

แบบจำลองและการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการคำนวณ  
การไหลของกำลังไฟฟ้า

นายนพดล ชวนไชยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

MODELING AND DESIGN OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH  
LOAD FLOW CALCULATION

MR. NOPPADOL CHUANCHAIYAKUL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองและการออกแบบระบบผลิต  
ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการ  
คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

โดย

นายนพดล ชวนไชยะกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์ีย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับ  
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์ีย์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิพงษ์ ฉัตรภากรณ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ภาวิน สยามชัย)

นพดล ชวนไชยะกุล: แบบจำลองและการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า. (MODELING AND DESIGN OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH LOAD FLOW CALCULATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์, 265 หน้า.

ในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น การใช้พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับอนาคต ในจำนวนพลังงานหมุนเวียนต่างๆพลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ คือ (1) พัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดโดยใช้โปรแกรม MATLAB และทำการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณปริมาณกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ภายใต้สภาพอุณหภูมิและความเข้มแสงที่กำหนด (2) ศึกษาผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์และใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นในการคำนวณหาค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า โดยมีการหาจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงแดด (3) ศึกษาผลกระทบของการเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นในการคำนวณหาค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า โดยมีการหาจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเกิดผลความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (4) ทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ (5) ศึกษาโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดร่วมกับการพิจารณาโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการตรวจสอบผลการคำนวณของแบบจำลองกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบทดสอบและผลที่ได้จากโปรแกรม PVSYSY เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2555.....

# # 5570245821: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: PHOTOVOLTAIC / DOUBLE DIODE MODEL / SHADING / MISMATCH / TESTED SYSTEM

NOPPADOL CHUANCHAIYAKUL: MODELING AND DESIGN OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH LOAD FLOW CALCULATION ADVISOR: SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D., 265 pp.

Nowadays, the demand of energy is more and more increasing while the energy resources are decreasing. The main energy resources are exhaustible, i.e. oil, coal and natural gas. Therefore, the renewable energy is one of the alternative way to generate electricity in the future. The most popularity renewable energy is photovoltaic (PV) generation system, that concentrated in this thesis. The main purposes of this thesis are described as follows; (1) Double diode modeling of PV module developed in MATLAB program, which can calculate the current, voltage and power that are generated by the PV module at any condition of solar irradiation and module temperature, (2) study in the shading effect on the PV module by Double diode model of PV, (3) study in mismatch on the PV string by Double diode model of PV, (4) developed PV model in graphic user interface program, (5) study of operating mode of PV grid connection system, i.e. PV mode and PQ mode by considering the three parts of PV grid connection system, i.e. DC part, inverter part and AC part considered with load flow calculation. Moreover, this thesis compares the obtained results from the PV modeling with the measured data from the test system to assure that the results are accurate.

Department : Electrical Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลมากมาย กระผมขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนถึงแนะและให้ความรู้ตลอดการวิจัย และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิพงษ์ จัตุราภรณ์ พร้อมทั้ง ดร. ภาวัน สยามชัย ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาช่วยตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนการศึกษาและค่าเล่าเรียนตลอดช่วงเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ที่ได้อนุเคราะห์ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ดาดฟ้าอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) บริษัทชั้นนำบางจาก จำกัด (มหาชน) และบริษัท SMA ประเทศไทย จำกัด (มหาชน) สำหรับความรู้และข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวสำหรับกำลังใจและการให้การสนับสนุนผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ด
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
1.3 วัตถุประสงค์.....	9
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	10
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	10
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	12
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	15
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19

2.1.2.1	กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	19
2.1.2.2	กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิกอน.....	21
2.1.3	ข้อดีและข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.2	หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.2.1	แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.2.1.1	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ.....	23
2.2.1.2	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณ.....	24
2.2.1.3	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอด	25
2.2.1.4	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอด	25
2.2.2	ผลของอุณหภูมิและความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.2.2.1	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.2.2.2	ความเข้มแสง.....	31
2.3	ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
2.4	ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2.4.1	กรณีการบังแสงแดดโดยยังคงมีความเข้มแสงเหลืออยู่.....	40
2.4.2	กรณีการบังแสงแดดโดยไม่มี ความเข้มแสงเหลืออยู่.....	42
2.4.3	ผลของการบังแสงแดดต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสง อาทิตย์.....	42
2.4.4	บายพาสไดโอดและบล็อกกิ้งไดโอด.....	44
2.5	ผลของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	46



2.6 สรุป.....	47
<b>บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....</b>	<b>48</b>
3.1 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
3.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ.....	49
3.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ ไฟฟ้า.....	50
3.1.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน.....	51
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
3.3 โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	53
3.3.1 โหมดการทำงานแบบ PQ.....	53
3.3.2 โหมดการทำงานแบบ PV.....	54
3.4 สรุป.....	54
<b>บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....</b>	<b>55</b>
4.1 หลักการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่ง ไดโอด.....	55
4.1.1 กระแสอิ่มตัวของไดโอด.....	56
4.1.2 ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม.....	59
4.1.3 ความต้านทานสมมูลต่อขนาน.....	63
4.1.4 กระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์.....	67
4.2 หลักการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสอง ไดโอด.....	67

4.2.1	กระแสไฟฟ้าของไดโอด.....	69
4.2.2	ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม.....	70
4.2.3	ความต้านทานสมมูลต่อขนาน.....	70
4.3	ปัจจัยทางอุณหภูมิและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
4.3.1	ปัจจัยด้านอุณหภูมิ.....	72
4.3.1.1	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์.....	72
4.3.1.2	กระแสไฟฟ้าของไดโอด.....	72
4.3.1.3	ความต่างศักย์ซีดีเริ่ม.....	73
4.3.2	ปัจจัยด้านความเข้มแสง.....	73
4.3.2.1	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์.....	73
4.3.2.2	ความต้านทานสมมูลต่อขนาน.....	73
4.4	ขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบหนึ่งไดโอด.....	74
4.5	ขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองไดโอด.....	76
4.6	ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	78
4.6.1	ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยใช้แบบ จำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด.....	79
4.6.2	ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยใช้แบบ จำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด.....	80
4.7	สรุป.....	82

<b>บทที่ 5 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....</b>	<b>83</b>
5.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	83
5.1.1 แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรง.....	84
5.1.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด.....	85
5.1.1.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด.....	88
5.1.1.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อส่วนไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนอินเวอร์เตอร์.....	91
5.1.2 แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์.....	93
5.1.3 แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ.....	94
5.2 ขั้นตอนคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	102
5.3 สรุป.....	107
<b>บทที่ 6 การบั้งแสงแดด.....</b>	<b>108</b>
6.1 การวิเคราะห์ผลของการบั้งแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	108
6.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอด.....	110
6.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบั้งแสงแดด.....	111
6.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบั้งแสงแดด.....	111
6.2.2.1 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นโหลด.....	112

6.2.2.2 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย.....	113
6.3 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอด.....	114
6.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดด.....	114
6.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด..	114
6.3.2.1 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันเข้าใกล้ศูนย์.....	114
6.3.2.2 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย.....	115
6.4 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	115
6.5 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาร์เรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	121
6.6 สรุป.....	125
<b>บทที่ 7 ความแตกต่างของแผง.....</b>	<b>126</b>
7.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	126
7.1.1 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม.....	130
7.1.2 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม.....	130
7.1.3 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนาน.....	131

7.1.4 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการ เชื่อมต่อบนขานาน.....	132
7.2 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อบน อนุกรม.....	132
7.3 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อบน ขานาน.....	137
7.4 สรุป.....	141
<b>บทที่ 8 โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้.....</b>	142
8.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้.....	142
8.2 โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ด้านระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์ แสงอาทิตย์.....	143
8.2.1 โปรแกรม PVSYST.....	143
8.2.2 โปรแกรม System Advisor Model (SAM).....	147
8.3 การสร้างโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Matlab.	149
8.3.1 การสร้างองค์ประกอบต่างๆในหน้าต่างส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ ใช้.....	150
8.3.2 การป้อนชุดคำสั่งเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนเชื่อมต่อประสาน งานผู้ใช้.....	151
8.4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อ ประสานงานผู้ใช้.....	152
8.4.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ.....	153

8.4.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	155
8.4.3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดความแตกต่างของ แสง.....	157
8.5 สรุป.....	159
<b>บทที่ 9 ระบบทดสอบ.....</b>	<b>161</b>
9.1 ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.....	161
9.1.1 สถานที่.....	162
9.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์...	163
9.1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	163
9.1.2.2 อินเวอร์เตอร์.....	164
9.1.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัด.....	166
9.1.2.4 ตัวเก็บข้อมูล.....	168
9.1.3 รายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์.....	169
9.1.4 ข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง.....	170
9.2 ระบบทดสอบท่าทราย.....	172
9.3 สรุป.....	172
<b>บทที่ 10 ผลการทดลอง.....</b>	<b>173</b>
10.1 ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด.....	173
10.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด.....	173

10.1.1.1 ผลของความเข้มแสง.....	175
10.1.1.2 ผลของอุณหภูมิ.....	176
10.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด.....	178
10.1.2.1 ผลของความเข้มแสง.....	179
10.1.2.2 ผลของอุณหภูมิ.....	180
10.2 ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด.....	182
10.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด.....	182
10.2.1.1 ผลของความเข้มแสง.....	183
10.2.1.2 ผลของอุณหภูมิ.....	185
10.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด.....	186
10.2.2.1 ผลของความเข้มแสง.....	187
10.2.2.2 ผลของอุณหภูมิ.....	189
10.3 ผลการทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	190
10.3.1 ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตรึงเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	191
10.3.2 ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	202
10.4 ผลการทดลองผลกระทบของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	207
10.4.1 กรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกัน.....	208

10.4.2	กรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกัน.....	210
10.5	ผลการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	212
10.6	สรุป.....	215
<b>บทที่ 11</b>	<b>การเปรียบเทียบผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....</b>	<b>217</b>
11.1	การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	217
11.1.1	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง.....	218
11.1.2	การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์.....	220
11.1.3	การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลจากการตรวจวัดจริง...	228
11.2	การเปรียบเทียบผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์....	245
11.3	สรุป.....	254
<b>บทที่ 12</b>	<b>สรุปวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>256</b>
12.1	สรุป.....	256
12.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	258
	<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>259</b>
	<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>265</b>



