำ
  - ตัวแปลงไฟ (Inverter) ที่อยู่ในหลอดไฟเสื่อม
- การแก้ไข - ตรวจสอบขนาดสายไฟว่าเหมาะสมกับการย้ายจุด การเพิ่มหลอดไฟหรือไม่ โดยการคำนวณขนาดของสายไฟ
- เปลี่ยนแบตเตอรี่หรือตัวแปลงไฟถ้าพบว่าเสื่อม
  - เปลี่ยนหลอดไฟเมื่อขั้วดำมาก

## ข้อมูลเปรียบเทียบ

ข้อ	SINGLE CRYSTAL	ข้อ	AMORPHOUS
1.	กระจกเคลือบผิวเซลล์สามารถแตกหรือหักเสียหายได้	1.	สาร Tofzol จาก Dupont เคลือบผิวเซลล์สามารถตัดปัญหาการแตกหักเสียหายได้
2.	เมื่อใช้เป็นเวลานานๆ หลายปี กระจกเคลือบผิวเซลล์จะเหลือง ทำให้คุณสมบัติการรับแสงลดลง	2.	ไม่ใช่กระจกเคลือบผิวเซลล์ทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องการรับแสง
3.	สามารถแปลงพลังงานในสเปกตรัมของแสงได้เพียงสีเดียว คือสีแดง ทำให้ช่วงโมงการรับแสงน้อยกว่า	3.	สามารถแปลงพลังงานแต่ละสีในสเปกตรัมของแสงได้ถึง 3 สีคือ แสงสีแดง, สีเขียว, และสีฟ้า, ทำให้ช่วงโมงการรับแสงมากกว่า
4.	มีน้ำหนักมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักต่อวัตต์	4.	น้ำหนักน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักต่อวัตต์
5.	เกิดการสูญเสียพลังงาน เมื่อมีเงบัง เพราะไม่มีบายพาสไดโอด ในแต่ละเซลล์	5.	มีบายพาสไดโอดในแต่ละเซลล์ เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานเมื่อมีเงบัง
6.	ความร้อนสะสมที่กระจกสูง ส่งผลถึงพลังงานที่ได้จะต่ำลงด้วย	6.	ความร้อนของแผงมีน้อยกว่า แต่ไม่มีการสะสมความร้อนที่แผง จึงสามารถผลิตพลังงานได้อย่างเต็มที่ ตามวัตต์จริง

## ข้อมูลเปรียบเทียบ

ข้อ	SINGLE CRYSTAL	ข้อ	AMORPHOUS
7.	กรรมวิธีในการผลิต เป็นการนำแผ่นเซลล์มาเรียงต่อกันทำให้มีรอยต่อเชื่อมมากจุดทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานตามรอยต่อ ต้องจำกัดจำนวนชั้นเซลล์ให้อยู่ในจำนวน 36 ชั้น หรือ 34 ชั้น ต่อ 1 แผง ไม่มีอิสระที่จะเลือกวัตต์และพื้นที่ได้	7.	กรรมวิธีในการผลิตเป็นแบบม้วนต่อม้วน จึงทำให้สามารถเลือกขนาดวัตต์ได้ตามต้องการ ต้องการวัตต์เท่าไรก็ตัดได้ตามพื้นที่เท่านั้น
8.	ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดี ถ้าอยู่ในเงื่อนไข 25 องศา 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร กำลังวัตต์จะลดลงทันทีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 1 องศา หรือความสว่างลดลง	8.	ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 14 % (เพราะสามารถรับพลังงานได้ 3 แอมป์ของแสง)
9.	เกิดการสูญเสียที่จุดต่อระหว่างแผงเซลล์	9.	ไม่มีการสูญเสียเพราะกรรมวิธีในการผลิตต่างกัน กล่าวคือ เป็นการทำเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีรอยต่อ
10.	การขนส่งควรต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะเป็นกระจก	10.	การขนส่งได้สะดวก ลดความเสี่ยงต่อการแตกหัก เพราะไม่เป็นกระจก
11.	ใช้งานได้เพียงแบบแผง อย่างเดียว ทำให้ลักษณะการติดตั้งต้องคำนึงถึงพื้นที่และแสงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสำคัญ	11.	ใช้งานได้หลากหลาย มีผลิตภัณฑ์หลายลักษณะทำให้สามารถนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ได้เลย
12.	พกพาลำบาก เทอะทะ จักรูปร่างไม่ได้ เพราะผลิตภัณฑ์เป็นแบบแผงเท่านั้น	12.	พกพาสะดวก เพราะผลิตภัณฑ์มีแบบอ่อนตัวและพกพาได้ สำหรับเดินทางต่าง ๆ นานา ไปตามสถานที่ต่าง ๆ

## ข้อมูลเปรียบเทียบ

ข้อ	SINGLE CRYSTAL	ข้อ	AMORPHOUS
13.	Laminate การเคลือบเซลล์ให้เป็นเนื้อเดียวกับกระจกเหมือนเคลือบบัตรต่าง ๆ มีโอกาสร่อนหลุดได้	13.	INCAPSURATED เป็นการเคลือบชนิดหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน การร่อน, หลุด ไม่มีโอกาสเกิดขึ้น
14.	ต้องระวังดูแลความปลอดภัยจากสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก เช่น ก้อนหิน จากเด็ก กิ่งไม้ สัตว์ ต่าง ๆ เพราะอาจจะทำให้เกิดการแตกได้	14.	ไม่ต้องระวังมากนัก
15.	จำนวนพลังงานที่ได้รับจะน้อยกว่าที่เขียนบอกไว้ที่แผง เพราะมีส่วนสูญเสียพลังงานตามข้อต่าง ๆ ที่ได้กล่าว ฐ เบื้องต้น	15.	เมื่อเปรียบเทียบจำนวนวัตต์ที่ได้มากับราคาที่ซื้อจะคุ้มค่ากว่า เพราะสามารถให้พลังงานเต็มตามที่แผงกำหนด

ภาคผนวก ซ.

รายละเอียดคำสั่งที่สำคัญของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์  
สำหรับโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

## ผ 8.1 คำสั่งเกี่ยวกับ Interpolation และ Polynomial Curve Fitting

### ผ 8.1.1 Linear Interpolation

`interp1(x, y, s)` เป็นการหา linear interpolation ของชุดข้อมูล  $x$  และ  $y$  เมื่อ  $y = y(x)$  โดยจะให้คำตอบเป็นค่าของ  $y(s)$  โดย  $x$  และ  $y$  เป็น vector ขนาดเท่ากัน ในกรณีที่  $s$  เป็น vector จะให้ค่าเป็น vector ขนาดเท่า  $s$

### ผ 8.1.2 Cubic Interpolation

`interp1(x, y, s, 'cubic')` โดย  $x, y$  และ  $s$  จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'cubic' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการทำ cubic interpolation

### ผ 8.1.3 Spline Interpolation

`interp1(x, y, s, 'spline')` ค่า  $x, y$  และ  $s$  จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'spline' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการใช้วิธี cubic spline interpolation

`spline(x, y, s)` ซึ่งจะให้ผลเหมือน `interp1(x, y, s, 'spline')` เพียงแต่คำสั่ง spline รับแต่เฉพาะ  $x, y$ , ที่เป็น vector เท่านั้น

`spline(x, y)` จะให้ 'piecewise polynomial' ที่ได้จาก interpolate ชุดข้อมูล  $(x, y)$  โดย polynomial จะอยู่ในรูป  $y = y(x)$  ซึ่งเรียก polynomial ที่ได้ว่ามีรูปเป็น pp-form polynomial และหากต้องการหาค่า function ที่จุดใดอาจใช้คำสั่ง `ppvalue`

### ผ 8.1.4 interpolation function อื่นๆ

`interp2` สำหรับ 2-มิติ interpolation

`interp#` สำหรับ interpolation #-มิติ ซึ่ง Matlab สามารถทำได้ถึง 6-มิติ

`interpft` สำหรับ Fast Fourier Transform Interpolation Method

`griddata` สำหรับ 2-มิติ interpolation `interp1(x, y, s, 'spline')` ค่า  $x, y$  และ  $s$  จะเหมือนกับที่ผ่านมา ส่วน string 'spline' จะบอกให้ Matlab ทราบว่าต้องการใช้วิธี cubic spline interpolation

### ผ 8.1.5 Polynomial Curve Fitting

`polyfit(x,y,n)` โดย  $x,y$  เป็นจุดข้อมูลที่ต้องการ fit curve ด้วย polynomial degree Matlab จะให้สัมประสิทธิ์ของ polynomial  $y = f(x)$  คืนมาโดยเรียงจากสัมประสิทธิ์ของกำลังมากไปหาน้อย

## ผ 8.2 คำสั่งเกี่ยวกับการอินทิเกรตเชิงตัวเลข ( Numerical Integration )

### ผ 8.2.1 Trapezoidal Numerical integration

`trapz(x,y)` จะเป็นการ integrate  $\int y(x)dx$  โดย  $x$  และ  $y$  เป็น column vector ถ้า  $x$  และ  $y$  เป็น matrix จะคำนวณแต่ละ column ของ matrix นั้น ถ้า  $x$  เป็น column vector และ  $y$  เป็น matrix จะเทียบแต่ละ column ของ  $y$  เทียบกับ  $x$

### ผ 8.2.2 Quadrature Integration

`quad('function' ,a,b)` หรือ

`quad('function' ,a,b,tol,trace)` หรือ

`quad('function',a,b,tol,trace,p1,p2...)`

โดย 'function' คือชื่อ function file ที่เขียน  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่กำหนดจุดเริ่ม integrate จาก  $a$  ถึง  $b$  ส่วนที่เหลือจากนี้คือ  $tol, trace, p1, \dots$  จะมีหรือไม่มีก็ได้ สำหรับ  $tol$  เป็นค่าที่กำหนด relative error ของการ integrate ถ้าไม่กำหนด Matlab จะตั้งค่านี้ไว้ที่ 0.001,  $trace$  คือ function ที่จะใช้ plot จุด และ  $p1, p2$  คือค่า parameters อื่นๆที่จะส่งไปให้กับ Matlab ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากคำสั่ง `help quad` สำหรับคำสั่งนี้ Matlab จะใช้ Simpson's Rule ในการหาค่า integrate

`quad8('function',a,b)` หรือ

`quad8('function',a,b,tol,trace)` หรือ

`quad8('function',a,b,tol,trace,p1,p2...)`

parameter ต่างๆจะเหมือน function `quad` เพียงแต่การคำนวณจะละเอียดมากกว่า โดยจะใช้ Newton-Cotes 8 panel rule ซึ่งจะเหมาะกว่า `quad` ในด้านความละเอียดและหาค่า integral ของ function ที่มี singularity อยู่ในช่วงที่ต้องการ integrate

## ผ 8.3 คำสั่งเกี่ยวกับการพล็อตกราฟ( Graph plot ) ที่สำคัญ

### ผ 8.3.1 การพล็อตกราฟใน 2 มิติ

#### Error Bar

`errorbar(x,y,e,'str')` เป็นคำสั่ง `plot(x,y)` แล้วให้มี error bar ขนาดเท่ากับ  $e$  วางสมมาตรอยู่ทุกจุด coordinate ที่มี การ plot x-y ส่วน 'str' เป็น option ซึ่งบอก character string ของสีและลักษณะเส้นกราฟ x,y ที่ใช้

`error bar (x,y,l,u)` คล้ายกับคำสั่งข้างบน แต่จะวาง error bar ตัวที่  $y$  ที่จุดสูงกว่า  $y_i$  เป็นระยะ  $l$  และต่ำกว่า  $y_i$  เป็นระยะ  $u_i$

#### Graph function

`fplot ('function' , lim, str, tot)` เป็นการ plot function ชื่อ function ( อยู่ใน function file ชื่อ function.m ) ส่วน lim เป็น vector ที่กำหนดค่า Limit ของ function ที่จะ plot แบ่งเป็น 2 แบบคือ  $\text{lim} = [x_{\min} \ x_{\max}]$  เป็นการกำหนดค่า minimum และ maximum ของแกน x เท่านั้น  $\text{lim} = [x_{\min} \ x_{\max} \ y_{\min} \ y_{\max}]$  กำหนดค่าทั้งสองแกน ส่วน option str เป็นการกำหนดลักษณะเส้น และค่า tot เป็นการกำหนด relative error .ให้ น้อยกว่าค่า tot

#### Polar Plot

`polar(q,r)` จะเป็นการ plot ลงบน polar coordinate โดย Q vector ของมุม Q ในหน่วย radian เทียบกับรัศมีที่มีขนาดเท่ากับ vector r

#### Histogram และ Bar Graphs

`his(x,n)` จะเขียน histogram ของข้อมูลใน vector x ส่วน n เป็น option เป็นจำนวนกราฟที่ต้องการใช้แสดงข้อมูล ถ้าไม่มีการกำหนด Matlab จะใช้  $n=10$

`bar(x)` เขียน bar graph ของ x

`bar(x,z)` เขียน bar graph ของ x โดยกำหนดตำแหน่ง โดย vector z ซึ่งมีการเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก

`stairs(x)` เขียน stairs graph ของ x (stairs graph คือ bar graph ที่ไม่มีเส้นด้านข้าง)

stairs(x,z)	เขียน stairs graph ของ x โดยกำหนดตำแหน่งโดย vector z ซึ่งต้องมีการเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก
stem(x)	เขียน stem graph ของ x stem graph เป็นกราฟที่คล้าย bar graph ที่ไม่มีความหนา จะเป็นเส้นตรงเส้นเดียวและที่จุดสิ้นสุดของเส้นจะมีวงกลมเขียนอยู่
stem(x,z)	เขียน stem graph ของ x โดยมี vector z เป็นตัวกำหนดตำแหน่ง ซึ่งจะเรียงจากน้อยไปหามาก

### ผ 8.3.2 การพล็อตกราฟใน 3 มิติ

#### การพล็อตจุดใน 3 มิติ

plot3(x,y,z)	โดย x,y,z เป็น vector ที่มีขนาดเท่ากันจะเป็นการ plot coordinate $(x_i, y_i, z_i)$ ลงบนแกน ถ้าหากว่า parameter x,y,z, มีค่าใดเป็น Matrix แล้ว Matlab จะ plot ตาม column ของ parameter นั้น เข้าไปเรื่อยๆกับ vector ที่เหลือจนครบทุก column
plot3(x,y,z,'str')	จะเหมือนกับข้างบน หากแต่ 'str' จะเป็นเครื่องหมายกำหนดลักษณะเส้นและสีที่ plot

#### การเขียนเส้นพื้นผิวใน 3 มิติ

[u,v] = meshgrid(x,y)	โดย x เป็น vector ความยาว m และ y เป็น vector ความยาว n ทั้งคู่เป็น vector ที่มีการเรียงค่าจากน้อยไปหามากและจะให้ผลเป็น matrix ที่กำหนด x และ y coordinate ใน rectangular domain โดย coordinate $(u_{ij}, v_{ij})$ คู่หนึ่งจะเป็นจุดที่ใช้หา $z_{ij} = f(u_{ij}, v_{ij})$ นั้นเอง
[x,y,z] = cylinder(r,n)	จะเป็นการสร้าง grid ใน cylindrical coordinate โดย vector r เป็นรัศมีแต่ละจุดที่มี ลักษณะห่างเท่ากันตามระยะสูง นั่นคือ ถ้า r คงที่จะได้ coordinate ของรูปทรงกระบอก แต่ถ้า r เปลี่ยนไปตามระยะสูงจะได้รูปกรวย ส่วน n เป็นจุดที่แบ่งตามแนวเส้นรอบวง ถ้าไม่มีการกำหนดจะใช้ $n = 20$ และหากไม่กำหนดค่า r จะใช้ $r = [1 \ 1]$ เป็นค่าตั้งต้น
x,y,z] = sphere(n)	สร้าง spherical grid แล้วให้ค่า matrix x,y,z คำนวณโดย x,y และ z จะมีขนาด $(n+1) * (n-1)$

### การเขียนผิวลายเส้น

mesh(X,Y,Z,C)	จะเป็นการ plot จุด $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ ของ matrix $X, Y, Z$ ที่มีขนาด $m \times n$ และเชื่อมต่อดูจุดที่อยู่ติดกันเข้าด้วยกัน ส่วน $C$ เป็น matrix ขนาดเท่ากันซึ่งจะเป็นการกำหนดสีของแต่ละจุด โดย $C$ เป็น option หากไม่ใช่ Matlab จะกำหนดให้ $C = Z$
mesh(x,y,Z,C)	ถ้ากำหนด $x$ เป็น vector ความยาว $m$ และ $y$ เป็น vector ความยาว $n$ จะได้ว่า $Z$ ต้องเป็น matrix ขนาด $m \times n$ โดย Matlab จะทำการ plot $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ นั่นคือ Matlab จะสร้าง meshgrid ให้โดยอัตโนมัติ จาก vector $x$ และ $y$ ส่วน $C$ เป็น option เหมือนคำสั่งที่ผ่านมา
mesh(z)	เหมือนคำสั่งข้างบน แต่เป็นการ plot $(i,j,z_{ij})$ โดย $z$ ต้องเป็น matrix
meshc(...)	เหมือนคำสั่ง mesh(...) แต่จะมีการเขียน contour curve ได้ภาพ
meshz(...)	เหมือนคำสั่ง mesh(...) แต่จะมีการเขียน grid ตามแกน $x$ และ $y$ ขนานแกน $z$
waterfall(...)	เหมือนคำสั่ง meshz(...) แต่จะมีการเขียน grid ตามแกนเดียว
hidden on	สั่งให้ Matlab เขียน mesh โดยไม่ต้องเขียนเส้นที่ถูกบังไว้ด้านหลัง
hidden off	สั่งให้ Matlab เขียน mesh โดยเขียนเส้นที่ถูกบังไว้ด้านหลังด้วย
hidden	สลับระหว่าง hidden on และ off โดยถ้าไม่มีคำสั่งมาก่อน Matlab จะตั้งค่าไว้ที่ hidden on

### การเขียนผิวทึบ หรือรูปทรง

surf(X,Y,Z,C)	กำหนด parameter $X, Y, Z$ และ $C$ เป็น matrix ขนาด $m \times n$ โดยจะเป็นการ plot จุด $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ โดยใช้สี $c_{ij}$ และจะมีการเชื่อมจุดที่อยู่ติดกันด้วยระนาบ หากไม่กำหนด $C$ จะใช้ $C=Z$ หากว่า $x$ และ $y$ เป็น vector จะเป็นการเขียนกราฟโดยใช้ plot $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$
surfc(x,y,z,c)	จะเหมือน surf(...) เพียงแต่ Matlab จะเขียน contour ได้กราฟเพิ่มเติมเข้าไปด้วย

<code>surfc(x,y,z,ls)</code>	จะเหมือน <code>surf(...)</code> เพียงแต่จะสามารถกำหนดทิศทางของแสงด้วย vector $ls=[u \ h]$ เมื่อ $u$ คือมุมบนระนาบ $(x,y)$ ที่ทำกับแกน $x$ วัดทวนเข็มนาฬิกา ส่วน $h$ คือมุมที่ทำกับระนาบ $(x,y)$ ค่าทั้งสองวัดเป็นมุมในหน่วยองศา
<code>surfnorm(x,y,z)</code>	จะเหมือน <code>surf(...)</code> เพียงแต่จะเขียน normal vector ที่ผิวของกราฟด้วย ข้อควรระวังก็คือ $x, y$ และ $z$ ต้องเป็น matrix ขนาดเท่ากันเท่านั้น ไม่สามารถใช้ vector $x$ และ $y$ ได้เหมือน <code>surf(...)</code>
<code>[Nx,Ny,Nz]</code>	จะเหมือนกับ <code>surfnorm(x,y,z)</code> ซึ่งไม่มีการเขียนกราฟ แต่จะให้ค่า normal vector ที่จุด $(x_{ij},y_{ij},z)$ ซึ่งมีค่า $(nx_{ij},ny_{ij},nz_{ij})$ แทน

สำหรับกราฟ 3 มิติที่ได้จากคำสั่ง `surf` นั้น ยังจะคงมีลายเส้นของ mesh ปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นค่าที่ตั้งเบื้องต้นของ Matlab หากว่าเราไม่ต้องการกราฟในลักษณะนี้เราสามารถใส่คำสั่ง `shading` ได้ โดยมี 3 ลักษณะให้เลือกคือ

<code>shading faceted</code>	เป็นค่าที่ตั้งเบื้องต้นของ Matlab จะเป็นการกำหนดให้ระนาบเล็กๆ แต่ละอันที่เชื่อมต่อกันมีเพียงสีเดียว โดยจะเลือกค่าจากจุดที่มีค่าน้อยที่สุด และจะมีลายเส้นของ mesh แบ่งระนาบเล็กๆ เหล่านี้ด้วย
<code>shading flat</code>	เหมือน <code>faceted</code> แต่จะไม่มีลายเส้น mesh
<code>shading interp</code>	เป็นการ interpolated สีต่างๆ ให้กลมกลืน โดยจะไม่มีลายเส้นของ mesh ปรากฏอยู่และระนาบเล็กๆ แต่ละอันที่ประกอบเป็นผิวจะได้รับการ interpolate ให้มีสีที่ค่อยๆ เปลี่ยนไป

### การกำหนดมุมมอง

<code>view(az,el)</code>	กำหนดมุมมองที่มุม azimuth, $az$ และมุม elevation, $el$ ทั้งคู่มีหน่วยเป็นองศา มุม azimuth คือมุมบนระนาบ $(x,y)$ ที่กระทำกับแกน $x$ วัดทวนเข็มนาฬิกา ส่วนมุม elevation คือมุมที่วัดขึ้นจากระนาบ $(x,y)$ การกำหนดค่ามุม $az$ หรือ $el$ เป็นลบจะเป็นการวัดย้อนกลับจากทิศทางบวก
<code>view(x,y,z)</code>	กำหนดมุมมองเป็นมุมมองจากตำแหน่ง $x,y,z$ ในระบบแกน Cartesian แต่ Matlab จะไม่พิจารณาขนาดของ $x,y,z$ กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือเป็นการกำหนดมุมมองโดยอาศัยทิศทางของ vector นั้นเอง

view(2)	ตั้งค่ากลับไปมุมมองเบื้องต้นของ 2 มิติ ( az=0 , el=0 )
view(3)	ตั้งค่ากลับไปมุมมองเบื้องต้นของ 3 มิติ ( az=-37.5° , el=30 )
[a,b] = view	จะได้ค่า a เป็นค่า az และ b เป็นค่า el ที่กำลังใช้อยู่ขณะนั้น

### การเขียน Contour Line

contour	เขียนกราฟ contour ของ matrix z โดยถ้า z มีขนาด m x n, Matlab จะแบ่ง scale ตามแกน x เป็น 1 ถึง m และ y เป็น 1 ถึง n
contour(z,n)	เขียน contour line ของ matrix z เป็นจำนวน n ระดับ ถ้าไม่กำหนดค่า n Matlab จะใช้ค่าเบื้องต้นเป็น n = 10
contour(x,y,z)	เขียน contour line โดย x,y เป็นตัวกำหนดขนาด และ scale ของแกน x และ แกน y ตามลำดับ ถ้า x,y เป็น vector จะเขียน (x <sub>i</sub> ,y <sub>ij</sub> ,z <sub>ij</sub> )
contour(...,'str')	เขียน contour line โดยใช้ 'str' เป็น string ที่กำหนดสีและเส้น
C = contour(...)	จะเป็นการคำนวณ matrix c เพื่อใช้ในการเขียน label ของเส้น contour
contourf(...)	จะเติมสีลงบน contour plot
clabel(c)	จะเขียน label หรือค่าบอกขนาดของเส้นลงบนเส้น contour โดย C เป็นค่าที่คำนวณได้จากคำสั่ง C = contour(...) สำหรับตำแหน่ง Matlab จะเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเอง หากต้องการกำหนดเป็นอย่างอื่นสามารถอ่านข้อมูลเพิ่มเติมจาก help clabel
contour3(...)	เป็นการเขียน contour line ในระบบแกน 3 มิติ

### การควบคุมสีของกราฟ

colormap(map)	ตั้งค่า color map ไปที่ค่า map โดย map นี้อาจจะใช้ที่ Matlab กำหนดมาแล้ว หรือผู้ใช้จะสร้างขึ้นเองก็ได้ map นี้เป็น M-file ที่กำหนดค่า color map ที่จะใช้ในรูปภาพที่กำลังทำงานอยู่
colorbar	จะเขียนแถบสีในแนวตั้งข้างรูปที่กำลัง plot อยู่
colorbar('horiz')	จะเขียนแถบสีในแนวนอนใต้รูปที่กำลัง plot อยู่

สำหรับ color map ที่ Matlab กำหนดมาแล้วมีทั้งหมด 17 map ดังต่อไปนี้

gray	สี gray linear scale จากดำไปขาว
hsv	เป็น hsv-Saturation-Value color map เริ่มจากแดงไปน้ำเงินแล้ว กลับมาแดงอีก
hot	เป็นสีโทนร้อนผสมระหว่างดำ-แดง-เหลือง-และขาว
cool	เป็นสีโทนเย็นออกทางสีฟ้า-ม่วง
bone	เป็นโทนสีฟ้าแก่-สีเทา คล้ายกับการมองดูกระดูกบน X-ray
copper	เป็นสีในโทนสีของทองแดง
flag	เป็นสีแดง-ขาว-น้ำเงินแบบธงชาติคล้ายกันไป
pink	เป็นโทนสีทางชมพู
prism	เป็นสีแดง-ส้ม-เหลือง-เขียว-ฟ้า-ม่วง สลับกันไป
jet	เป็น hsv color map แต่ค่อยๆเปลี่ยนจากแดงเป็นน้ำเงิน
white	เป็นสีขาวทั้งหมด
Lines	เป็น Color Map ที่ใช้เขียนเส้นกราฟ
Colorcube	เป็นสี color-cube
Summer	โทนสีเขียวและเหลือง คล้ายฤดูร้อน
Autumn	โทนสีแดงและเหลืองเหมือนฤดูใบไม้ร่วง
Winter	โทนสีเขียวและน้ำเงิน จะดูทึมเหมือนฤดูหนาว
Spring	โทนสีม่วงและเหลืองเหมือนฤดูใบไม้ผลิ

## ภาคผนวก ฉ.

### ผลงานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

1. S. Deeon, S. Potivejkul and W. Khan-ngern, "Simulation of Battery Sizing for Continuous Load in PV System", IEE International Power Engineering Conference Singapore, 1999. pp. 453-457.
2. แสนศักดิ์ ดีอ่อน และศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. "การวิเคราะห์หาระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณด้วยโพลีโนเมียล". การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544 .หน้า 234-239.
3. แสนศักดิ์ ดีอ่อน และศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, "การวิเคราะห์รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข", การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2543.