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ราคาขายปลีกของอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์.....	3
ตารางที่ 2.1 แพกเตอร์อุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์.....	28
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท เคียวเซร่า จำกัด (มหาชน) รุ่น KC200GT.....	34
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120.....	35
ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท เซลล์ จำกัด (มหาชน) รุ่น SP70.....	35
ตารางที่ 6.1 ลักษณะการบังแสงแดดของอาเรียในรูปที่ 6.1(ค).....	110
ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม PVSYST.....	145
ตารางที่ 8.2 รายละเอียดของแต่ละส่วนการทำงานของโปรแกรม SAM.....	148
ตารางที่ 8.3 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสง อาทิตย์ในสภาวะปกติ.....	154
ตารางที่ 8.4 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสง อาทิตย์หนึ่งอาเรียภายใต้สภาวะที่เกิดการบังแสงแดด.....	156
ตารางที่ 8.5 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสง อาทิตย์หนึ่งอาเรียภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของ แสง.....	158
ตารางที่ 9.1 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน).....	165

หน้า

ตารางที่ 9.2 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง.....	170
ตารางที่ 10.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT จาก บริษัทเคียวเซร่าจำกัด.....	174
ตารางที่ 10.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 จากบริษัท โซลาร์ตรอนจำกัด.....	178
ตารางที่ 10.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT จาก บริษัท เคียวเซร่า จำกัด.....	182
ตารางที่ 10.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด.....	186
ตารางที่ 10.5 ผลการทดลองการบังแสงแดดในกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณี ศึกษาที่ 6 ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC).....	201
ตารางที่ 10.6 ผลการทดลองเรื่องความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสง อาทิตย์.....	211
ตารางที่ 10.7 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส ณ ตำแหน่งต่างๆ.....	214
ตารางที่ 11.1 เปรียบเทียบค่าความต้านทานสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น SP120 ระหว่างโปรแกรม PVSYST และการคำนวณ.....	220
ตารางที่ 11.2 ผลการคำนวณค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในหนึ่งวัน.....	242

ตารางที่ 11.3 ผลของการจำลองการบังแสงแดดต่อระบบทดสอบ	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	254

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตารางธาตุ.....	16
รูปที่ 2.2 ลักษณะของ N-Type Layer.....	17
รูปที่ 2.3 ลักษณะของ P-Type Layer.....	18
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
รูปที่ 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนประเภทต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.7 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติขนาดหนึ่งเซลล์.....	24
รูปที่ 2.8 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณขนาดหนึ่งเซลล์.....	24
รูปที่ 2.9 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดขนาด หนึ่งเซลล์.....	25
รูปที่ 2.10 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดขนาด หนึ่งเซลล์.....	26
รูปที่ 2.11 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดขนาด หนึ่งโมดูล.....	36
รูปที่ 2.12 แบบจำลองการศึกษาการบังแสงแดดอย่างง่าย.....	39
รูปที่ 2.13 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดด.....	40
รูปที่ 2.14ก ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อไม่มีการบังแสงแดด.....	43
รูปที่ 2.14ข ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	43
รูปที่ 2.15ก ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันเมื่อไม่มีการบัง แสงแดด.....	43

รูปที่ 2.15ข ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	44
รูปที่ 2.16 การต่อบายพาสไดโอด.....	45
รูปที่ 2.17 ผลของกระแสรวมในกรณีที่มีบล็อกกิ้งไดโอดและกรณีที่ไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด.....	46
รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ.....	49
รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ.....	51
รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน.....	52
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สี่บิโมดูลแบบอุดมคติและแบบที่มีความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม.....	60
รูปที่ 4.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สองโมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม.....	63
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สี่บิโมดูลแบบอุดมคติและแบบที่มีความต้านทานสมมูลต่อขนาน.....	64
รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	74
รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบสองไดโอด.....	77
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	79

รูปที่ 4.7 ขั้นตอนคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบสองไดโอด.....	81
รูปที่ 5.1 ลักษณะการเชื่อมต่อแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า.....	84
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดหนึ่งโมดูล.....	86
รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดหนึ่งโมดูล.....	90
รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสตริงและอาเรย์.....	92
รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส.....	95
รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	95
รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อแบบวาย.....	95
รูปที่ 5.8 การเชื่อมต่อแบบวายและเดลต้า.....	96
รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อแบบเดลต้า.....	97
รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า.....	104
รูปที่ 6.1 (ก) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดในหนึ่งสตริง (ข) กลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ และ (ค) อาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มที่ถูกบังแสงแดดจำนวนสามกลุ่ม.....	109
รูปที่ 6.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	112

หน้า

รูปที่ 6.3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทมีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	115
รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	116
รูปที่ 6.5 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	122
รูปที่ 7.1 จุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	127
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผง กรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2.....	129
รูปที่ 7.3 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1.....	130
รูปที่ 7.4 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2.....	131
รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรม.....	132
รูปที่ 7.6 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน.....	137
รูปที่ 8.1 ส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ของโปรแกรม PVSYST.....	146
รูปที่ 8.2 ส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ของโปรแกรม SAM.....	149
รูปที่ 8.3 หน้าต่าง Layer Editor สำหรับการกำหนดและวางส่วนต่างๆของส่วนประสานงานผู้ใช้.....	151

รูปที่ 8.4 แสดงวัตถุประเภทปุ่มกด (Push Button) ซึ่งมีชื่อป้ายกำกับ (Tag) คือ pushbutton1.....	152
รูปที่ 8.5 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติที่พัฒนาขึ้น.....	155
รูปที่ 8.6 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะที่เกิดการบังแสงแดด.....	157
รูปที่ 8.7 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผง.....	159
รูปที่ 9.1 ชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	162
รูปที่ 9.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120.....	164
รูปที่ 9.3 อินเวอร์เตอร์จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น 2100TL.....	164
รูปที่ 9.4 อุปกรณ์ส่วนตรวจวัดความเข้มแสงจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny.....	167
รูปที่ 9.5 อุปกรณ์ส่วนตรวจวัดอุณหภูมิจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny.....	168
รูปที่ 9.6 ตัวเก็บข้อมูลจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny webbox.....	169
รูปที่ 9.7 รายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	169
รูปที่ 9.8 ระบบทดสอบทำทราาย 34 บัส.....	172



รูปที่ 10.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้ ใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	175
รูปที่ 10.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	176
รูปที่ 10.3 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	177
รูปที่ 10.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	177
รูปที่ 10.5 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้ แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	179
รูปที่ 10.6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้ ใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	180
รูปที่ 10.7 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบ จำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	181
รูปที่ 10.8 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	181

รูปที่ 10.9 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้ ใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	184
รูปที่ 10.10 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	184
รูปที่ 10.11 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	185
รูปที่ 10.12 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ ใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	186
รูปที่ 10.13 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้ แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	188
รูปที่ 10.14 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	188
รูปที่ 10.15 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบ จำลองแบบสองไดโอด.....	189
รูปที่ 10.16 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	190

รูปที่ 10.17 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 โมดูล.....	192
รูปที่ 10.18 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 โมดูล.....	193
รูปที่ 10.19 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 5 โมดูล.....	194
รูปที่ 10.20 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 5 โมดูล.....	194
รูปที่ 10.21 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 8 โมดูล.....	195
รูปที่ 10.22 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 8 โมดูล.....	196
รูปที่ 10.23 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 35% ....	198
รูปที่ 10.24 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 50% ....	199
รูปที่ 10.25 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรง ดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 70% ....	200
รูปที่ 10.26 ลักษณะของอาเรย์ในกรณีศึกษาที่ 7.....	203

รูปที่ 10.27 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของอาเรย์ที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 1 กลุ่ม.....	204
รูปที่ 10.28 ลักษณะของอาเรย์ในกรณีศึกษาที่ 8.....	205
รูปที่ 10.29 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของอาเรย์ที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 กลุ่ม.....	206
รูปที่ 10.30 การเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสามจุด เมื่อเกิดการบังแสงแดดในกรณีศึกษาที่ 8.....	207
รูปที่ 10.31 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีการเชื่อมต่ออนุกรม.....	209
รูปที่ 10.32 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีการเชื่อมต่อขนาน.....	209
รูปที่ 10.33 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันโดยมีการเชื่อมต่ออนุกรม.....	210
รูปที่ 10.34 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันโดยมีการเชื่อมต่อขนาน.....	211
รูปที่ 10.35 ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส.....	213
รูปที่ 11.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซว่า จำกัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง.....	221

รูปที่ 11.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ.....	222
รูปที่ 11.3 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	223
รูปที่ 11.4 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	224
รูปที่ 11.5 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด.....	225
รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	225
รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ แบบจำลองแบบสองไดโอด.....	226
รูปที่ 11.8 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบของไฟล์ Excel...	229
รูปที่ 11.9 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และกำลัง ไฟฟ้าของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการ ตรวจวัด.....	230
รูปที่ 11.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและเวลาที่ได้จากการตรวจวัด ระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	232
รูปที่ 11.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการตรวจวัด ระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	232

รูปที่ 11.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	233
รูปที่ 11.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	234
รูปที่ 11.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	234
รูปที่ 11.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจวัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	235
รูปที่ 11.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	236
รูปที่ 11.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	237
รูปที่ 11.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	237
รูปที่ 11.19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจวัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	238
รูปที่ 11.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	239

รูปที่ 11.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่คำนวณได้จาก แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	240
รูปที่ 11.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่คำนวณได้จาก แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	240
รูปที่ 11.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและเวลาที่ คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจ วัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556.....	241
รูปที่ 11.24 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองใน แต่ละวัน.....	244
รูปที่ 11.25 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองใน แต่ละวัน.....	244
รูปที่ 11.26 ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ในแต่ละวัน.....	244
รูปที่ 11.27 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 โมดูล.....	246
รูปที่ 11.28 การทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	247
รูปที่ 11.29 ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดและค่าที่คำนวณจาก แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด.....	248
รูปที่ 11.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับเวลาที่บันทึกได้จากระบบ ทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบัง แสงแดด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556.....	250

รูปที่ 11.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์กับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556.....	250
รูปที่ 11.32 การเปรียบเทียบค่าของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556.....	251
รูปที่ 11.33 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556.....	252
รูปที่ 11.34 การเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556.....	252