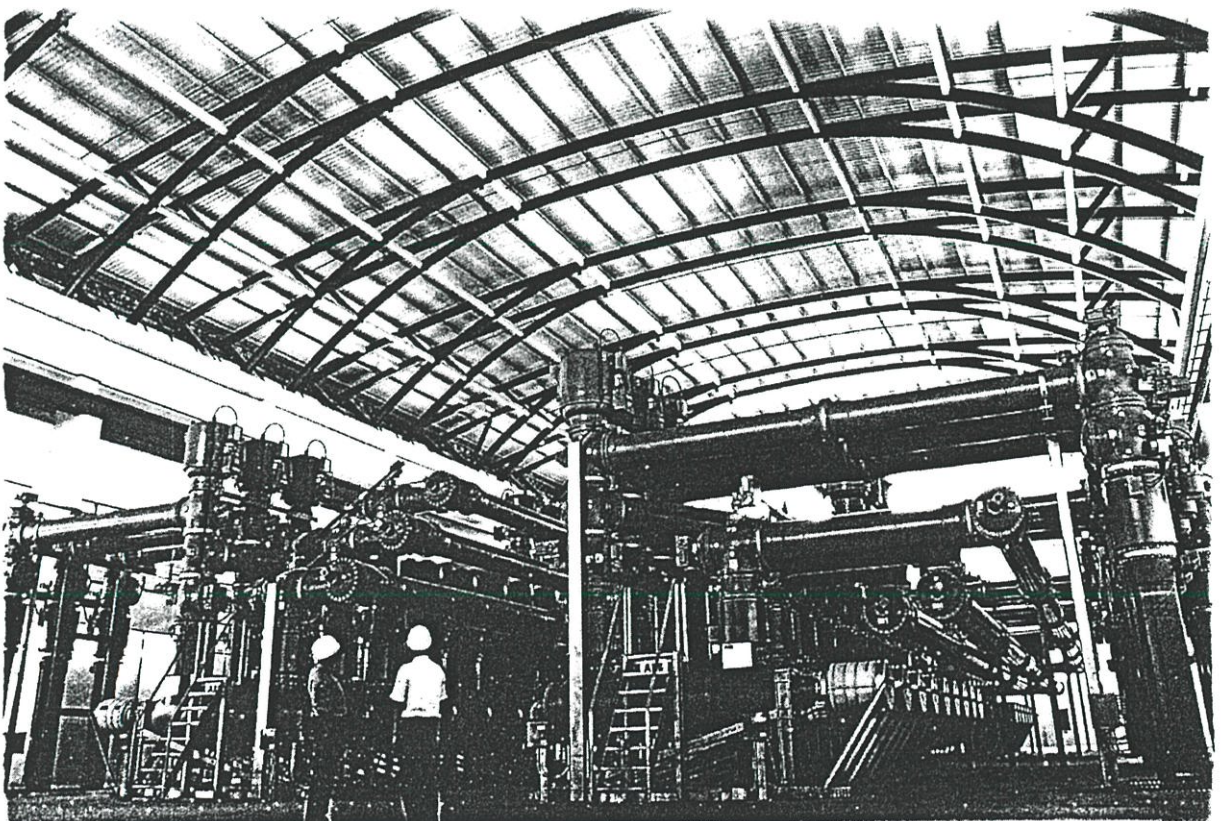
# IPEC '99

---

24 - 26 May 1999  
Mandarin Hotel Singapore

Proceedings of the  
**International Power  
Engineering Conference**

**Volume II**



# SIMULATION OF BATTERY SIZING FOR CONTINUOUS LOAD IN PV SYSTEM

S. Deeon

S. Potivejkul

W. Khan-ngern

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Chaokhunthaharn Ladkrabang, (KMITL)  
Thailand

## Abstract

This paper presents the method to determine the size of battery by using I-V curve of the utilized PV. In practical, the utilized PV modules are tested to observe I-V characteristic curve. These results are used as input data for battery sizing. Resulted battery sizing from this method can be satisfied the system requirement. It has been proved and tested using PV modules: 55 W. The load and operating time can be specified by users. This method is expected that increasing the performance of the system will be achieved. The stability leads to gain higher efficiency of energy conversion and also optimization. The simulated data can be used for determining charge rate and battery type selection. This can increase life cycle of battery, reduce economic loss and over estimated design.

## Keywords

Battery sizing, PV, energy conversion, I-V curve.

## 1 INTRODUCTION

In PV system utilization for continuous loading usually faces with unstability condition. In the system without energy storage or with unsuitable storage system design for both stand-alone system [1] and other application, cost is also one of major problem. The excess size is required for sufficient energy supply to load, this leading to lost and unsuitable for working with PV system [2]. The system as mentioned is widely used in many works. This research proposes the analytical method, design and suitable system sizing by dynamic approach instead of the conventional method. The operation simulation is studied to observe the system behavior. The system operation is analyzed to improve the efficiency and maximize the utilization.

This proposal expects the main advantages as the following:

- Battery sizing from practical data can reduce loss from over sizing design at continuous load requirement.
- The specified time of loading system and conditions are determined by users and led to variety property of battery required.
- Finally, Economic losses are reduced about 5%.

-The proposed method is able to use in practical in different conditions.

The method of battery sizing shows in Figure 1.

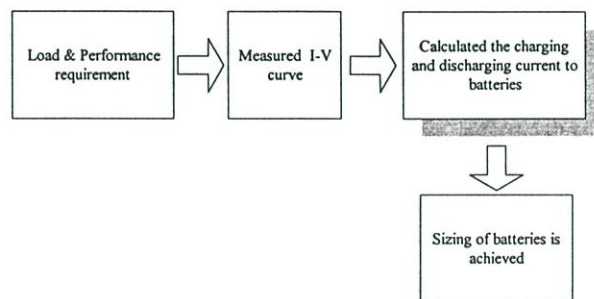
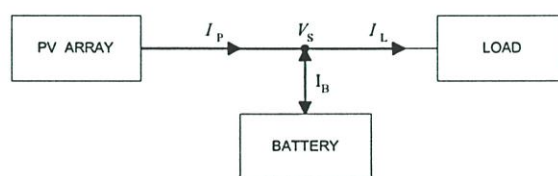


Figure 1: Block diagram for system

## 2 CURRENT - VOLTAGE CHARACTERISTIC ANALYSIS

In common PV systems such as a lighting kit, the three components-array, battery and load-are all connected [3], so that the voltage  $V_S$  is common to all of them. Kirchoff's current law is shown in Figure 2 can be expressed as in Equation (1).

$$I_P = I_B + I_L \quad (1)$$



$$I_P + I_B + I_L = 0$$

$I_B > 0$  Battery Charging

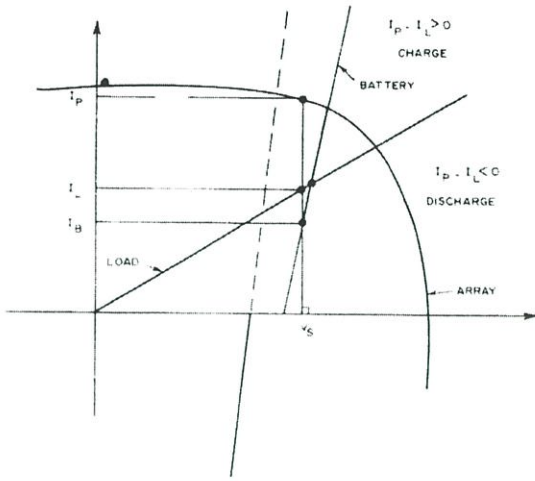
$I_B < 0$  Battery Discharging

Figure 2: Schematic diagram of a basic PV system

Where  $I_P$  is the PV generator current,  
 $I_B$  the battery current and  
 $I_L$  the load current.

According to the sign of  $I_P - I_L$  determined by the relative position of the PV module I-V characteristics with respect to the load characteristics and dependent on the solar irradiance available, the battery current  $I_B$  will be positive or charging condition as shown in

Figure 3 or negative called discharging condition as



shown in Figure 4.

Figure 3: I-V characteristics curves of a PV module and load during battery charging ( $I_B > 0$ )

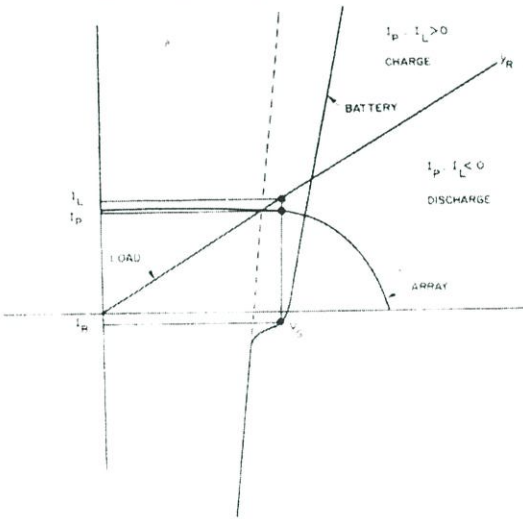


Figure 4: I-V characteristics curves of a PV module and load during battery discharging ( $I_B < 0$ )

Battery utilization can be improved that efficiency of the system depending on the component behavior between load and I-V curve [4] which is selected near the maximum power locus [5]. The location of characteristic of load on I-V curve depend on battery voltage. It is noted that the changing of battery voltage level depend on the condition of solar cells as maximum cell temperature and radiance.

### 3 DATA ANALYSIS

#### 3.1 Spectral Irradiance Distribution

##### SOLAR RADIATION

Daily total solar radiation on horizontal plane in Thailand has an annual average intensity of about 17 MJ/m<sup>2</sup> day or 4.72 kWh/m<sup>2</sup> day [6]. Diffuse

component of the solar radiation is quite high and the average about 50% of the total solar radiation.

Several models for predicting solar radiation in Thailand have been developed. One model is based upon the past data on sunshine durations covering a period of about 5 years. Another model was developed from 10 year records of total solar radiation in Thailand [7].

#### 3.2 Current-Voltage Characteristics in Natural Sunlight

Measurements in natural sunlight require stable irradiance conditions, with fluctuations of less than  $\pm 1\%$  are carefully done as following:

- Mounting the reference cell near to and coplanar with the module on a suitable adjustable platform and connect them to the test instrumentation,
- Orient the reference cell and module so that they are normal (within  $\pm 10^\circ$ ) to the direct solar beam,
- Shading the module from the sun and wind until its temperature is uniformly at the ambient air temperature,
- Remoting the shade and immediately record the I-V characteristics and the temperature of the module. At the same time, record the short-circuit current and temperature of the reference cell. If the reference cell temperature differs by more than 2 °C from the temperature at which was calibrated, a suitable adjustment must be made to the calibration value,
- Transposing the measured characteristic to the desired irradiance and temperature.

### 4 NUMERICAL ANALYSIS

#### 4.1 Interpolation and Approximation Function

The numerical approach are applied as the following:

##### - Polynomial Fits to Data

Lagrange Interpolation Polynomial : The  $n + 1$  coefficients,  $\vec{a}$ , of the  $n$ th degree polynomial that is an exact fit to  $n + 1$  data points,  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n + 1$ , are obtained by solving the equation

$$M \vec{a} = \vec{y} \tag{2}$$

Where  $M$  is the Vandermonde matrix constructed from the values contained in the vector  $\vec{x}$ . This polynomial is known as the Lagrange polynomial [8].

##### -Cubic Spline Interpolation

A set of cubic functions is fit to adjacent pairs of data points such that the combined fitting function,

passes through the data and “smoothly” connects each of the cubic subfunctions,  $f_i(x)$ , given by

$$f_i(x) = a(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad (3)$$

for  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$  and  $i = 1, \dots, n + 1$ .

areas of the parabolas that are fitted to sets of three consecutive points.

$$S_k = \frac{1}{3} \Delta x_k \left[ f_a + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f(a + i\Delta x_k) + 2 \sum_{i=2}^{n-2} f(a + i\Delta x_k) + f_b \right] \quad (4)$$

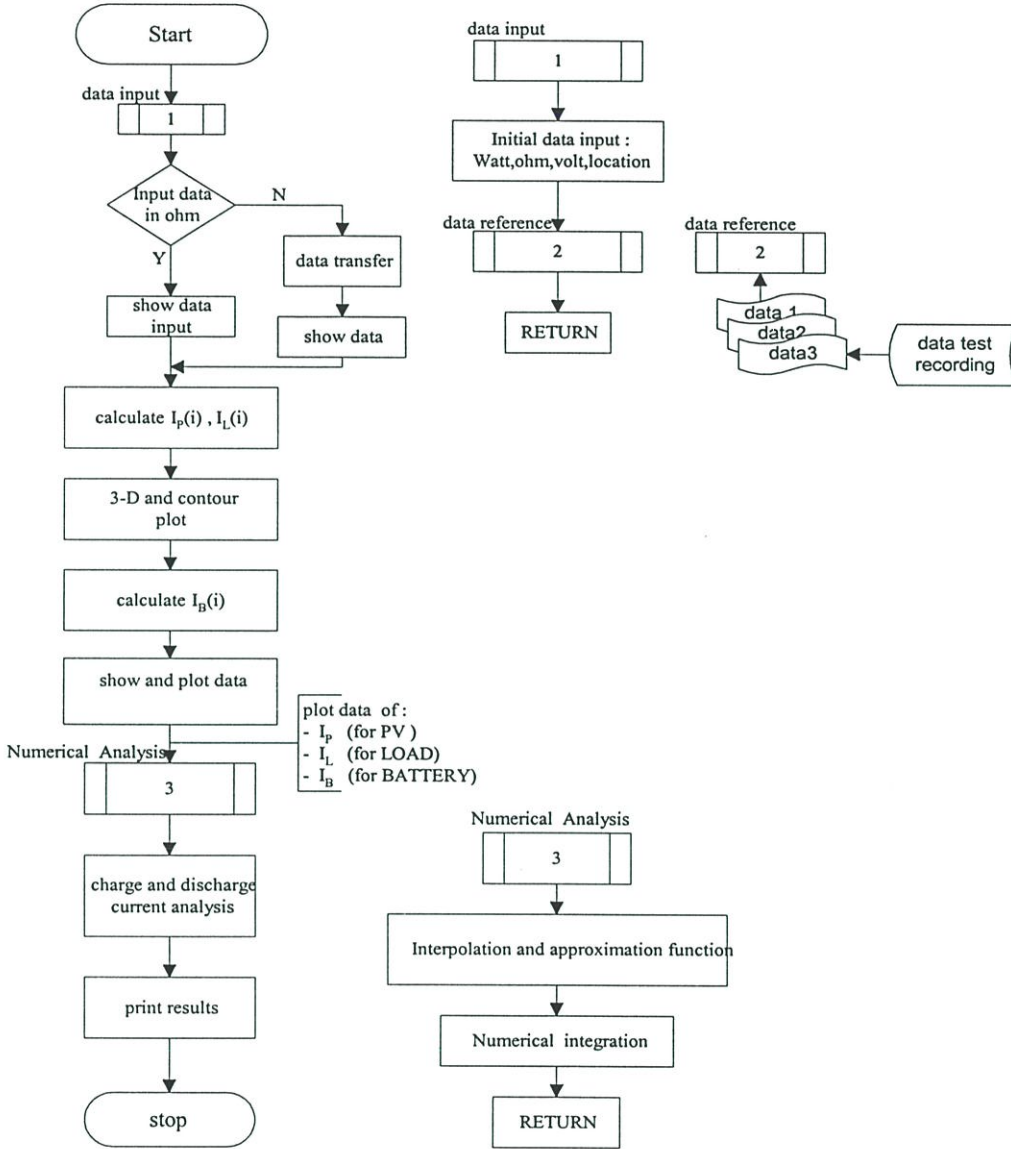


Figure 5: Computer simulation flow chart of system.

The coefficients of each cubic are determined by matching the data and requiring that the first and second derivatives of the adjoining cubics be equal.

## 4.2 Numerical Integration

This section shows the numerical integration using Simpson’s Rule [9].

Simpson’s Rule: The area under a function  $f(x)$  over the interval  $[a,b]$  is approximated as the sum of the

Where  $a$  is initial point and  $b$  is ending interval point.

## 5 SIMULATION PROGRAM AND ANALYSIS OF RESULTS

### 5.1 Computer Simulation Flow Chart and Program Analysis

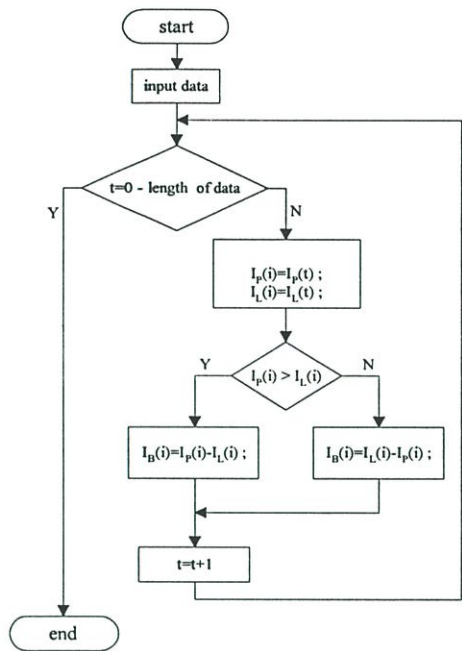


Figure 6: Computer simulation flow chart of battery current calculation

When the data is received, program will change and set the configuration in the proper form to calculate all current as shown in Equation (1). Program will evaluate PV current and load in each period and output results are displayed in form of 3-D mesh and contour plots as shown in Figure 7.

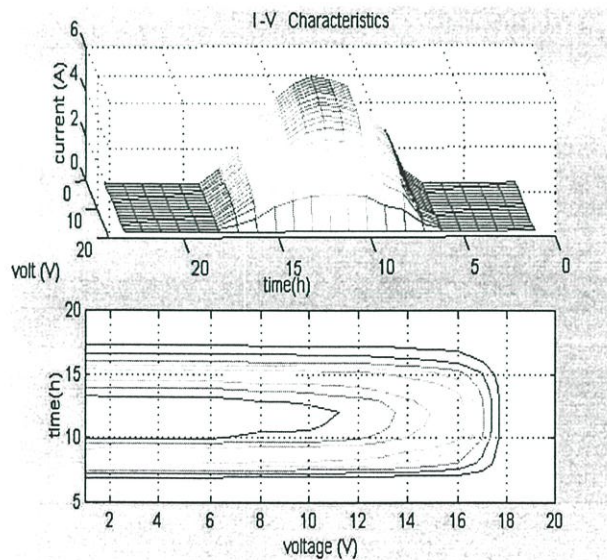
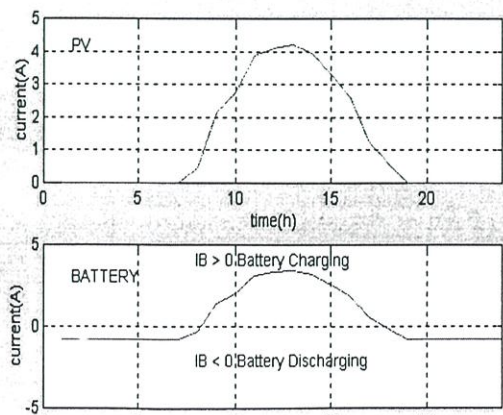


Figure 7: I-V characteristics of PV system in function



of time

Figure 8: battery charge and discharge

Simulated results show the operation of various sub-system included with battery charging and discharging.

When the data of charge and discharge are obtained, they are analyzed by means of numerical method Cubic Spline Interpolation and estimation by optimum function is performed as mentioned in section 4.1. These data are used to determine the size of energy storage sub-system lately. The estimation is divided into two parts, battery charged and discharged periods. Optimum polynomial function is used. The precision of results is depended on the number of data and the sampling rate.

The area under the graph, computed by means of numerical integration, performed as mentioned in section 4.2. Battery charging, discharging current and battery sizing are achieved.

### 5.2 Results of Sizing

Measured and Simulated results have been compared in Table 3

Table 1 : Simulated Results		
Ah match		
Discharge current of battery	20.16	Ah
Charge current of battery	40.59	Ah
Charge current spare	20.43	Ah
Current spare (in percent)	101.34	%

#### Practical design:

Table 2 : Design Data and Criteria		
Design Data		
Location:		
KMITL	Lat. 13°60' N	Long. 101° ' E
Design month	January	
PV module	55 Wp	

#### Mismatch condition:

If the result be not optimum, the display will be shown that the size is unsuitable and the required condition will be indicated. The optimize size is finally recalculated.

Table 3 : Compared Results		
	Measured result for normal design	Measured result For proposed design
LOAD	18 W (12 V)	18 W (12 V)
Ah	23.00	20.16

Amp-hour different is 2.84 Ah  
Hence, Percent different is 12.34 %

Finally, the advantage of 12.34 % or 2.84 Ah of battery sizing are achieved.

## 6 CONCLUSIONS

PV system design has been done by balancing energy among sub-system. The analytical method as proposed is suitable and sufficient for primary system estimation. Basic program using MATLAB able to apply for this application. The advantage of battery sizing about 12% shows some achievements of the proposed technique. The measured results confirm an assessment of the battery sizing. The future work will be concentrated on automatic sizing and energy management using micro controller for faster time response.

### APPENDIX A : The Array data

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS : BPTS 1255

Power (Watts)	
- Nominal Peak Power Point	55
Voltage (volts)	
- Peak Power Point	17
- Nominal	12
- Open Circuit	21.2
Current (Amps.)	
- Peak Power Point	3.23
- Short Circuit	3.54

### ACKNOWLEDGEMENTS

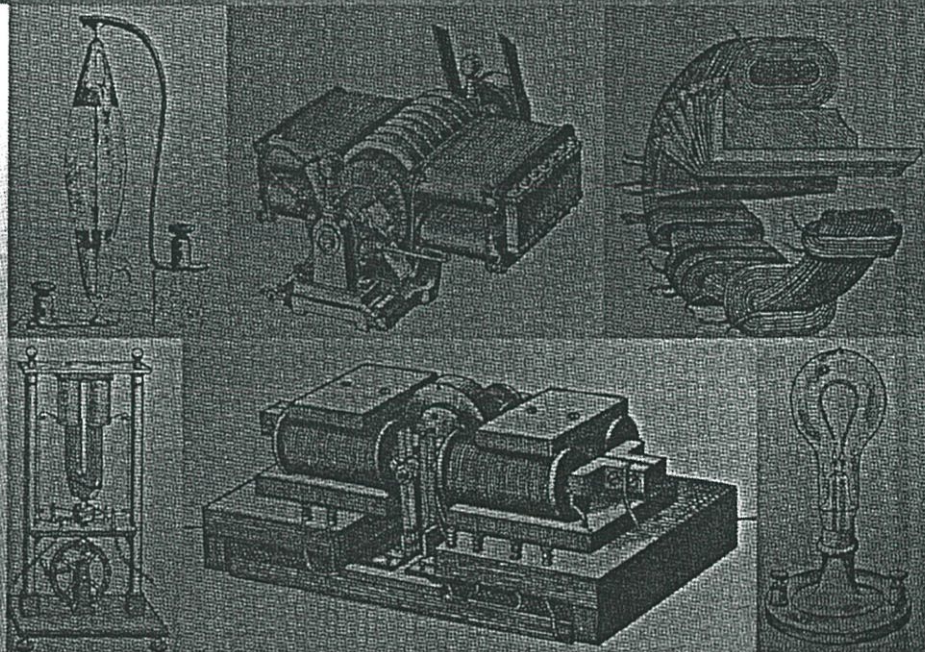
The authors would like to express their sincere thanks to Regulatory Division of National Energy Administration for statistical data of solar energy radiation in Thailand.

### REFERENCES

- [1] M.A. Egidio and E. Lorenzo. *The sizing of stand-alone PV systems*. A review and a proposed new method. *Solar Energy Materials and Solar cell* 26, pp. 51-69, 1992.
- [2] Chaya Jivacate. *PV projects connected to grid system in Thailand*. Proc. of Int. Conf. On Energy and Environment. Natural Resources Div. ESCAP. pp. 188-198, 1990.
- [3] F.Lasnier and T. Gan Ang. *Photovoltaic Engineering Handbook*. Adam Hilger, Bristol and New York, 1990.
- [4] K.Y. Khouzam. *Optimum load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems Application to Resistive Loads*. IEEE Transactions on Energy Conversion. EC-5, No.2, pp.265-271, 1990.
- [5] M. Saied and M. Jaboori. *Optimal solar Parameters for Maximum Annual Output Mechanical Energy*. IEEE Transactions on Energy Conversion. EC-4, No. 3, pp. 459-465, 1989.
- [6] R. H. B. Exell and K. Saricali. *The Availability of Solar Energy in Thailand*. Research Report No. 63. AIT, Bangkok, 1976.
- [7] P. Wibulswas and K. Kirtikara. *Research and Development on Solar Energy in Thailand*. UNIDO Consultative Meeting on Solar Energy Research & Applications. pp. 356-362, 1992.
- [8] I.D. Hoffman. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill New York, 1993
- [9] S.C. Chapra and R.P. Canale. *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill New York, 1990.