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอ ที่มาและความสำคัญของปัญหา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก พลังงานไฟฟ้าปริมาณมหาศาลถูกใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมของประเทศต่างๆทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน ประเทศเหล่านี้ส่วนใหญ่จะผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก ณ จุดศูนย์กลางการผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีแหล่งพลังงานหรือเชื้อเพลิงที่สำคัญในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลากหลายประเภท เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) อาทิ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินในอัตราส่วนถึงร้อยละ 95 ที่เหลือแบ่งออกเป็นพลังงานนิวเคลียร์อีกร้อยละ 2 และพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานหมุนเวียนอีกร้อยละ 3 ของพลังงานทั้งหมด [1] แต่สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นจะประกอบไปด้วย ก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 73.3 ลิคไนต์และถ่านหินนำเข้าร้อยละ 14 น้ำร้อยละ 4.7 น้ำมันร้อยละ 4.5 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 1 และการซื้อไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้านอีกร้อยละ 2.5 [1] ซึ่งพลังงานเหล่านี้มีข้อดีคือมีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับขนาดกำลังการผลิต ทว่าต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยในด้านอื่นๆประกอบ เช่น ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ ปัจจัยทางธรณีวิทยา ปัจจัยทางด้านความปลอดภัย และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น การเลือกใช้แหล่งพลังงานโดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆนั้นสามารถยกตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้ เช่น สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานถ่านหินจำเป็นต้องสร้างให้ห่างไกลจากบริเวณชุมชนเพื่อป้องกันปัญหามลภาวะทางอากาศที่จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน ในขณะที่เดียวกันก็ต้องอยู่ไกลกับเหมืองถ่านหินเพื่อลดต้นทุนจากการขนส่ง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติควรตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งก๊าซธรรมชาติและคำนึงถึงแนวท่อส่งก๊าซ และสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำจำเป็นต้องหาจุดที่มีสภาพทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมในการสร้างเขื่อน ขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงผลกระทบทางนิเวศวิทยาของพื้นที่ที่จะมีการสร้างเขื่อนและผลกระทบต่อชุมชนรอบข้าง เป็นต้น

จากข้อมูลที่กำลังกล่าวมาแม้ว่าประเทศไทยจะใช้เชื้อเพลิงหลากหลายชนิดในการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจะพบว่าเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยคือเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเป็นหลัก โดยก๊าซธรรมชาติถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 70 ของกำลังผลิตไฟฟ้าทั้งประเทศ [2] เนื่องจากก๊าซธรรมชาติมีราคาถูก ซึ่งปัจจุบันแหล่งที่มาของก๊าซธรรมชาติจะประกอบไปด้วย 2 แหล่งที่มา [3] คือ

- (1) การขุดขึ้นเองภายในประเทศ โดยแหล่งอ่าวไทยขุดได้จากบริเวณอ่าวไทยและพื้นที่พัฒนาร่วม ไทย-มาเลเซีย และจากแหล่งบนบก คือ แหล่งสิริกิติ์ แหล่งน้ำพอง และแหล่งภูหินฮ่อม
- (2) การนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากประเทศเพื่อนบ้าน ในปัจจุบันคือประเทศสหภาพพม่า

เป็นที่ทราบกันดีว่าแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลนี้เป็นเชื้อเพลิงประเภทที่ใช้แล้วหมดไปและปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังมีปริมาณที่ลดลงสวนทางกับปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี ช้ำยังมีผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาโลกร้อนตามมา ดังนั้นเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติและทำให้เกิดการกระจายสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงเพื่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ภาครัฐโดยกระทรวงพลังงานแห่งชาติจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เป็นจำนวนมาก เช่น ส่วนจ่ายเพิ่ม (Adder) [4] สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานสะอาดและกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก นอกจากนี้พลังงานหมุนเวียนยังหมายถึงรวมถึงพลังงานที่นอกจากใช้เป็นพลังงานทดแทนแล้วยังสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้อีก เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานขยะ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานคลื่นมหาสมุทร เป็นต้น โดยสำหรับประเทศไทยนั้นกระทรวงพลังงานได้มีการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน (Renewable Energy Development Plan: REDP) ขึ้นเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ โดยมีเป้าหมาย คือ เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศภายในปี 2565 จากปัจจุบันที่มีสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนเพียงร้อยละ 18.3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเพียงแหล่งพลังงานหมุนเวียนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงประเภทเดียว ซึ่งแหล่งพลังงานหมุนเวียนจากแสงอาทิตย์นี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในกลุ่มพลังงานหมุนเวียน อีกทั้งยังมีต้นทุนในการติดตั้งรวมถึงราคาของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆมีราคาที่ต่ำลงเรื่อยๆ โดยข้อมูลจากสถิติราคาขายปลีกของ

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 [5]

ตารางที่ 1.1 ราคาขายปลีกของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

	unit	Mar 2011	Apr 2011	May 2011	Jun 2011	Jul 2011	Aug 2011	Sep 2011	Oct 2011	Nov 2011	Dec 2011	Jan 2012	Feb 2012	Mar 2012
Module	US \$/Wp (≥125 W)	3.19	3.12	3.11	3.10	3.02	2.84	2.65	2.6	2.49	2.43	2.42	2.3	2.29
	Euro €/Wp (≥125 W)	2.8	2.73	2.69	2.66	2.54	2.51	2.43	2.37	2.33	2.33	2.31	2.28	2.17
Inverter	US \$/Continuous Watt	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	7.13	7.12	7.11	7.11
Inverter	Euro €/Continuous Watt	0.52	0.51	0.48	0.5	0.5	0.5	0.5	0.53	0.53	0.53	0.55	0.54	0.53
Battery	US \$/Output Watt Hour	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Battery	Euro €/Output Watt Hour	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Charge Controller	US \$/Amp	5.93	5.93	5.93	5.89	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93
	Euro €/Amp	4.27	4.21	3.97	4.12	4.15	4.15	4.15	4.39	4.39	4.45	4.57	4.51	4.39
Solar Systems	Residential c/kWh	30.5	30.4	30.3	30.3	30.1	29.8	29.5	29.4	29.3	29.2	29.1	29	28.9
	Commercial c/kWh	20.9	20.7	20.7	20.7	20.5	20.3	20	19.9	19.7	19.7	19.6	19.5	19.4
	Industrial c/kWh	16.3	16.2	16.1	16.1	16	15.8	15.6	15.5	15.4	15.3	15.3	15.2	15.2

\*หมายเหตุ c,\$,€ หมายถึงสกุลเงิน เซ็นต์ ดอลลาร์ และยูโร ตามลำดับ และ continuous Watt หมายถึงกำลังไฟฟ้าเมื่อใช้งานอย่างต่อเนื่อง

จากตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงราคาของอุปกรณ์ต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเป็นราคามาตรฐานจากบริษัททั่วโลก ณ วันที่ 7 มกราคม 2555 จะพบว่าแนวโน้มที่ราคาของอุปกรณ์ต่างๆจะมีราคาที่ต่ำลงเรื่อยๆ ทำให้ภาคส่วนต่างๆ ทั้งภาครัฐ หน่วยงานเอกชน โรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่ง

ประชาชนผู้บริโภคที่มีความตื่นตัวในเรื่องของพลังงานทดแทนให้ความสนใจกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในปัจจุบันมีประชาชนทั่วไปรวมถึงภาคอุตสาหกรรมมีความสนใจในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังไม่สูงมากนัก การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง จากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตพบว่าประเทศไทยมีความเข้มแสงที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงมาก โดยเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า  $14.4 \text{ MJ/m}^2$  หรือ  $4 \text{ kWh/m}^2$  ต่อวัน และหากเฉลี่ยรวมต่อพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีกำลังการผลิตถึง  $18.2 \text{ MJ/m}^2$  หรือ  $5.1 \text{ kWh/m}^2$  ต่อวัน และจากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในแผนพัฒนาพลังงานฉบับปรับปรุง (PDP2012) [6] ระบุว่าประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่า 50,000 เมกะวัตต์ (ความต้องการไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทยประมาณ 26,000 เมกะวัตต์) ซึ่งหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้ย่อมสามารถช่วยประหยัดเงินตราของประเทศได้อย่างมหาศาลทั้งในแง่ของการจัดหาแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการผลิตไฟฟ้า การนำเข้าพลังงานไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน รวมถึงสามารถชะลอการก่อสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ได้อีกด้วย

สำหรับประเทศไทยปัจจุบัน (พ.ศ.2555) นั้นมีปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งสิ้น 100,691.71 kW แบ่งเป็นประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า (Grid connected) จำนวน 70,810.16 kW และประเภทที่ไม่ได้เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า (Off-grid) จำนวน 29,881.01 kW และเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2555 ได้มีความร่วมมือระหว่าง บริษัทแอลโซลาร์1 บริษัทลือกซ์เลย์ จำกัด (มหาชน) กองทุนเปิด เอ็มเอฟ ซี เอนเนอร์จี ฟันด์ บริษัท ลีโอนิคส์ จำกัด และพันเอก ดร.ประเสริฐ ชูแสง เพื่อดำเนินการก่อสร้างโรงไฟฟ้าในฐานะผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งบริษัทแอลโซลาร์1 เปิดโรงผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (โซลาร์ฟาร์ม) ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ณ อำเภอ กบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี ผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ โดยเฟสแรกมีกำลังการผลิต 8 MW ที่เริ่มผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าให้ กับกรไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแล้ว

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งนักวิจัยได้ทำการศึกษาตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป โดยในแต่ละงานวิจัยก็มีขั้นตอนการศึกษาและขั้นตอนการคำนวณที่แตกต่างกัน เช่น

การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ (Modeling of photovoltaic cell) ซึ่งในแต่ละงานวิจัยก็จะมีผลที่แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ หรืออาจมีการใช้แบบจำลองที่แตกต่างกันไป ดังเช่นงานวิจัยที่ [8] - [15] จะทำการศึกษเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด (Single diode model) ส่วนงานวิจัยที่ [24] - [25] นั้นจะทำการศึกษเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดคู่หรือบางตำราเรียกว่าแบบสองไดโอด (Double diode model) ซึ่งข้อดี คือ จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดในช่วงที่ค่าความเข้มแสงต่ำ เนื่องจากแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดส่วนมากมักกำหนดให้ “ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ” ( $a$ ; Ideality factor) มีค่าคงที่ซึ่งที่จริงแล้วค่าแฟกเตอร์อุดมคตินี้เป็นฟังก์ชันของ “แรงดันขีดเริ่ม” ( $V_{th}$ ; Threshold voltage) แต่ในแบบจำลองชนิดสองไดโอดนี้ได้รวมผลของแฟกเตอร์อุดมคติไว้แล้ว [25] อีกทั้งแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นยังมีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ที่มีจำนวนมากกว่า ซึ่งส่งผลให้การหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆที่จำเป็นกระทำได้ยาก โดยงานวิจัยที่ [24] นั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานโดยวิธีเปรียบเทียบจุดตัดแกนของกราฟ ในขณะที่งานวิจัยที่ [25] นั้นใช้วิธีการอย่างง่าย (Simplified method) ในการหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ซึ่งหากแบ่งประเภทของงานวิจัยด้วยเกณฑ์ของวิธีการหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานแล้ว แม้ในกรณีของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดที่มีกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานไม่ซับซ้อนเท่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดก็ยังสามารถหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานได้มากมายหลายวิธีตามแต่ผู้ทำวิจัย ดังเช่นงานวิจัยที่ [11] ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานด้วยวิธีการวนซ้ำแบบ Gauss-Seidel งานวิจัยที่ [12] ใช้วิธี Bisection method แต่กระนั้นในแบบจำลองทั้งชนิดหนึ่งไดโอดและสองไดโอดยังมีส่วนที่เหมือนกันคือส่วนของ “ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน” และ “ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม” ซึ่งงานวิจัยบางครั้งได้มีการละเลยส่วนของค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมไปและคิดเฉพาะค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานเพียงอย่างเดียวซึ่งส่งผลให้แบบจำลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เพราะในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานสมมูลทั้งแบบต่อขนาน

และแบบอนุกรมต่างส่งผลกระทบต่อแบบจำลองทั้งสิ้น ทำให้แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แม่นยำและต้องการความละเอียดของผลที่ได้มากพอจำเป็นต้องคิดผลของค่าความต้านทานทั้งสองนี้ประกอบด้วย อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งชนิดหนึ่งไดโอดและสองไดโอดโดยคิดผลของทั้งค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานและผลของค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมทำให้ผลที่ได้มีความละเอียดและความแม่นยำค่อนข้างสูง และมีการเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลของแบบจำลองทั้งสองชนิดเทียบกับผลการตรวจวัดจริง

การศึกษาถึงปัจจัยของค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังเช่นงานวิจัย [10] ซึ่งศึกษาผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่มีผลต่อจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) รวมถึงผลของแพกเตอร์อุณหภูมิ ซึ่งได้พิจารณาผลโดยละเอียดค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานและค่านี้ถึงเพียงผลของค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมที่มีขนาดต่างๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ แรงดันกับกระแส และแรงดันกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ ค่าความเข้มแสง อุณหภูมิ และค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมที่แตกต่างกัน งานวิจัยที่ [13] เป็นการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน และความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งเซลล์ โดยที่จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้จะใช้วิธีสร้างแบบจำลองในรูปของ Empirical model และ ANFIS Model แล้วจึงนำผลที่ได้ของแบบจำลองแต่ละแบบมาทำการเปรียบเทียบกัน

การศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองที่ใช้ฟังก์ชันภายในของโปรแกรม Matlab-Simulink โดยเน้นสมการที่พิจารณาไปถึงผลของประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์หรืออีกนัยหนึ่งคือการพิจารณาถึงผลของ "ความห่างระดับชั้นพลังงาน" (Energy gap) ที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นทว่าส่งผลให้การคำนวณก็มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเกิดความง่ายต่อการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงมีการออกแบบโปรแกรมเป็นรูปแบบของ GUI (Graphic User Interface) หลังจากการพัฒนาแบบจำลองผ่านกล่องคำสั่งของโปรแกรม Simulink แล้วดังเช่นงานวิจัยที่ [21]

การศึกษาเกี่ยวกับการนำข้อมูลรายละเอียดของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic's data sheet) ของแต่ละผู้ผลิตมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลอง โดยส่วนใหญ่มักมีกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking:

MPPT) โดยวิธีเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าในแต่ละจุดไล่ไป กล่าวคือ กำหนดช่วงของการหาค่าจุดกำลังสูงสุดโดยใช้กระแสหรือแรงดันเป็นเกณฑ์กำหนดช่วง หากใช้กระแสเป็นเกณฑ์จุดกำลังสูงสุดจะอยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่ากระแสลัดวงจร แต่หากใช้แรงดันเป็นเกณฑ์จุดกำลังสูงสุดจะอยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่าแรงดันเปิดวงจร จากนั้นจึงนำค่าจากช่วงที่กำหนดได้มาแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคู่อันดับของกระแสและแรงดัน แล้วจึงทำการคำนวณหาลำลังไฟฟ้า ณ คู่อันดับต่างๆมาเปรียบเทียบเพื่อหาจุดกำลังสูงสุด แต่วิธีนี้นั้นจะใช้เวลาและหน่วยความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์มาก แต่ทว่างานวิจัยที่ [15] นั้นมีจุดเด่นที่น่าสนใจคือการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการหาอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันแล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อแก้สมการคณิตศาสตร์หาคู่อันดับของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดออกมาโดยตรง วิธีดังกล่าวแม้จะมีความซับซ้อนของสมการมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามนำมาซึ่งผลลัพธ์ที่แม่นยำและใช้เวลาประมวลผลน้อยมาก อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังมีการใช้ข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไปร่วมกับแบบจำลองดังกล่าวด้วย

การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบเนื่องมาจากผลของการบังแสงแดด (Shading) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ประกอบไปด้วยรูปแบบการศึกษามากมายที่สามารถศึกษาเป็นหัวข้อวิจัยเกี่ยวกับผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ [16] ได้พิจารณาถึงผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันเป็นอาร์เรย์ (Array) ขนาดใหญ่โดยมีกระบวนการในการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดเมื่อมีจุดทำงานกำลังสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุดเนื่องจากผลของการบังแสงแดด ซึ่งทำให้กระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดในกรณีปกติที่ไม่มีการบังแสงแดดนั้นจะไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงแดดได้ ดังนั้นเมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุด หากพิจารณาเพียงแค่กระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงแดดแล้วก็ยังสามารถแบ่งหัวข้อการวิจัยแยกย่อยได้อีกมากมายตามแต่ละวิธีการ เช่น การหาจุดทำงานกำลังสูงสุดโดยวิธีการต่างๆ (Optimization) หรือการใช้การประมาณอย่างง่ายเป็นต้น หรืองานวิจัยที่ [17] ได้มีการศึกษาผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยจะสามารถดูได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งภายในงานวิจัยดังกล่าวจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 กรณีศึกษาโดยในแต่ละกรณีศึกษาก็จะมีจุด ประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด หรือศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อม

ต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด หรือศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเชื่อมต่อของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด นอกจากนี้ภายในงานวิจัยจะมีการกล่าวเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีความผิดพลาดภายในกรณีศึกษาเกี่ยวกับกรณีที่ไม่มีบายพาสไดโอด หรืองานวิจัยที่ [18] เป็นการสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด และมีการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลจากการทดลองจริงภายใต้เงื่อนไขการเกิดการบังแสงแดดแบบต่างๆกัน

การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความไม่เข้ากัน (Mismatch) ที่เกิดขึ้นกับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น โดยหลักการแล้วมีความคล้ายคลึงกับผลกระทบเนื่องจากการเกิดการบังแสงแดดอย่างมาก กล่าวคือการเกิดผลกระทบจากความไม่เข้ากันของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเกิดขึ้นเมื่อมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ที่แตกต่างกัน อาจเป็นผลจากการที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันนั้นมาจากผู้ผลิตที่มีกระบวนการเฉพาะที่แตกต่างกันไป ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงมีค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆไม่เท่ากัน เมื่อนำมาทำงานภายใต้สภาวะเดียวกันทั้งอุณหภูมิและความเข้มแสงจึงให้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เท่ากัน ทำให้สภาพโดยรวมของระบบเกิดจุดทำงานกำลังสูงสุดหลายค่า ส่งผลให้ในกระบวนการหาค่ากำลังสูงสุดโดยทั่วไปไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงของระบบได้ ระบบจึงไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามที่ควรจะเป็น ทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบลดลง มีงานวิจัยมากมายที่พยายามนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ [19] เป็นงานวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ทำงานในสภาวะแวดล้อมต่างๆโดยพิจารณาถึงปัจจัยทางความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะปกติ สภาวะที่เกิดการบังแสงแดด และสภาวะที่เกิดความไม่เข้ากันของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยงานวิจัยได้พยายามนำเสนอความแม่นยำของผลลัพธ์เมื่อพิจารณาสมการแบบไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวยังคงเป็นภาระในการคำนวณแก่เครื่องคอมพิวเตอร์กล่าวคือ ใช้ทั้งระบบประมวลผลและหน่วยความจำอย่างสิ้นเปลือง ทว่ามีจุดเด่นคือการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบขับเคลื่อนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยานพาหนะที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมด้วย (Solar hybrid vehicle) ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากในการที่เซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องทำงาน ณ จุดกำลังสูงสุดเพื่อประสิทธิภาพที่สูงสุดอย่างแท้จริง หรืองานวิจัยที่ [20] เป็นงานวิจัยในเชิงของการหากระบวนการในการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดภายใต้สภาวะที่เกิดความไม่เข้ากันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้แบบ



จำลองที่ประกอบไปด้วยสมการไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มีจุดเด่นอยู่ที่การวิเคราะห์แรงดันของแต่ละโมดูลให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันอย่างง่าย (Explicit function) ของกระแสด้วยฟังก์ชัน Lambert-W ทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของสตริง (String) ได้ทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำสูง และยังมีการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองจริง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกประเภทที่มีความสำคัญมากต่อการนำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า นั่นคือระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Generation System: PVGS) ซึ่งรูปแบบของงานวิจัยในเรื่องของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เองนั้นก็ยังมีมากมายหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ [26] ได้ทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะอยู่ตัว (Steady state) เพียงอย่างเดียว โดยจะพิจารณาเกี่ยวกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย ซึ่งจะคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆจุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อยสามส่วนคือ แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ และแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในแต่ละแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เองก็มีหลักการคำนวณที่แตกต่างกันไปและงานวิจัยนี้ยังกล่าวถึงโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกันสองโหมดการทำงาน คือโหมด PV และโหมด PQ และมีการคำนวณร่วมกับการไหลของกำลังไฟฟ้า