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

## 24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-24)



### Volume 1

#### สาขาบทความ

- ❖ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ❖ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ❖ ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ❖ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

# การวิเคราะห์หาระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้การประมาณด้วยโพลิโนเมียล

## Analysis of Optimum PV System by Using Polynomial Approximation

แสนศักดิ์ ตีอ่อน ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร/โทรสาร: (02)326-9902 ต่อ 3518 E-mail: sdeeon@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยอัลกอริทึมที่เหมาะสม การวิเคราะห์ประกอบด้วย การทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันและใช้อัลกอริทึมเชิงตัวเลขคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้าจากข้อมูลที่ทำกรทดสอบได้ ซึ่งทำให้ได้ค่าการจ่ายกำลังจากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามสภาพความเป็นจริง และเป็นประโยชน์ในการพิจารณาเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่คู่ร่วมกับโหลดที่ต้องการ รวมไปถึงการนำไปพัฒนาใช้งานกับโปรแกรมช่วยออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีขนาดเหมาะสมต่อไป

### Abstract

This paper presents the analysis of PV system using numerical calculation with optimum algorithms. The analysis procedures consist of I-V curve testing and numerical algorithms which can be used for calculating the power transfer amount. The results are useful for a realistic power transfer capability from PV system, and the optimum battery size can be selected for designated loads. Finally, the numerical algorithm can be adapted to use with the PV sizing program.

**Keywords:** PV, solar energy, I-V curve, numerical method.

### 1. บทนำ

ในการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการทำจุดพลังงานระหว่างระบบย่อยทั้งหลายแล้วรวมกันเป็นระบบ คามที่มีการใช้งานกันอยู่โดยทั่วไป การวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวจัดว่าเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินระบบในขั้นต้น และสามารถนำไปโปรแกรมคอมพิวเตอร์อย่างง่าย มาช่วยทำงานได้

อย่างไรก็ตามการหานั้นมีข้อจำกัดอยู่ เพราะใช้สมมติฐานที่ว่าตัวเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่พอเหมาะกับความถี่ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละวันและเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ความเวลาที่กำหนด[1] ถ้าหากว่าต้องการวิเคราะห์ระบบซึ่งมีความจุการสะสม

พลังงานต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเก็บสะสมในหนึ่งวัน หรือถ้าต้องการทราบว่ามีอะไรเกิดขึ้นบ้างภายในหนึ่งวันในแง่ของการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างระบบย่อยต่างๆ สิ่งเหล่านี้จะทำให้วิธีการทำจุดพลังงานโดยตรงจะใช้ไม่ได้ผล

ในโครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการพัฒนารูปแบบและนำเสนอเนื้อหาวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมกันของเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ที่ภาระการใช้งานของโหลดตามต้องการ ซึ่งเป็นการพัฒนาในส่วนของการพิจารณาด้านพลังงาน และการออกแบบระบบเพื่อให้การใช้งานของระบบมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

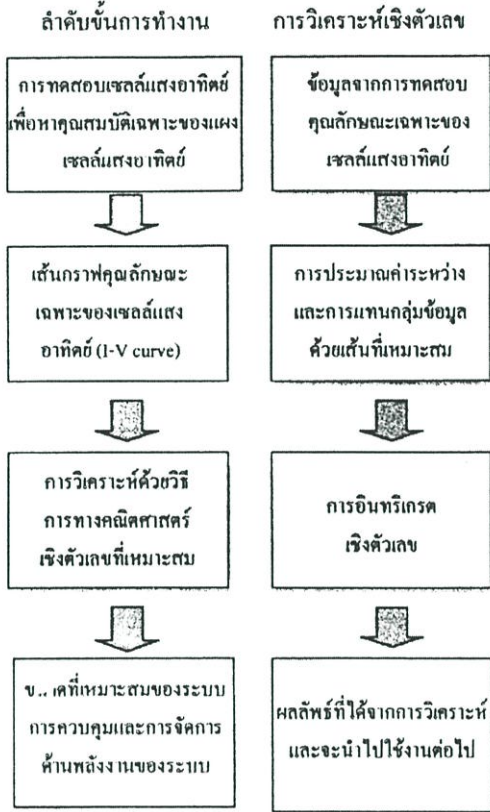
#### 2.1 การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงาน

โดยการอาศัยวิธีการทำจุดพลังงานทางไฟฟ้าและใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ คือการวิเคราะห์เชิงตัวเลข(Numerical Analysis)มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงการจ่ายพลังงาน การควบคุมและจัดการพลังงาน และใช้พิจารณาขนาดที่เหมาะสมของระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์[2] อีกทั้งจะนำมาซึ่งวิธีการวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้านการควบคุมและจัดการพลังงาน ซึ่งแตกต่างจากวิธีการจุดพลังงานที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป และให้ผลที่ใกล้เคียงกับการจ่ายพลังงานตามความเป็นจริงมากกว่าวิธีการแบบเดิมที่ใช้อยู่ โดยเป็นวิธีการหาค่าที่มีค่าต่อเนื่องที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีค่าไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี Least Squares Regression ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมกับข้อมูล โดยเส้นที่เหมาะสมกับข้อมูลไม่จำเป็นต้องผ่านจุดข้อมูล(data points) ที่ได้มานั้นก็ได้ แต่จะแทนข้อมูลโดยรวม และวิธีการที่จะได้เส้นที่เหมาะสมก็คือทำให้ความแตกต่างระหว่างจุดข้อมูลกับเส้นที่เหมาะสมมีน้อยที่สุด[3]

#### 2.2 การวิเคราะห์และการประมาณค่าการจ่ายพลังงานของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

แม่นยำและใกล้เคียงกับสภาพการจ่ายพลังงานจริงของระบบดังกล่าวมากกว่าการคำนวณด้วยวิธีการคูณพลังงาน[2] โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานและการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับขั้นตอนการทดสอบและอัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

### 2.3 การประมาณค่าระหว่าง และการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม

ในที่นี้จะใช้วิธี Polynomial regression ในการพิจารณาถึงอันดับที่เหมาะสม และหาฟังก์ชันพหุนามอันดับ m (m<sup>th</sup> order polynomial) ของเส้นที่เหมาะสมดังกล่าว โดยมีวิธีการเป็นดังนี้ สมการ m<sup>th</sup> degree polynomial

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e \quad (1)$$

ซึ่งมีรูปแบบทั่วไปเป็น

$$y = a_0z_0 + a_1z_1 + a_2z_2 + \dots + a_mz_m + e \quad (2)$$

เมื่อ  $z_0, z_1, \dots, z_m$  คือฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณ และ  $e$  คือ ค่าความผิดพลาด

ทำการจัดรูปของสมการที่(2) ใหม่เป็น

$$y(x) = a_0z_0(x) + a_1z_1(x) + a_2z_2(x) + \dots + a_mz_m(x) + e$$

$$= \sum_{j=0}^m a_j z_j(x) + e \quad (3)$$

- เกณฑ์เพื่อหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหนึ่งในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุดคือ ทำให้ผลรวมของค่าผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด(4) (minimize the sum of the squares of the residuals,  $S_r$ ) และในบทความนี้ได้นำเสนอขั้นตอนดังกล่าวมาใช้ประกอบการพิจารณาด้วย

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_j(x_i) \right]^2 \quad (4)$$

ให้  $z_{ji} = z_j(x_i)$  จะได้

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji} \right]^2 \quad (5)$$

หาค่า minimize

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j} = 0 \quad (j=0,1,2,\dots,m)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[ y_i - \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} \right] z_{ji} \right\} = 0 \quad (6)$$

ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m a_k z_{ki} z_{ji} = \sum_{i=1}^n y_i z_{ji} \quad (j=0,1,2,\dots,m) \quad (7)$$

ซึ่งเป็น "Normal Equation" สำหรับ regression coefficients  $a_0 \dots a_m$  โดยที่ normal equations คือ  $(z^T z)A = z^T y$

และสามารถเขียน normal equations ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad z = \begin{bmatrix} z_{01} & \dots & z_{j1} & \dots & z_{m1} \\ z_{02} & & z_{j2} & & z_{m2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{0n} & & z_{jn} & & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Standard error of the estimate ( $S_{y/x}$ )

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad (9)$$

เมื่อ  $m$  = order ของ polynomial

- Sum of squares of residuals about the mean  $\bar{y}$  ( $S_t$ )

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

- Coefficient of determination ( $r^2$ )

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (11)$$

- Correlation coefficient ( $r$ )

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (12)$$

โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาตัดสินใจเลือกค่าสำหรับเส้นที่เหมาะสมที่สุดเป็น  $S_r = 0$ ,  $r^2 = 1$  และ  $r = 1$  ซึ่งถ้าเป็นไปตามกรณีดังกล่าวจะแสดงว่าเส้นที่มีค่าต่อเนื่องที่ได้สามารถแทนข้อมูลได้ 100%

### 2.4 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข

ในที่นี้อาศัยวิธีการของซิมป์สัน (Simpson's method) ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลข[4] เพื่อใช้ในการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่ต้องการอินทิเกรต โดยวิธีของซิมป์สัน จะทำการประมาณเส้นโค้งที่ต้องการทราบค่าด้วยส่วนของพาราโบลา (parabola) เล็กๆต่อกัน

ซึ่งจะทำการแบ่งช่วงที่ต้องการอินทิเกรต [a, b] จาก a ถึง b เป็นระยะเท่าๆ กันด้วยจำนวนคู่ โดยมี n เป็นช่วงที่ทำการแบ่ง ซึ่งสามารถเขียนสมการให้เป็นรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$S_k = \frac{1}{3} \Delta x_k \left[ f_a + 4 \sum_{i=1}^{n-1} f_{(a+\Delta x_k)} + 2 \sum_{i=2}^{n-2} f_{(a+\Delta x_k)} + f_b \right] \quad (13)$$

โดยที่  $S_k$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันที่ต้องการทราบค่า

$k$  คือ จำนวนครั้งของการแบ่งช่วง

และ  $\Delta x_k = \frac{(b - a)}{2^k}$

### 3. การทดสอบและประยุกต์ใช้งาน

#### 3.1 การทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำอัลกอริทึม และวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อดูความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่างๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

##### 3.1.1 การทดสอบอัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

- การทดสอบการประมาณค่าด้วยเส้นที่เหมาะสม

ใช้การประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆ (polynomial function) และทำการคำนวณหาผลลัพท์ของการประมาณค่า ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยมีสมการจริงเป็น  $f(x) = x \cdot \sin(x)$  โดยใช้หลักที่ว่าเส้นกราฟที่ได้จากการประมาณค่าอาจไม่ผ่านจุดข้อมูลทุกจุด แต่จะต้องเป็นเส้นกราฟที่ทำให้เกิดความผิดพลาดจากกลุ่มของข้อมูลที่ทำการทดสอบน้อยที่สุด จึงจะถือได้ว่ากราฟเส้นนั้นมีความเหมาะสมสามารถใช้แทนกลุ่มของข้อมูลนั้นได้ และสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลเหล่านั้น สำหรับการวิเคราะห์ระบบในประเด็นอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่ากับฟังก์ชันตัวอย่างที่ทราบผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว

อันดับของฟังก์ชันพหุนามที่ใช้ในการประมาณค่า	Standard error of the estimate ( $S_{y/x}$ )	Coefficient of determination ( $r^2$ )	Correlation coefficient ( $r$ )
อันดับที่ 1 (สมการเส้นตรง)	5.7549	0.4331	0.6581
อันดับที่ 2 (สมการพาราโบลา)	2.7158	0.5842	0.7643
อันดับที่ m*	2.8284	0.9974	0.9987

จากตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณข้างต้นเมื่อทำการเพิ่มอันดับ(order)ของฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function)ที่ใช้ในการประมาณค่าให้มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณลดลง นั่นคือจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตามความเป็นจริงมากที่สุด

3.2 การทดสอบอัลกอริทึมกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

ทำการทดสอบใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการที่นำมาเสนอกับวิธีการทำคุณลักษณะแบบปกติ[5] หลังจากที่ได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์แล้ว โดยมีข้อมูลและรายละเอียดของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

ตำแหน่งการติดตั้งทดสอบ : Lat. 13.0° N, Long. 100° E

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ : ขนาดพื้นที่ 55 W<sub>p</sub>

ภาระที่ใช้ในการทดสอบ : เป็นโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้