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อนำเสนอหลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) พัฒนาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดตามปัจจัยด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์และเปรียบเทียบผลกับการตรวจวัดจริง
- 3) พัฒนาแบบจำลองที่ศึกษาผลของการบังแสงแดด
- 4) พัฒนาแบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของ “ความแตกต่างของแผง” (Mismatch) ของเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) พัฒนาแบบจำลองที่ศึกษาผลของโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

#### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาข้อมูลทางเทคนิคเชิงพาณิชย์ทั่วไปมาพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งประกอบไปด้วย ความเข้มแสง และ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) อุปกรณ์ภายในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลง และฟิลเตอร์
- 4) พิจารณาอินเวอร์เตอร์แบบ Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) เพียงประเภทเดียว
- 5) พิจารณาระบบไฟฟ้าแบบ สามเฟสสมดุล และทำงานในสภาวะอยู่ตัว
- 6) พิจารณาการตรวจวัดกับเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) (Solartron) รุ่น SP120
- 7) พิจารณาระบบทดสอบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบทดสอบ ทำทราาย จำนวน 34 บัส
- 8) ละเอียดผลของแรงดันตกคร่อมบายพาสไดโอดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์และแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งชนิดหนึ่งไดโอดและสองไดโอด
- 2) ศึกษาปัจจัยทางด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งผลถึงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) ศึกษาข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิต
- 4) พัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดที่รองรับข้อมูลทางเทคนิคของแต่ละผู้ผลิตเพื่อเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ ร่วมกับปัจจัยทางด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) พัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดที่รองรับข้อมูลทางเทคนิคของแต่ละผู้ผลิตเพื่อเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ ร่วมกับปัจจัยทางด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

- 6) ทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการตรวจวัดและข้อมูลทางเทคนิคของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120
- 7) เปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดที่พัฒนาขึ้นและผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120
- 8) เปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นและผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120
- 9) เปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดที่พัฒนาขึ้นและผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดที่พัฒนาขึ้น
- 10) ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- 11) พัฒนาแบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- 12) ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของ ความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- 13) ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 14) ศึกษาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า
- 15) ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
- 16) พัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
- 17) ทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากับระบบทดสอบทำทราาย 34 บัส
- 18) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) ฐานข้อมูลของความเข้มแสงและอุณหภูมิ ณ อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ประมวลผลได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปของแต่ละผู้ผลิต ร่วมกับปัจจัยทางความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) แบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) แบบจำลองที่ศึกษาผลกระทบของผลของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) แบบจำลองที่ศึกษาโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- 6) ข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 7) ข้อมูลจากการตรวจวัดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 7 หัวข้อ คือ ที่มาและความสำคัญของปัญหา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และ เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 6 หัวข้อคือ เซลล์แสงอาทิตย์ หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ผลของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และสรุป

บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 4 หัวข้อ คือ ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และสรุป

บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแบ่งการนำเสนอออกเป็น 7 หัวข้อ คือ หลักการหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด หลักการหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ปัจจัยทางความเข้มแสงและอุณหภูมิ ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบสองไดโอด ขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ และสรุป

บทที่ 5 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 หัวข้อ คือ แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ขั้นตอนการคำนวณของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า และสรุป

บทที่ 6 การบังแสงแดด ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 6 หัวข้อ คือ การวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอด ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งอาร์เรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด และสรุป

บทที่ 7 ความแตกต่างของแผง (Mismatch) ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 4 หัวข้อ คือ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียในกรณีเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อแบบขนาน และสรุป

บทที่ 8 โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 หัวข้อ คือ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ในทางปฏิบัติของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การสร้างโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Matlab แบบ

จำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ และสรุป

บทที่ 9 ระบบทดสอบ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระบบทดสอบท่าทราย และสรุป

บทที่ 10 ผลการทดลอง ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 6 หัวข้อ คือ ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด ผลการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองผลกระทบของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 11 การเปรียบเทียบผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 หัวข้อ คือ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ และสรุป

บทที่ 12 สรุปวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอความรู้โดยทั่วไปเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) ซึ่งมีความสำคัญมากในด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด ในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 6 หัวข้อ คือ

- (1) เซลล์แสงอาทิตย์
- (2) หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์
- (3) ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์
- (4) ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (5) ผลของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (6) สรุป

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้มาอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในทางปฏิบัติแล้วมักจะทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นวัสดุหลัก โดยมีจุดเริ่มต้นการนำสารกึ่งตัวนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จากธาตุ ซิลิกอน (Silicon: Si) บริสุทธิ์ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 4 (หรือคอลัมน์ที่ 4) ของตารางธาตุดังแสดงในรูปที่ 2.1 และนอกจากนี้ยังมีธาตุ เจอร์เมเนียม (Germanium: Ge) ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 4 เช่นเดียวกันกับธาตุซิลิกอน ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวนำภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดก่อนจะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน หลังจากนั้นธาตุอื่นๆก็เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญตามมามากขึ้นในการนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ธาตุโบรอน (Boron: B) ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 และธาตุฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ หรือจะเป็นการนำธาตุมากกว่าหนึ่งชนิดมารวมกันเพื่อใช้เป็นตัวนำ เช่น ธาตุ แกลเลียม (Gallium: Ga) นำมารวมกับธาตุ อาร์เซนิกหรือสารหนู (Arsenic: As) กลายเป็นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide: GaAs) หรือธาตุ แคดเมียม (Cadmium: Cd) กับธาตุ เทลลูเรียม (Tellurium: Te) ที่นำมารวมกันกลายเป็น แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium telluride: CdTe) ก็สามารถนำมาใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน [27]

Hydrogen 1 H 1.00794																	Helium 2 He 4.00260	
Lithium 3 Li 6.941	Beryllium 4 Be 9.0122											Boron 5 B 10.811	Carbon 6 C 12.011	Nitrogen 7 N 14.007	Oxygen 8 O 15.999	Fluorine 9 F 18.998	Neon 10 Ne 20.180	
Sodium 11 Na 22.990	Magnesium 12 Mg 24.305											Aluminum 13 Al 26.982	Silicon 14 Si 28.086	Phosphorus 15 P 30.974	Sulfur 16 S 32.065	Chlorine 17 Cl 35.453	Argon 18 Ar 39.948	
Potassium 19 K 39.098	Calcium 20 Ca 40.078	Scandium 21 Sc 44.956	Titanium 22 Ti 47.867	Vanadium 23 V 50.942	Chromium 24 Cr 51.996	Manganese 25 Mn 54.938	Iron 26 Fe 55.845	Cobalt 27 Co 58.933	Nickel 28 Ni 58.693	Copper 29 Cu 63.546	Zinc 30 Zn 65.38	Gallium 31 Ga 69.723	Germanium 32 Ge 72.64	Arsenic 33 As 74.922	Selenium 34 Se 78.96	Bromine 35 Br 79.904	Krypton 36 Kr 83.80	
Rubidium 37 Rb 85.468	Strontium 38 Sr 87.62	Yttrium 39 Y 88.906	Zirconium 40 Zr 91.224	Niobium 41 Nb 92.906	Molybdenum 42 Mo 95.94	Technetium 43 Tc [98]	Ruthenium 44 Ru 101.07	Rhodium 45 Rh 102.91	Palladium 46 Pd 106.42	Silver 47 Ag 107.87	Cadmium 48 Cd 112.41	Indium 49 In 114.82	Tin 50 Sn 118.71	Antimony 51 Sb 121.76	Tellurium 52 Te 127.60	Iodine 53 I 126.905	Xenon 54 Xe 131.29	
Cesium 55 Cs 132.91	Barium 56 Ba 137.33	* 57-70	Lanthanum 57 La 138.91	Hafnium 72 Hf 178.49	Tantalum 73 Ta 180.95	Tungsten 74 W 183.84	Rhenium 75 Re 186.21	Osmium 76 Os 190.23	Iridium 77 Ir 192.22	Platinum 78 Pt 195.08	Gold 79 Au 196.97	Mercury 80 Hg 200.59	Thallium 81 Tl 204.38	Lead 82 Pb 207.2	Bismuth 83 Bi 208.98	Poison 84 Po [209]	Astatine 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	** 89-102	* Actinide series 89 La [227]	Rutherfordium 103 Rf [261]	Dubnium 104 Db [262]	Seaborgium 105 Sg [266]	Berkelium 106 Bk [267]	Californium 107 Cf [271]	Einsteinium 108 Es [272]	Mendelevium 109 Md [273]	Nobelium 110 No [277]	Lawrencium 111 Lr [277]	Uue 112 Uub [277]	Uuq 114 Uuq [277]				
		* Lanthanide series																
		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70			
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			
		138.91	140.12	140.91	144.24	[145]	150.36	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04			
		** Actinide series																
		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102			
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			
		[227]	[232.04]	[231.04]	[238.03]	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[264]			

## รูปที่ 2.1 ตารางธาตุ

(ที่มา: Brewton-Parker College ,[http://www.bpc.edu/mathscience/chemistry/images/periodic\\_table\\_of\\_elements.jpg](http://www.bpc.edu/mathscience/chemistry/images/periodic_table_of_elements.jpg))

โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยจำนวน 3 หัวข้อด้วยกัน คือ

- 2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ว่าหน้าที่ของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานแสงอาทิตย์ให้มาอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่จะทำได้ โดยหัวข้อย่อยนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

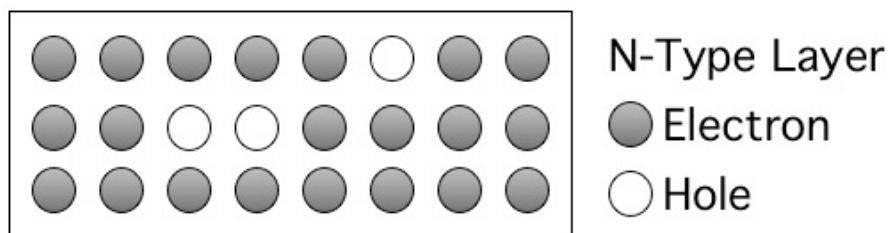
เมื่อแสงอาทิตย์ซึ่งมีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงาน ตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคของแสงอาทิตย์หรือโฟตอน (Photon) ไปสู่ อิเล็กตรอน (Electron) โดยเริ่มพิจารณาจาก ซิลิกอน ซึ่งได้กล่าวไปแล้ว



ว่าเป็นธาตุหมู่ที่ 4 ในตารางธาตุ หมายถึงเป็นธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดจำนวน 4 ตัวต่อซิลิกอน 1 อะตอม

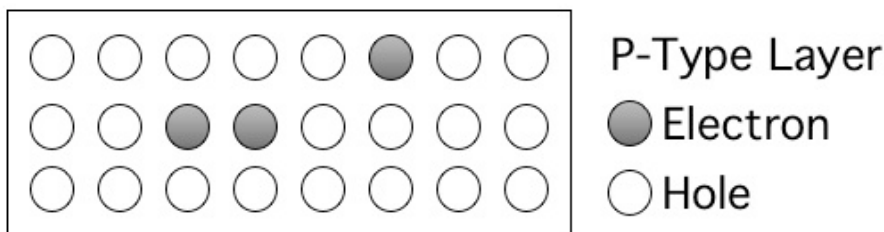
การออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้น จะเริ่มจากการนำซิลิกอนมาทำการปลูกผลึกออกเป็น 2 ชั้น โดยในแต่ละชั้นจะมีสมบัติต่างกันดังนี้ คือ [8],[27], [29]

- ส่วนบน (Upper) หรือส่วนที่อยู่ด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำการโด๊ป (Doping) ให้อยู่ในรูปของ N-type layer ด้วยธาตุฟอสฟอรัส (P) (เป็นธาตุในหมู่ที่ 5 ตามตารางธาตุจึงมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว) โดยภายใน N-type layer จะมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนที่พร้อมจะจ่ายอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามในส่วน N-type layer นี้ยังคงมี โฮล (Hole) ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้น N-type layer นี้จะมีสมบัติเป็นส่วนที่จ่ายอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์



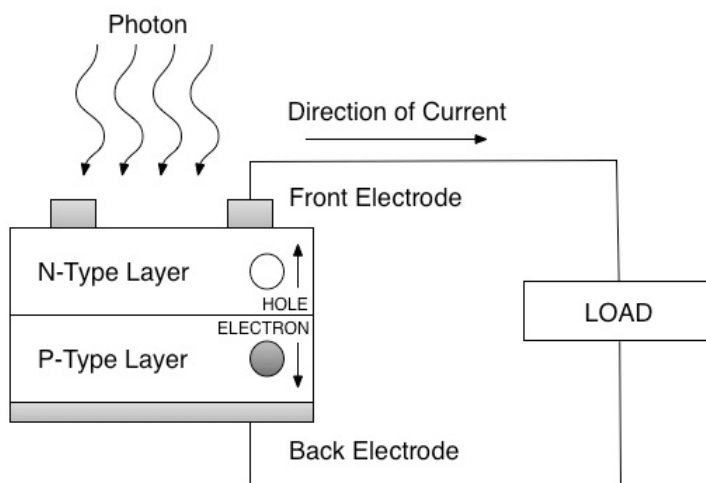
รูปที่ 2.2 ลักษณะของ N-Type Layer

- ส่วนล่าง (Lower) หรือส่วนที่อยู่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำการโด๊ปให้อยู่ในรูปของ P-type layer ด้วยธาตุ โบรอน (B) (เป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ตามตารางธาตุจึงมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว) โดยภายใน P-type layer จะมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นโฮลที่พร้อมจะรับอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามในส่วน P-type layer นี้ยังคงมี อิเล็กตรอนปะปนอยู่บ้างเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้น P-type layer นี้จึงมีโครงสร้างของอะตอมแบบขาดอิเล็กตรอน ทำให้มีสมบัติเป็นส่วนที่รับอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ P-Type Layer

เมื่อนำโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างมาเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 2.4 จะกลายเป็นบริเวณรอยต่อของ N-type layer และ P-type layer เรียกว่า P-N junction ซึ่งเป็นรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สุดที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่อยู่ด้านหน้าของ N-type layer จะมีแถบโลหะที่เรียกว่า Front electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และส่วนที่อยู่ด้านหลังของ P-type layer ก็จะมีแถบโลหะที่เรียกว่า Back electrode ทำหน้าที่เป็นส่วนที่รับโฮล หลังจากการเชื่อมต่อ จนเกิดเป็น P-N junction แล้วบริเวณที่อยู่ตรงกลาง N-type layer และ P-type layer จะเกิดเป็นสนามไฟฟ้า (Depletion region) ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนใน N-type layer เคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อของ P-N junction ไปรวมตัวกับโฮลจากบริเวณ P-type layer จึงทำให้เกิดกลุ่มของอิเล็กตรอนใน P-type layer และกลุ่มของโฮลในบริเวณ N-type layer เกิดเป็นสนามไฟฟ้างดงกล่าว ทั้งนี้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นช่องทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากส่วนที่อยู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ หรือจากโฮล ไปยังส่วนที่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้เชื่อมต่อกับโฮล เมื่อมีแสงอาทิตย์หรือโฟตอนตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนสู่อิเล็กตรอน หากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากเพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมตัวกับโฮล โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านโฮลและ Front electrode เข้าสู่ N-type layer เพื่อหาทางรวมตัวกับโฮล และในทางกลับกันโฮลก็จะวิ่งสวนทางกันกับอิเล็กตรอน โดยผ่านโฮลและ Back electrode เข้าสู่ P-type layer เพื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลวิ่งเข้าหากันดังที่กล่าวมา [7],[8] ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า อาจจะเป็นแสงจากดวงอาทิตย์หรือแสงที่มาจากหลอดไฟก็ตาม โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีมากมายหลายชนิด หัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับประเภทของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะสามารถแบ่งตามกลุ่มของสารประกอบที่นำมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ [37]

- กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน
- กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิกอน

#### 2.1.2.1 กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

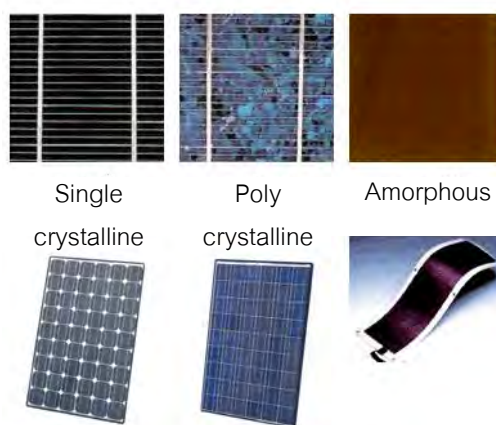
เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมักจะนิยมนำสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนมาใช้ในการผลิต โดยจะแบ่งประเภทของซิลิกอนที่นำมาใช้ในการผลิตได้เป็น 3 ประเภท คือ

- ▶ เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยวซิลิกอน (Single crystalline silicon solar cell หรือ c-Si) เนื่องจากซิลิกอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุด เพราะซิลิกอนนั้นเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ง่ายที่สุดในโลก จากกระบวนการถลุงหินและทราย ทำให้ซิลิกอนมักจะนิยมใช้เป็นสาร

กึ่งตัวนำในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซี เป็นต้นสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si นั้นได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ในชนบทที่ห่างไกลความเจริญ หรือในพื้นที่ที่การเข้าถึงของสาธารณูปโภคไฟฟ้าเข้าถึงได้ยาก เช่น บนดอยทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นต้น

- ▶ เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกพอลิซิลิกอน (Poly crystalline silicon solar cell หรือ pc-Si) เป็นผลมาจากความพยายามในการลดต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ c-Si จึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยี pc-Si ขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตของ pc-Si ต่ำกว่า c-Si ร้อยละ 10 ทำให้เทคโนโลยี pc-Si เองก็ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเช่นกัน
- ▶ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous silicon solar cell หรือ a-Si) นี้จัดเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิกอนเช่นกันแต่ไม่ได้ทำให้อยู่ในรูปของผลึก ผลของสารจำพวกอะมอร์ฟัสซิลิกอนจะทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางของซิลิกอน ซึ่งมีความบางเพียง 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และมีจุดเด่นคือไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มักพบเห็นในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนประเภทต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

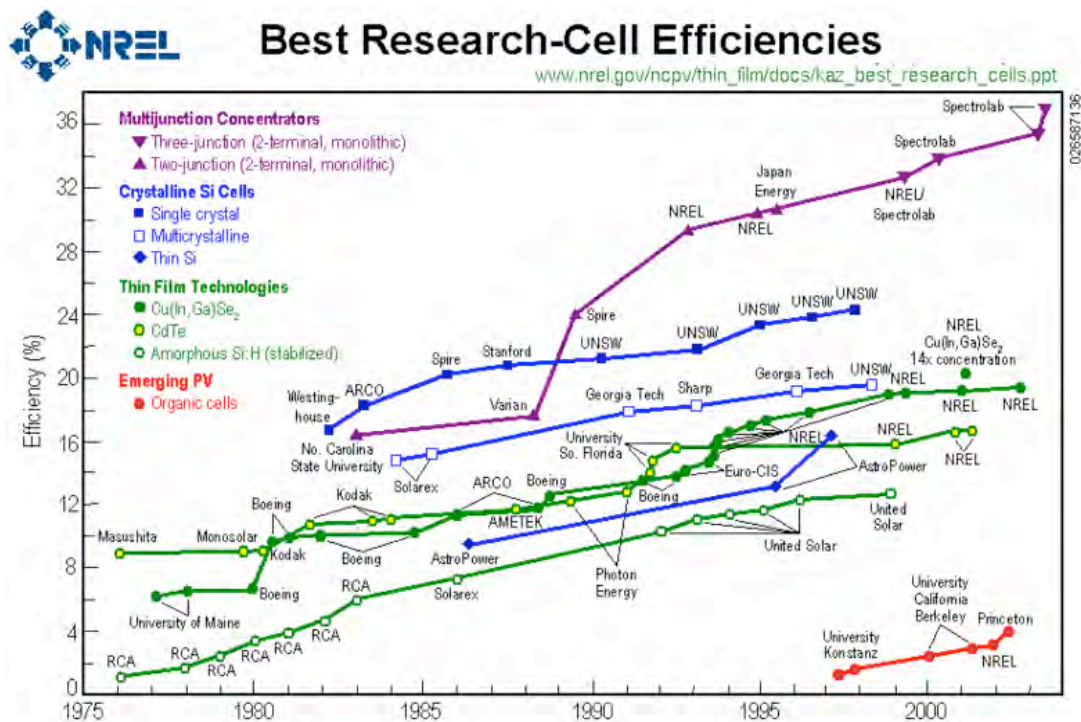


รูปที่ 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนประเภทต่างๆ  
(ที่มา: National Renewable Energy Laboratory (NREL), <http://www.nrel.gov/pv/>)