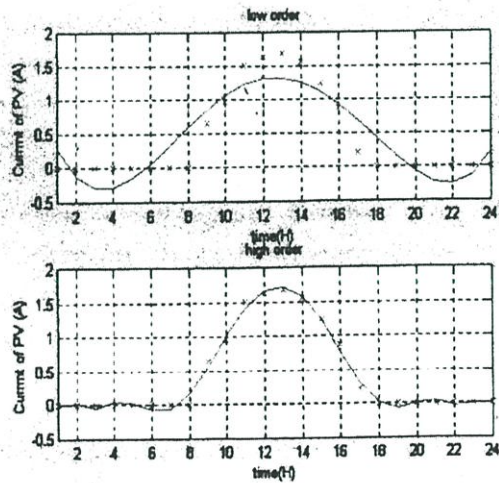
ทำการทดสอบเพื่อหารูปแบบของฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function)ที่ใช้อันดับต่างๆกัน กับการประมาณค่าด้วย ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสามารถแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่า

รูปแบบฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่า	ลักษณะการประมาณ	ผลลัพธ์จากการคำนวณ coefficient of determination ( $r^2$ )
ฟังก์ชันพหุนาม อันดับที่ m ( $m^{\text{th}}$ - order polynomial)	อันดับที่ 1	0.0102
	อันดับที่ 2	0.8969
	อันดับที่ 3	0.9835
	อันดับที่ 4	0.9893
	อันดับที่ 5	0.9921
	อันดับที่ 6	0.9922
	อันดับที่ 7	0.9970
	อันดับที่ 8	0.9974
	อันดับที่ 9	0.9985
	อันดับที่ 10	0.9989
ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential)	$P_c(x) = ae^{bx}$	0.8971

เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณการประมาณค่าที่หาอันดับที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับต่างๆจะให้ผลลัพธ์ของค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) ที่แตกต่างกัน และถ้าเลือกใช้อันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และได้เส้นกราฟที่เหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป สำหรับผลการคำนวณด้วยฟังก์ชันพหุนามจะให้ค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) สูงสุดในอันดับที่ 10 โดยได้ค่า  $r^2$  เป็น 0.9989 ในขณะที่การประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) จะให้ค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) เป็น 0.8971 ซึ่งถือว่ายังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้วิเคราะห์ระบบดังกล่าวเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนาม

จากผลการทดสอบและการเปรียบเทียบผลที่ได้โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function) กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล(exponential function) ตามตารางที่ 2 ข้างต้นจะพบว่าฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คือฟังก์ชันพหุนามเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าต่ำกว่าการประมาณด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนการเปรียบเทียบความแตกต่างของอันดับ(order)ของฟังก์ชันพหุนาม(polynomial function)ที่ใช้ในการประมาณค่าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในการทดสอบคิดค้นจริง[6] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบอันดับของฟังก์ชันพหุนามที่ใช้ในการวิเคราะห์

การใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับที่เหมาะสมจากอัลกอริทึมที่ได้ นำเสนอ จะทำให้ได้ค่า Coefficient of determination เป็น 0.9989 และมีค่า Correlation coefficient เป็น 0.9994 นั่นคือเส้นกราฟของฟังก์ชันดังกล่าวสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลจากการทดสอบได้เป็น 99.9 %

4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

เมื่อทำการทดสอบอัลกอริทึมและวิธีการที่นำเสนอ ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์และทดลองใช้งานในการคำนวณการจ่ายพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง ทำให้ทราบถึงรูปแบบของฟังก์ชันที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าและการพิจารณาถึงเงื่อนไขประกอบต่างๆ ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ที่เหมาะสม

ในลำดับต่อไปจะนำวิธีการใช้งานข้างต้นมาประกอบการพิจารณาออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพื่อหาปริมาณการเก็บพลังงานของตัวสะสมพลังงาน(แบตเตอรี่)ของระบบดังกล่าวเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยวิธีการคูณพลังงานแบบปกติ โดยมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์เป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 1 ข้างต้น เริ่มด้วยการทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแสดงผลการทดสอบเป็นรูปโครงร่าง 3 มิติตามช่วงเวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3 (a) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบข้างต้นมาวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้เทคนิคการประมาณข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่เหมาะสมตามวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ตามรูปที่ 3 (b) และนำผลที่ได้จากการประมาณค่าไปทำการอินทิเกรตเพื่อหาความสามารถในการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ตามสภาวะการใช้งานจริง เมื่อทราบปริมาณการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้สามารถหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งสามารถจำลองการทำงานของระบบโดยรวมเพื่อแสดงการวิเคราะห์ในแง่ของการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ในระบบเพื่อประโยชน์ในการเลือกและพิจารณาหาระบบให้อุปกรณ์เหมาะสมต่อไป

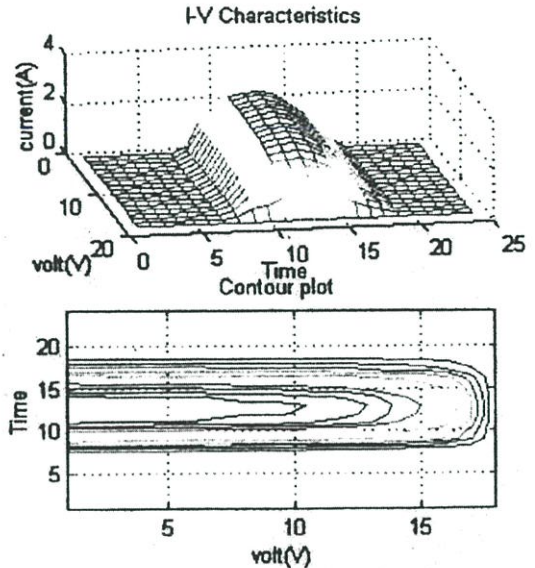
4.1 ออกแบบใช้งาน

ระบบที่ทดสอบใช้งานเป็นการจำลองระบบป้องกันการผุกร่อน(corrosion protection)ของท่อโลหะโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบ โดยมีรายละเอียดของระบบเป็นดังนี้

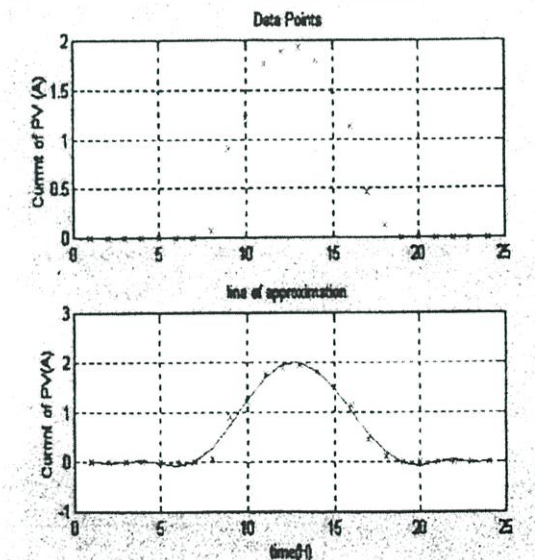
- ท่อโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว
- ท่อมีความยาว 1 เมตร
- ฟังก์ชันจากพื้นดิน 0.5 เมตร

โดยเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดันใช้งานของโหลดเป็น 12 V และต้องการกระแส 43 mA ระบบจะมีการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อมีให้ท่อโลหะที่ต้องการป้องกันการเกิดการผุกร่อนขึ้น ทำการออกแบบระบบดังกล่าวตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอข้างต้น เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวขนาด 13.59 W โดยมีหลักเป็นดังนี้

- แรงดันไฟฟ้าปกติ 16.45 V
- แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดดวงจร 21.46 V
- กระแสไฟฟ้าปกติ 0.83 A
- กระแสไฟฟ้าเมื่อปิดดวงจร 0.92 A



(a) ผลการทดสอบ I-V curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



(b) การประมาณข้อมูลที่ทำการทดสอบด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล

รูปที่ 3 กราฟวิเคราะห์และแสดงผลด้วยโปรแกรม

ซึ่งมีผลการคำนวณเป็นดังนี้

- การคำนวณด้วยวิธีคูณพลังงาน จะได้ปริมาณความจุกระแส 4.15 Ah.
- การคำนวณด้วยวิธีการที่นำเสนอจะได้ปริมาณความจุกระแส 3.05 Ah.
- ปริมาณความจุกระแสจากการวัดจริง 2.84 Ah

ผลลัพธ์ที่ได้การคำนวณด้วยวิธีการที่นำเสนอจะมีปริมาณที่แตกต่างจากวิธีการลดพลังงานโดยประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์และแตกต่างจากสถานะการใช้งานจริง 7.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดความจุของแบตเตอรี่จะทำให้ได้ขนาดเหมาะสมและเพียงพอที่จะเก็บสะสมพลังงานที่เข้ามาจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จากนั้นทำการติดตั้งใช้งานเพื่อทดสอบผลการออกแบบในเบื้องต้นและทำการตรวจสอบวัดผลการป้องกันการสุกของท่อโลหะที่ต้องมีการป้องกันตามมาตรฐาน NACE Standard RP 0169-92 ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งใช้งาน ซึ่งจากการวัดผลการสุกของท่อหลังจากทำการติดตั้งใช้งานเป็นเวลา 7 วันปรากฏว่าระบบนั้นสามารถป้องกันการสุกของท่อได้ตามที่มาตรฐาน NACE Standard RP 0169-92 กำหนดไว้ โดยระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการออกแบบสามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการขาดหายของพลังงานแต่อย่างใด

จากการวิเคราะห์พร้อมทั้งทดสอบการใช้งานเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องเหมาะสมของวิธีการและอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะพบว่าให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและได้รูปแบบของฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาวิเคราะห์หาค่าการจ่ายพลังงานและช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยสามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานกับการออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลของการคำนวณที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงของระบบมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบดังกล่าวอีกด้วย

## 5. สรุป

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบวิธีการวิเคราะห์และการพิจารณาพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทางไฟฟ้า และอาศัยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและหาผลเฉลยแทนการออกแบบระบบในลักษณะเดิมที่มีการใช้งานกันอยู่ เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้จากตัวอย่างของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการทดสอบใช้งานจริง ผลลัพธ์ที่ได้มีความผิดพลาดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์จากค่าที่ทำการวัดจริง เนื่องจากแผนกราฟที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าของข้อมูลจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ( $r^2 = 0.9989$ ) ซึ่งทำให้ผลเฉลยที่ออกมาที่มีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงมากที่สุด และยังสามารถนำวิธีการที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานและพัฒนาในการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ในสถานะการใช้งานต่างๆ ที่มีสมรรถนะสูงขึ้นไป นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการทำงานเพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยรวม เพื่อให้การใช้งานของระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ข้อมูลพลังงานแห่งประเทศไทย สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ และกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและเอกสารอ้างอิง อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Lasnier and T. Gan Ang "Photovoltaic Engineering Handbook" Adam Hilger, Bristol and New York, 1990.
- [2] S. Deeon, S. Potevejku and W. Khan-ngem "Simulation of Battery Sizing for Continuous Load in PV System" IEE International Power Engineering Conference, Vol. 2, pp.453-457, 1999.
- [3] J. Penny and G. Lindfield "Numerical Methods Using MATLAB" Ellis Horwood, pp.252-258, 1995.
- [4] W. Cheney and D. Kincaid "Numerical Mathematics and Computing" 3<sup>rd</sup> edition Brooks/Cole Publishing Company, pp.142-148, 1994.
- [5] สุทธ อัครมาส และ พิชญ์ ตรีวิจิตรเกษม "Photovoltaic Solar Systems" เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการโดย IEEE (THAILAND SECTION), หน้า11-22, 2526.
- [6] แสนศักดิ์ คีอ่อน และ ศิริวิวัฒน์ โพธิ์เวชกุล "การวิเคราะห์รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข" การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 38 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543

## ประวัติผู้เขียนบทความ



นายแสนศักดิ์ คีอ่อน จบการศึกษา ว.ศ.ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปริญญาโท 2538 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำวิจัยด้านเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์



นายศิริวิวัฒน์ โพธิ์เวชกุล จบการศึกษา ว.ศ.ไฟฟ้า และ ว.ศ.ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และคุณภาพของกำลังไฟฟ้า



ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การวิเคราะห์รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม  
โดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

โดย

แสนศักดิ์ ดีอ่อน และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการ  
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิศวกรรมศาสตร์  
ระหว่างวันที่ 1-4 กุมภาพันธ์ 2543

๑๗๖ — —

(ศาสตราจารย์ ต่อกุล กาญจนาลัย)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 38

# การวิเคราะห์รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิค ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

## Optimum PV panels setting analysis using numerical method technique

แสนศักดิ์ ดีอ่อน และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

Sansak Deeon and Siriwat Potivejkul

### บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมมาช่วยในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ รวมไปถึงการนำไปพัฒนาใช้งานกับโปรแกรมช่วยออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ให้มีขนาดเหมาะสม พร้อมทั้งนำวิธีการที่ได้นำเสนอ มาประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในสภาพการใช้งานจริงและ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านการจ่ายพลังงานของระบบดังกล่าวเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบและมุมในการติดตั้งแผงให้ได้รับการอาบรังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุดอีกด้วย ทำให้การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง ได้พบว่าการติดตั้งในลักษณะที่มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอสซิมูท จะให้ปริมาณการจ่ายกระแสได้สูงที่สุด และสูงกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่นมากกว่า 10%

### ABSTRACT

This research mentions numerical method technique and optimum algorithm is used for PV system analysis. Including with the applied using with design aid program for optimum PV system. The proposed method is applied for practical PV system design and it is used for system energy analysis for pattern and angle setting determination to maximum the radiance also. In order to manage the energy effectively and most useful. From the results it is indicated that the tracking system (azimuth system) can maximize current dispatching compared with the other, it is 10% higher.