### 2.1.2.2 กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือประสิทธิภาพสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ทว่ามีราคาที่สูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก โดยมากมักจะใช้งานในอวกาศ เช่น ดาวเทียมและระบบรวมแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ (Concentrating solar power) แต่การพัฒนากระบวนการผลิตที่ต่อเนื่องจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีราคาต่ำลง และมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต (ในปัจจุบันมีการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้เพียง 7 เปอร์เซ็นต์จากทั้งหมด) โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และ คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CIS) เป็นต้น โดยจะมีทั้งในรูปแบบผลึกเดี่ยว (Single crystalline) และ แบบผลึกพอลิ (Poly crystalline)

โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผลึกเดี่ยวซิลิกอน ประเภทผลึกพอลิซิลิกอน และประเภทฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอนที่ผ่านมาในแต่ละปี สามารถแสงได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ  
(ที่มา: National Renewable Energy Laboratory (NREL), <http://www.nrel.gov/pv/>)

### 2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นได้รับความนิยมสูงมากเป็นอันดับต้นๆของพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นก็ยังมีข้อเสียหลายประการ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อดีของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หลายประการดังนี้ คือ [30]

- เชื้อเพลิงของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมาจากแสงอาทิตย์เป็นหลักซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานสะอาด และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม
- เชื้อเพลิงที่ได้มาจากแสงอาทิตย์นั้นเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีวันหมดไปจากโลก และไม่มีต้นทุนในการขนส่ง
- เชื้อเพลิงจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเข้าถึงได้จากทุกพื้นที่บนผิวโลก
- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่น้อยมาก

อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังคงมีข้อเสียอยู่บ้างในทางปฏิบัติดังนี้ คือ

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแหล่งพลังงานหลักจากแสงอาทิตย์ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตามสภาพอากาศ
- ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่มีแบตเตอรี่ที่จะสามารถเก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ และแบตเตอรี่ยังมีราคาที่สูงมาก
- ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำ แม้ว่าความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์จะไม่มีวันหมด แต่ความเข้มแสงนั้นมีขอบเขตของความเข้มที่จำกัดอยู่ในระดับหนึ่ง จึงทำให้พลังงานที่ผลิตได้มีขอบเขตที่จำกัด
- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีราคาค่อนข้างสูง

## 2.2 หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนของหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 หัวข้อ คือ

- แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์
- ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิต่อเซลล์แสงอาทิตย์

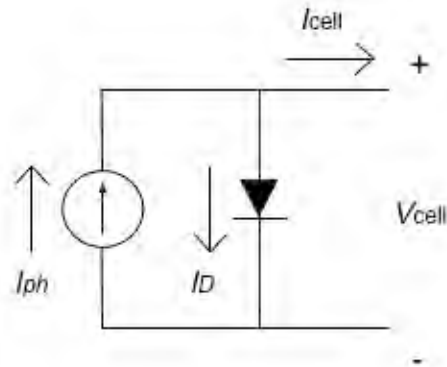
### 2.2.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.4 นั้นแสดงถึงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ N-type layer และ P-type layer เข้าด้วยกันเกิดเป็นบริเวณรอยต่อ P-N junction เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บริเวณขั้วของเซลล์ เมื่อทำการเชื่อมให้ครบวงจรก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร หัวข้อนี้จะพิจารณาแบบจำลองวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลอง 4 ประเภท คือ [7],[13],[23]

- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ
- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณ
- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอด
- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอด

#### 2.2.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ

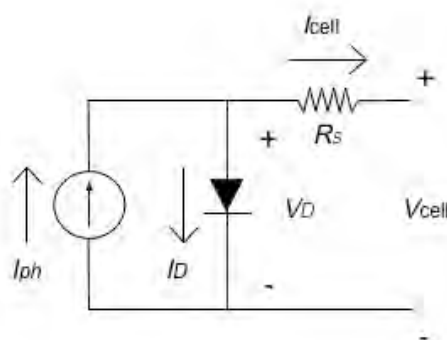
แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคตินั้นประกอบไปด้วยองค์ประกอบ (Element) ทางไฟฟ้าเพียง 2 องค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ และ ไดโอด อย่างไรก็ตามแบบจำลองชนิดนี้จะไม่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ เพราะในความเป็นจริงไม่มีเซลล์แสงอาทิตย์ใดที่สามารถถือได้ว่าประพฤติตัวตามแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติหนึ่งเซลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคตินี้จะมีการปรับปรุงเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติต่อไป ดังนั้นรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะมีการอธิบายในลำดับถัดไปพร้อมกับรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.7 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติขนาดหนึ่งเซลล์

### 2.2.1.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณ

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณนี้จะมีบางส่วนคล้ายคลึงกันกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณนี้จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายกระแส อุดมคติ ไดโอด และความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ซึ่งงานวิจัยต่าง ๆ นิยมนำแบบจำลองชนิดนี้มาใช้ในการคำนวณ โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.8 และแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณนี้จะมีการปรับปรุงเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติต่อไป ดังนั้นรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะมีการอธิบายในลำดับถัดไปพร้อมกับรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ

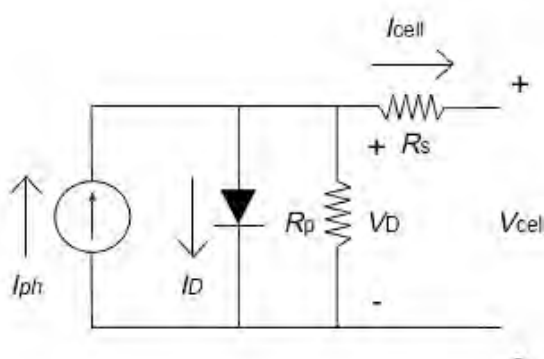


รูปที่ 2.8 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณขนาดหนึ่งเซลล์



### 2.2.1.3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอด

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดนี้จะมีบางส่วนคล้ายคลึงกันกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบประมาณ โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดนี้จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า 4 องค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ไดโอด ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม และความต้านทานสมมูลต่อขนาน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติทั้งชนิดหนึ่งไดโอดและชนิดสองไดโอดในการวิจัยร่วมกัน โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.9 และแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดนี้ จะมีการปรับปรุงกลายเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดต่อไป ดังนั้นรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะมีการอธิบายในลำดับถัดไปพร้อมกับรายละเอียดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอด

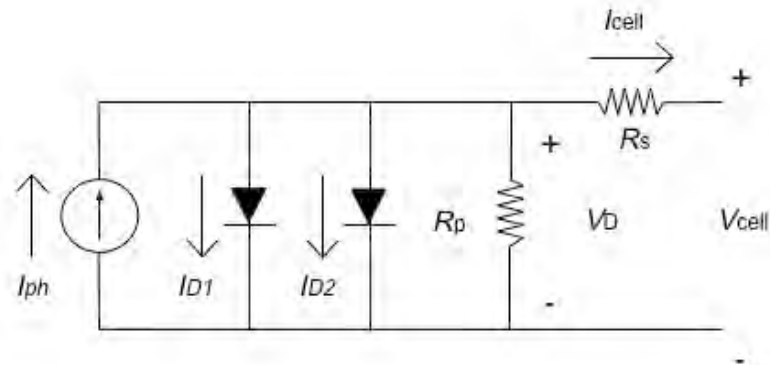


รูปที่ 2.9 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอดขนาดหนึ่งเซลล์

### 2.2.1.4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอด

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดนี้จะมีบางส่วนคล้ายคลึงกันกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบหนึ่งไดโอด โดยที่แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดนี้จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางไฟฟ้า 5 องค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ ไดโอดตัวที่หนึ่ง ไดโอดตัวที่สอง ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม และความต้านทานสมมูลต่อขนาน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติทั้งชนิดหนึ่ง

ไดโอดและชนิดสองไดโอดในการวิจัยร่วมกัน โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดขนาดหนึ่งเซลล์

จากรูปที่ 2.10 แสดงทิศทางของกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติได้ดังรูป จากภาพจะสามารถเขียนสมการเคอร์ชอฟ (Kirchhoff) ของกระแส (Kirchhoff's Current Law: KCL) ซึ่งมีหลักว่า “ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้า ณ จุดใดๆ จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากจุดนั้น” แสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.1) [7]

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{Rp} \quad (2.1)$$

โดย

- |            |     |  |
|------------|-----|--|
| $I_{cell}$ | คือ | กระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)  |
| $I_{ph}$   | คือ | กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ (Photoelectric current) ที่เกิดขึ้นจากความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A) |
| $I_{D1}$   | คือ | กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่หนึ่ง (Diode 1) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)                                     |
| $I_{D2}$   | คือ | กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่สอง (Diode 2) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)                                       |

$I_{cell}$	คือ	กระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)
$I_{Rp}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)

และจากสมการที่ (2.1) นั้นจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ( $V_{cell}$ ) ได้ โดยจะเริ่มจากการพจน์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดทั้งสองตัวและพจน์ของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานสมมูลต่อขนานให้อยู่ในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ( $V_D$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) ตามลำดับ

$$I_{D_j} = I_{o_j} \left[ \exp\left(\frac{V_D}{a_j V_{th}}\right) - 1 \right]_{j=1,2} \quad (2.2)$$