### บทนำ

ในการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การทำดุลพลังงานระหว่างระบบย่อยทั้งหลาย แล้วรวมกันเป็นระบบที่ใช้งานกันอยู่ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวจัดว่าเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินระบบในขั้นต้น และสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ง่ายๆ มาช่วยทำงานได้ อย่างไรก็ตามการทำเช่นนั้นก็มีข้อจำกัดอยู่ เพราะที่ใช้สมมุติฐานที่ว่าตัวเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่พอเหมาะกับค่าเฉลี่ยของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละวัน และเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ตามเวลาที่กำหนด (ยุกธและพิฑูรย์, 2526) ถ้าหากว่าเราต้องการวิเคราะห์ระบบซึ่งมีความจุการสะสมพลังงานต่ำกว่าที่จำเป็นสำหรับการเก็บสะสมในหนึ่งวัน หรือถ้าหากต้องการทราบว่ามิอะไรเกิดขึ้นบ้างภายในหนึ่งวันในแง่ของการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างระบบย่อยต่างๆ สิ่งเหล่านี้จะทำให้วิธีการทำดุลพลังงานจะใช้ไม่ได้ผล จึงนำมาซึ่งโครงการวิจัยนี้

ในโครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการพัฒนาารูปแบบ และนำเสนอเนื้อหาวิธีการวิเคราะห์ในอีกรูปแบบหนึ่งตามรายงานการวิจัย(แสนศักดิ์และคณะ, 1999) ที่จะเป็นการพัฒนาในส่วนของการพิจารณาด้านพลังงาน และการออกแบบระบบเพื่อให้การใช้งานของระบบมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด อันเนื่องมาจากในการใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีการออกแบบระบบพลังงานสำรองที่ไม่เหมาะสม ก็มักจะมีปัญหาในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์และสมรรถนะของระบบเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งขนาดของระบบจะต้องใหญ่จนเกินความจำเป็นเพื่อที่จะให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานได้(Egido และLorenzo, 1992)

### การวิเคราะห์และการประมาณค่าการจ่ายพลังงานของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ การจ่ายพลังงานของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทำงานและการวิเคราะห์เป็นดังนี้

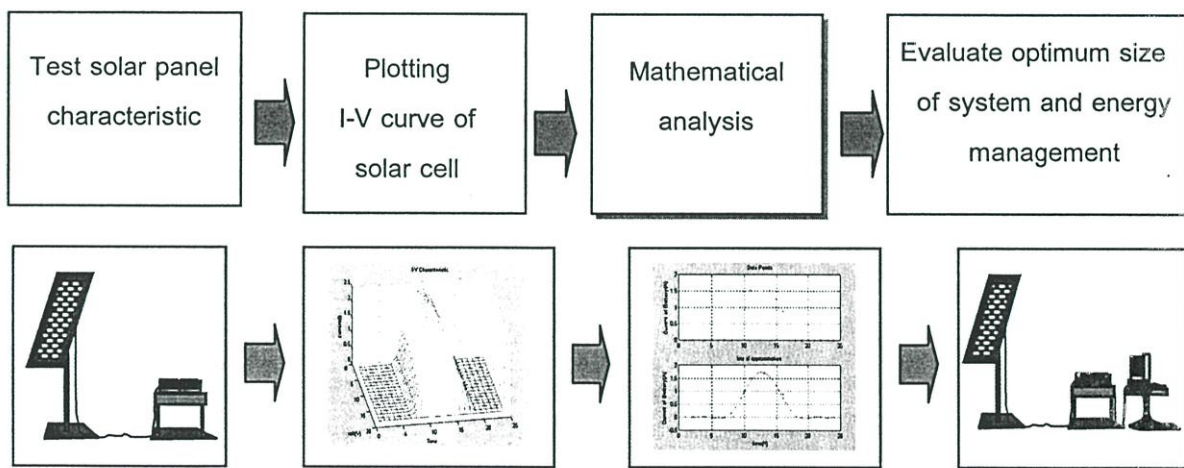


Figure 1 System analysis and testing procedure.

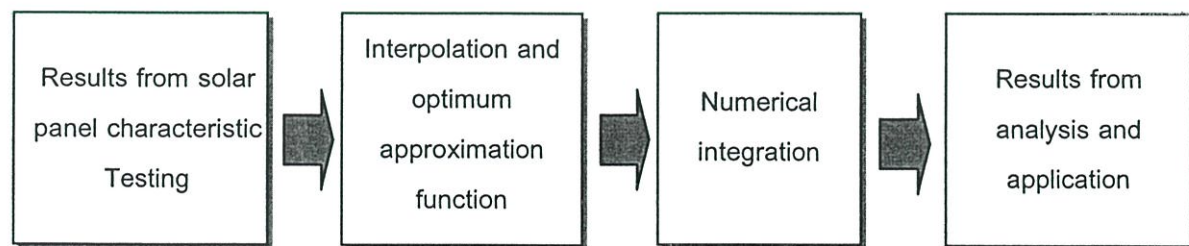


Figure 2 Numerical algorithm for system analysis.

## การใช้คณิตศาสตร์เชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การจ่ายพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การประมาณค่าระหว่าง และการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม

โดยการอาศัยวิธีการทำดูลพลังงานทางไฟฟ้าและใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ คือการวิเคราะห์เชิงตัวเลข(Numerical Analysis)มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงการจ่ายพลังงาน การควบคุมและจัดการพลังงาน และใช้พิจารณาขนาดที่เหมาะสมของระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์(แสนศักดิ์และคณะ, 1999) อีกทั้งจะนำมาซึ่งวิธีการวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้านการควบคุมและจัดการพลังงานด้วยวิธีการทางไดนามิกส์ (LasnierและGan Ang, 1990)ซึ่งต่างจากวิธีการทำดูลพลังงานแบบเดิมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป และให้ผลที่ใกล้เคียงกับการจ่ายพลังงานตามความเป็นจริงมากกว่าวิธีการคำนวณแบบเดิม โดยเป็นวิธีการหาเส้นที่มีค่าต่อเนื่องที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีค่าไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี Least Squares Regression โดยวิธีการที่จะได้เส้นที่เหมาะสมก็คือ ทำให้ความแตกต่างระหว่างจุดข้อมูล(data points)กับเส้นที่เหมาะสมมีน้อยที่สุด(PennyและLindfield, 1995) ในที่นี้จะใช้วิธี Polynomial regression ในการพิจารณาถึงอันดับที่เหมาะสม และหาฟังก์ชันพหุนามอันดับ  $m$  ( $m^{\text{th}}$  - order polynomial) ของเส้นที่เหมาะสมดังกล่าว

เกณฑ์เพื่อหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหนึ่งในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด คือ ทำให้ผลรวมของค่าผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด ( minimize the sum of the squares of the residuals ,  $S_r$  ) และได้แนวโน้มดังกล่าวนี้นำไปใช้ในการพิจารณาด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_j (x_i) \right]^2 \quad (1)$$

Sum of squares of residuals about the mean  $\bar{y}$

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

Coefficient of determination

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (3)$$

Correlation coefficient

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาดัดสินใจเลือกค่าสำหรับเส้นที่เหมาะสมที่สุดเป็น  $S_r = 0$ ,  $r^2 = 1$  และ  $r = 1$  ซึ่งแสดงว่าเส้นที่มีค่าต่อเนื่องนี้สามารถแทนข้อมูลได้100%

การอินทิเกรตเชิงตัวเลข

ในที่นี้อาศัยวิธีการของซิมป์สัน (Simpson's method) ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลข เพื่อใช้ในการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของฟังก์ชันที่ต้องการอินทิเกรต โดยวิธีของซิมป์สัน จะทำการประมาณเส้นโค้งที่ต้องการทราบค่าด้วยส่วนของพาราโบลา (Parabola) เล็ก ๆ ต่อกัน ซึ่งจะทำการแบ่งช่วงที่ต้องการอินทิเกรตจาก  $a$  ถึง  $b$  [ $a, b$ ] เป็นระยะเท่า ๆ กันด้วยจำนวนคู่ โดยมี  $n$  เป็นช่วงที่ทำการแบ่ง

## การทดสอบและประยุกต์ใช้งาน

### การทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้อัลกอริทึมและระเบียบวิธีการคำนวณที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำอัลกอริทึม และวิธีการดังกล่าวข้างต้นมาทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของระเบียบวิธีการคิดข้างต้น โดยทำการทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐานต่าง ๆ ที่ทราบค่าผลเฉลยที่แน่นอนแล้ว รวมทั้งนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาทดสอบกับระบบการใช้งานจริงด้วย

### การทดสอบอัลกอริทึมของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การทดสอบการประมาณค่าด้วยเส้นที่เหมาะสมโดยการใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับต่าง ๆ และให้ผลของการประมาณค่าดังตารางที่ 1

**Table 1** The comparison results between calculated and standard function.

Order of polynomial for evaluation	Standard error of the estimate( $S_e$ )	Coefficient of determination( $r^2$ )	Correlation coefficient( $r$ )
Order 1 <sup>st</sup>	5.7549	0.2333	0.4831
Order 2 <sup>nd</sup>	2.7158	0.8463	0.9200
Order m <sup>th</sup>	2.8284	0.9815	0.9907

Note : m<sup>th</sup> is optimum order of polynomial function.

### การทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจริง

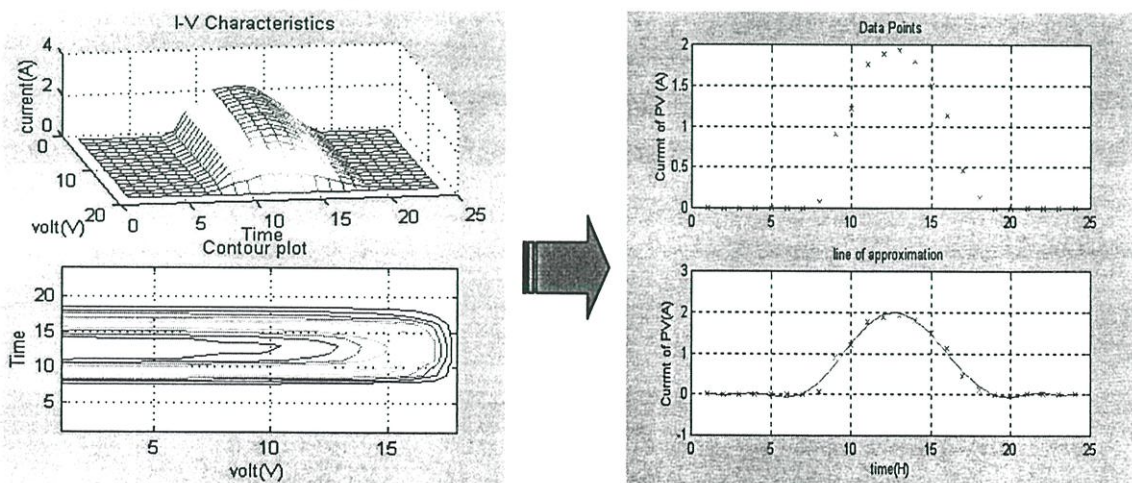
ข้อมูลและรายละเอียดของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบ

ตำแหน่งการติดตั้ง : หนองจอก Lat. 13 ° N Long. 100 ° E

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ : BPTS 1255 ขนาด 55 W<sub>p</sub>

ภาระที่ใช้ในการทดสอบ : เป็นโหลดความต้านทานแบบปรับค่าได้

ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ตามอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอในรูปที่ 1 โดยการนำข้อมูลกราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาฟังก์ชันที่เหมาะสม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



**Figure 3** Program display and analysis from proposed algorithm.

ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2 และการเปรียบเทียบความแตกต่างของอันดับ (order) ของฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) ที่ใช้ในการประมาณค่า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4

Table 2 Calculated results and comparison.

Approximation function	Result from coefficient of determination ( $r^2$ ) calculation
Polynomial function order $m^{\text{th}}$	1.0000
Exponential function $P_e(x) = ae^{bx}$	0.9887

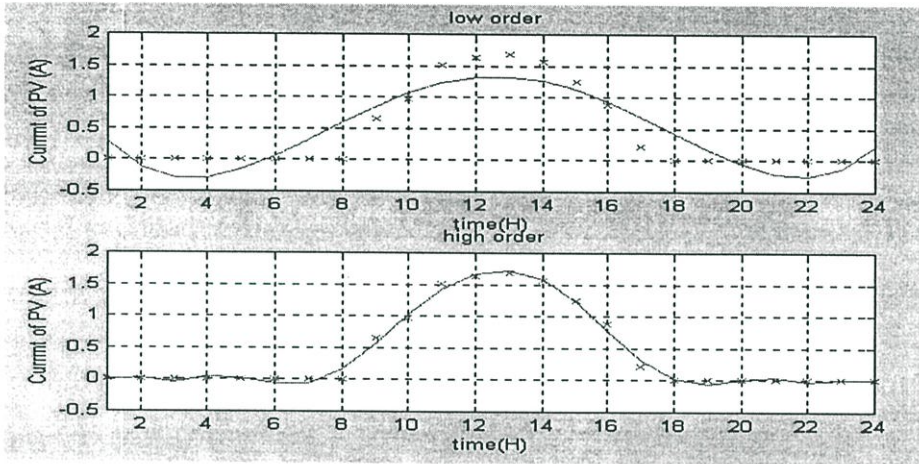


Figure 4 The comparison of order using in PV system approximation for testing.

จากผลการคำนวณการประมาณค่าเพื่อหาเส้นที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม โดยใช้อันดับในการประมาณค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าผลรวมของค่าที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ และเส้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่า สามารถใช้แทนข้อมูลได้ถึง 100% ( $r^2 = 1$ )

แต่ทั้งนี้ควรต้องพิจารณาถึงค่าผิดพลาดในส่วนอื่นประกอบด้วยอันได้แก่ ค่าผิดพลาดเพราะปัดเศษ (Round-off Error) และค่าผิดพลาดเพราะตัดปลาย (Truncation Error)

การประยุกต์ใช้งานเพื่อการวิเคราะห์หารูปแบบในการติดตั้ง และมุมในการติดตั้งที่เหมาะสม

ทำการทดสอบใช้งานในการหาค่าการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะการติดตั้งที่แตกต่างกัน เพื่อทำการพิจารณารูปแบบและมุมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้การจ่ายพลังงานสูงที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Exell, 1984) และปริมาณของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นราบภายในบรรยากาศโลก (บุญสร้าง, 2539) อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน 4 ลักษณะดังนี้

รูปแบบที่ 1 – ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นราบในแนวระดับติดตั้งแบบอยู่กับที่

รูปแบบที่ 2 – ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทำมุมตามตำแหน่งเส้นรุ้งของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์และติดตั้งแบบอยู่กับที่

รูปแบบที่ 3 – ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เอียงทำมุมตามค่าที่ได้ทำการคำนวณจากสมการในการหา มุมเอียงที่เหมาะสมในแต่ละวัน

รูปแบบที่ 4 – ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยให้มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอสซิมูท

(เป็นการติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน คือในแนวออก-ตกและเหนือ-ใต้ พร้อมกัน)

### การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสม

ซึ่งต้องมีการพิจารณามุมเดคลิเนชัน( $\delta$ )หรือมุมการเอียงปรากฏของแกนหมุนของโลกเข้าหาดวงอาทิตย์เทียบกับแกนตั้งฉากของระนาบสุริยะวิถีประกอบด้วย (WibulswasและKirtikara, 1992)โดยมีสูตรในการคำนวณหาค่ามุมเดคลิเนชันเป็นดังนี้

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(\left(\frac{284 + N}{365}\right) * 360\right) \quad (5)$$

เมื่อ  $N$  คือเลขวันในรอบปี

นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องพิจารณาถึงมุมประกอบอื่นๆ ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 5 อีกด้วย อันได้แก่ อัลติจูดสุริยะ( $\alpha$ ) และมุมแอซิมุทสุริยะ( $\psi$ ) ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีมุมเอียงเป็น  $\beta$  และ มุมแอซิมุทของแผงเป็น  $\gamma$  และมุมตกกระทบจากดวงอาทิตย์ทำกับระนาบตั้งฉากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นมุม  $\theta$

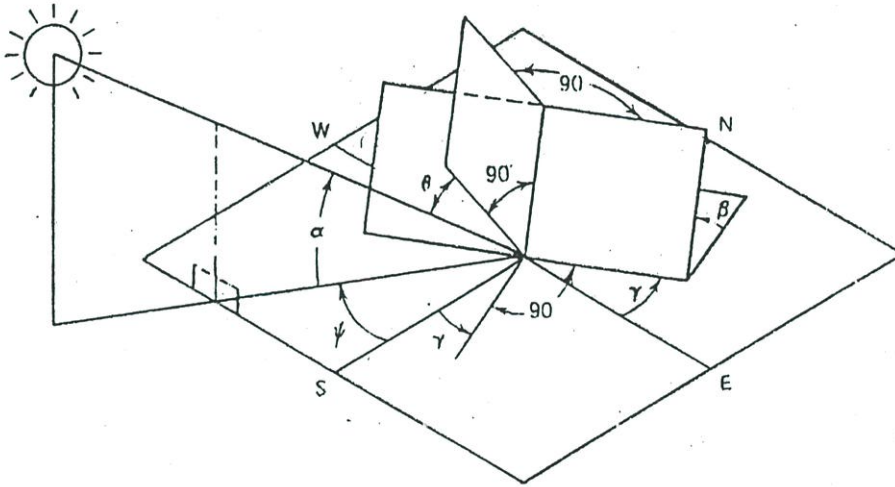


Figure 5 Considered angle for solar irradiance on panel.

แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถรับรังสีในช่วงเวลาหนึ่งได้สูงสุดเมื่อมุม  $\theta(t)$  ในเวลาใด ๆ มีขนาดเล็กที่สุด หรือ  $\cos\theta(t)$  มีค่ามากที่สุด(ยุทธและพิฑูรย์, 2526)

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (6)$$

เมื่อ  $\varphi$  เป็นมุมเส้นรุ้งของสถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

และ  $\omega$  คือมุมชั่วโมง (hour angle)

โดยถ้ามุมอื่นๆคงที่ค่า  $\cos\theta$  จะแปรค่าตามมุม  $\beta$  และจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ  $\frac{d\cos\theta}{d\beta} = 0$  ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสม( $\beta_{opt}$ )ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ถ้าทำการพิจารณาค่ามุมเอียงที่เหมาะสมในตอนเที่ยงวันก็สามารถที่จะพิจารณาได้ดังนี้

$$\tan\beta_{opt} = \cos\gamma \tan(\varphi - \delta) \quad (7)$$

### ผลการทดลองและวิเคราะห์รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองเพื่อจะทำการพิจารณาหารูปแบบและมุมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้การจ่ายพลังงานสูงที่สุด โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ BPTS 1255 ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันจำนวน 4 แผง และทำการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อข้างต้น โดยทำการทดสอบเก็บบันทึกข้อมูลในวันที่มีค่า  $N$  เป็น 192 (ช่วงฤดูร้อน) 239 (ช่วงฤดูฝน) และ 296 (ช่วงฤดูหนาว) ( $N$  คือเลขวันในรอบปี) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้งที่ 13.0 องศาเหนือ เมื่อทำการคำนวณหาค่ามุมเอียงที่เหมาะสม ( $\beta_{opt}$ ) ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ 7 จะได้ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมในแต่ละค่าของ  $N$  ออกมาเป็น -9.108 องศา (หันแผงเข้าหาดวงอาทิตย์ทางทิศเหนือ) 3.407 องศา และ 25.446 องศา ตามลำดับ และนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปทำการปรับมุมเอียงของแผงในชุดที่ 3 และทำการทดสอบเก็บข้อมูลและบันทึกค่าคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละรูปแบบ ในช่วงเวลาเดียวกันและจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบบันทึกผลมาทำการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอแสดงแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามวิธีการที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังแสดงตามตารางที่ 3

Table 3 Results analysis from different type and angle of panel setting.

	Current dispatch from solar cell ( Ah )			
	(1)Horizontal setting	(2)Latitude setting	(3)Optimum angle calculation setting	(4)Tracking setting
$N = 192$	11.7780	5.9433	15.6518	17.4207
$N = 239$	12.5814	10.1097	15.7644	17.8430
$N = 296$	9.9025	13.1945	17.1375	19.2379

### บทวิเคราะห์

จากผลการทดลองวิเคราะห์ค่าการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปแบบและมุมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ระบบที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยให้มีการติดตามดวงอาทิตย์แบบระบบแอซิมุทจะให้ค่าปริมาณการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในรอบ 1 วัน สูงที่สุด โดยสูงกว่าการติดตั้งในรูปแบบอื่นมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งนี้ควรต้องคำนึงถึงปริมาณพลังงานที่ระบบที่ติดตั้งแบบให้มีการติดตามดวงอาทิตย์ต้องใช้ไปในชุดขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนตำแหน่งไปของดวงอาทิตย์ได้อีกด้วย

สำหรับระบบที่มีการติดตั้งแบบอยู่กับที่ และมีการปรับมุมเอียงให้แตกต่างกันออกไปในลักษณะต่างๆ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามค่ามุมเอียงที่ได้จากการพิจารณาในสมการคำนวณค่ามุมเอียงที่เหมาะสม ( $\beta_{opt}$ ) จะให้ค่าปริมาณการจ่ายกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในรอบ 1 วัน ที่สูงกว่าการติดตั้งแบบอยู่กับที่ในรูปแบบอื่นมากกว่า 20% และเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถได้รับแสงจากดวงอาทิตย์สูงที่สุดในแต่ละวันค่าของมุม  $\beta_{opt}$  จะแปรเปลี่ยนค่าไปอีกด้วย

นอกจากนี้ยังสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้นไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะอื่นได้อีกเช่น ใช้ในการประกอบการพิจารณาเลือกรูปแบบในการติดตั้งชุดรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หรือเครื่องอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นต้น เนื่องจากมีการนำระบบดังกล่าวมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายจะส่งผลให้มีการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น

## บทสรุป

เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้จากตัวอย่างของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความผิดพลาดต่ำ นอกจากนี้เส้นกราฟที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าของข้อมูลจาก อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอยังสามารถใช้แทนกลุ่มข้อมูลได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ผลเฉลยที่ออกมานั้นมีความถูกต้องแม่นยำอีกด้วย และยังสามารถนำวิธีการที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานและพัฒนาในการออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ในสภาวะการใช้งานต่างๆ ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังเป็นการจำลองการทำงานเพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบโดยรวม เพื่อให้การใช้งานของระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการศึกษาถึงรูปแบบในการติดตั้งและมุมเอียงที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับมุมเอียง  $\beta$  และมุมเอียง  $\gamma$  จะมีส่วนช่วยให้ได้รับรังสีตรงสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความรับอาบรังสีรวมมีค่าสูงขึ้นได้ ทั้งนี้การปรับมุมเอียง แต่เพียงอย่างเดียวก็ช่วยได้ระดับหนึ่ง แต่ถ้ามีการปรับมุมกวาด หรือมุมแอสซิมุทของแผงให้เหมาะสม ก็ยังเป็นการเพิ่มปริมาณของรังสีตรงและปริมาณรังสีรวมได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- บุญสร้าง ดิเรกสถาพร. 2539. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทย. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่23 ฉบับที่ 2. หน้า 51-73.
- ยุทธ อัครมาส และ พิฑูรย์ ตวีวีจิตรเกษม. 2526. Photovoltaic Solar Systems. เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ โดย IEEE (THAILAND SECTION). หน้า 1-22.
- Deeon, S., S. Potivejkul, and W. Khan-ngern. 1999. Simulation of Battery Sizing for Continuous Load in PV System. International Power Engineering Conference Vol. 2. : 453-457.
- Egido, M.A. and E. Lorenzo. 1992. The sizing of stand-alone PV systems. A review and a proposed new method. Solar Energy Materials and Solar cell. 26 : 51-69.
- Exell, R.H.B.1984. Mapping Solar Radiation by Meteorological Satellite. Renewable Energy Review. 6 : 27-39.
- Lasnier, F. and T. Gan Ang. 1990. Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger. Bristol and New York : 73-80.
- Penny, J. and G. Lindfield. 1995. Numerical Methods Using MATLAB. Ellis Horwood : 252-258.
- Wibulswas, P. and K. Kirtikara. 1992. Research and Development on Solar Energy in Thailand. UNIDO. Consultative Meeting on Solar Energy Research & Applications. : 356-362.

## ประวัติผู้เขียน



นายแสนศักดิ์ ดีอ่อน เกิดที่เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2538

ปีพ.ศ. 2539 – พ.ศ. 2544 เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

และในปีพ.ศ. 2545 ได้เข้าร่วมโครงการพิเศษของรัฐบาล (โครงการชุบชีวิตธุรกิจไทย)ปฏิบัติงานในตำแหน่งวิทยากรที่ปรึกษาทางด้านการเพิ่มผลผลิต(PRODUCTIVITY CONSULTANT) โดยมีหน่วยงานต้นสังกัดคือ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