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} \quad (2.3)$$

โดย

$I_{D_j}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่ $j$ ( $j=1,2$ ) (A)
$I_{o_j}$	คือ	กระแสอิ่มตัว (Saturation current) ของไดโอดตัวที่ $j$ ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)
$V_D$	คือ	แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ โดยมีทิศทางดังรูปที่ 2.10 (V)
$a_j$	คือ	แฟกเตอร์อุดมคติ (Ideality factor) ของไดโอดตัวที่ $j$ ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ซึ่งบอกถึงความใกล้เคียงกับความเป็นอุดมคติ ( $a = 1$ ) ของไดโอด โดยจะมีค่าตามแต่เทคโนโลยีของผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะนำมาใช้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 [21]

- $I_{D_j}$  คือ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่  $j$  ( $j=1,2$ ) (A)
- $V_{th}$  คือ ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (Threshold voltage) ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) (V)
- $R_p$  คือ ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.10 ( $\Omega$ )

ตารางที่ 2.1 แฟกเตอร์อุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	$a$ (Ideality factor)	$E_g$ (eV)
Single-Si	1.026	1.12
Poly-Si	1.025	1.14
a-Si:H	1.8	1.65
a-Si:H tandem	3.3	2.9
a-Si:H triple	3.09	1.6
CdTe	1.5	1.48
CIS	1.5	1
AsGa	1.3	1.43

หมายเหตุ :  $E_g$  คือช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ทำไดโอด

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (2.4)$$

โดย

$k$	คือ	ค่าคงตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่า $1.38 \times 10^{-23}$ j/K
$T$	คือ	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
$q$	คือ	ค่าประจุของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่า $1.6 \times 10^{-19}$ (C)

เมื่อนำค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดจากสมการที่ (2.2) และค่าของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานสมมูลต่อขนานจากสมการที่ (2.3) ไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.1) จะได้ดังสมการที่ (2.5)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{V_D}{a_1 V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{V_D}{a_2 V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_D}{R_p} \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.10 จะพบว่าค่าของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและค่าของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.6)

$$V_D = V_{cell} + I_{cell} R_s \quad (2.6)$$

โดย

$V_{cell}$	คือ	ค่าแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (V)
$R_s$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.10 ( $\Omega$ )

เมื่อนำความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) มารวมกันจะสามารถเขียนสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ได้ ดังสมการที่ (2.7)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{a_1 V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{a_2 V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_p} \quad (2.7)$$

และสำหรับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์แบบหนึ่งไดโอด ก็สามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกันกับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์แบบสองไดโอดเพียงแต่จะไม่มีพจน์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่สองดังสมการที่ (2.8)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{a_1 V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_p} \quad (2.8)$$

## 2.2.2 ผลของอุณหภูมิและความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ผลของอุณหภูมิและความเข้มแสงนั้นเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการทำงานในแต่ละพื้นที่ที่ไม่เท่ากัน และจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆภายในแต่ละวันตามปัจจัยทั้งสอง ดังนั้นเพื่อผลของแบบจำลองที่แม่นยำจึงต้องมีการพิจารณาผลของอุณหภูมิและความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

### 2.2.2.1 อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น โดยปกติจะมีค่าไม่เท่ากับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม และเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ทำให้จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์สองตัวคือ แรงดันเปิดวงจรและกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่แตกต่างกันไปตามแต่เทคโนโลยีของแต่ละผู้ผลิต ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในปริมาณที่แตกต่างกันไปตามแต่เทคโนโลยีของแต่ละผู้ผลิตเช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ [9],[11],[21]

$$I_{ph,T} = I_{ph,T_{ref}} + K_i(T - T_{ref}) \quad (2.9)$$

$$V_{OC,T} = V_{OC,T_{ref}} + K_v(T - T_{ref}) \quad (2.10)$$

โดย

$I_{ph,T}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ อุณหภูมิ $T$ Kelvin (A)
$I_{ph,T_{ref}}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ อุณหภูมิ $T_{ref}$ Kelvin (A)
$T$	คือ	อุณหภูมิ ณ ขณะที่พิจารณา หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป จาก $T_{ref}$ Kelvin หรืออุณหภูมิที่ทำให้ค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าเป็น $I_{ph,T}$ A (K)
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิที่ทำให้ค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าเป็น $I_{ph,T_{ref}}$ A (K)
$K_i$	คือ	ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (A/K)
$K_v$	คือ	ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (V/K)
$V_{OC,T}$	คือ	แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ อุณหภูมิ $T$ Kelvin (V)
$V_{OC,T_{ref}}$	คือ	แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ อุณหภูมิ $T_{ref}$ Kelvin (V)

#### 2.2.2.2 ความเข้มแสง

ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์เองนั้นเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์สองค่า คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการ

เปลี่ยนแปลงของกระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มแสง กล่าวคือเมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ซึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มแสงด้วยเช่นกัน ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ซึ่งค่าความเข้มแสงมาตรฐานคือค่าความเข้มแสงบริเวณพื้นผิวโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$  (หรือ  $1 \text{ Sun}$ ) ที่ AM มีค่าเป็น  $1.5$  โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปกับค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.11) [9],[11],[21]

$$I_{ph,G} = I_{ph,G_{ref}} \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (2.11)$$

โดย

$I_{ph,G}$  คือ กระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ ความเข้มแสง  $G \text{ W/m}^2$  (A)

$I_{ph,G_{ref}}$  คือ กระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ณ ความเข้มแสง  $G_{ref} \text{ W/m}^2$  (A)

$G$  คือ ค่าความเข้มแสง ณ ขณะที่พิจารณา หรือค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจาก  $G_{ref} \text{ W/m}^2$  หรือค่าความเข้มแสงที่ทำให้ค่ากระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเป็น  $I_{ph,G} \text{ A}$  ( $\text{W/m}^2$ )

$G_{ref}$  คือ ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ค่ากระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเป็น  $I_{ph,G} \text{ A}$  ( $\text{W/m}^2$ )

อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มแสงนี้จะส่งผลต่อแรงดันเปิดวงจรเช่นกันแต่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จึงไม่ขอกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน เมื่อค่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.12) [21]

$$R_{p,G} = R_{p,G_{ref}} \left( \frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (2.12)$$



โดย

$R_{p,G}$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ขณะที่ค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $G \text{ W/m}^2$ ( $\Omega$ )
$R_{p,G_{ref}}$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ขณะที่ค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $G_{ref} \text{ W/m}^2$ ( $\Omega$ )

### 2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ (Commercial data sheet) คือ ค่าพารามิเตอร์รายละเอียดเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิต ซึ่งค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวได้มาจากการทดลองภายในห้องปฏิบัติการหรือห้องทดลองของแต่ละผู้ผลิต โดยข้อมูลนี้จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์พื้นฐานจำนวน 8 ตัว ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่วัดจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (ไม่ใช่หนึ่งเซลล์) ดังนั้นแบบจำลองในทางปฏิบัติที่นำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้จึงจะต้องเป็นรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล

สำหรับสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆมากมายเพื่อนำใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากแต่ละผู้ผลิตยังไม่เพียงพอสำหรับการหาค่าดังกล่าว จึงต้องมีการพัฒนาหลักการคำนวณแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มเติมโดยใช้ข้อมูลทางเทคนิคที่แต่ละผู้ผลิตกำหนดมา

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตส่วนใหญ่จะมีเทคโนโลยีในการผลิตที่แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้วข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรายจะมีการกำหนดที่คล้ายกัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากผู้ผลิตนั้นมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิและความเข้มแสงมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) คือ สภาวะที่มีอุณหภูมิเป็น  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $278 \text{ K}$  และค่าความเข้มแสงที่  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่ AM. 1.5 ซึ่งข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ของโมดูล (Module) ซึ่งจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 8 ตัวได้แก่

- กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ (Maximum Power:  $P_{MPP}$ , (W))
- แรงดันเมื่อเกิดกำลังสูงสุด (Maximum Power Voltage:  $V_{MPP}$ , (V))

- กระแสเมื่อเกิดกำลังสูงสุด (Maximum Power Current:  $I_{MPP}$ , (A))
- แรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage:  $V_{OC}$ , (V))
- กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current:  $I_{SC}$ , (A))
- ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (Temperature Coefficient short circuit:  $K_i$  (A/K))
- ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน (Temperature Coefficient open circuit:  $K_v$  (V/K))
- จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (Number of cell per module:  $N_s$ )

จากข้อมูลทางเทคนิคที่กล่าวไปแล้วนั้น สามารถแสดงตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท เคียวเซร่า จำกัด (Poly-crystalline) [31] บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) (Poly-crystalline) [32] บริษัท เซลล์ จำกัด (Single-crystalline) [33] ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท เคียวเซร่า จำกัด รุ่น KC200GT

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าของ
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	200.143 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	26.3 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.61 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ )	8.21 (A)
ค่าคงตัวของ การเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.00318 (A/K)
ค่าคงตัวของ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.123 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	54

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทางเทคนิคเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120

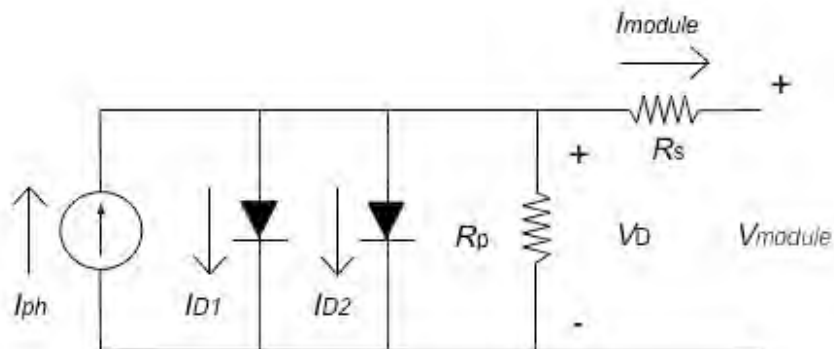
ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าของ
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	130.13 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	16.9 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.70 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	22.0 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.20 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.0005 (A/K)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.0036 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	36

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคเซลล์แสงอาทิตย์บริษัท เซลล์ จำกัด (มหาชน) รุ่น SP70

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าของ
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	70 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	16.5 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	4.25 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	21.4 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	4.7 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.002 (A/K)

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าของ
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_V$ )	-0.076 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	36

โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมซื้อขายกันในท้องตลาดนั้นจะอยู่ในรูปแบบของโมดูล ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ปรากฏในตารางที่ 2.2 ถึงตารางที่ 2.4 จึงเป็นพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ทว่าแบบจำลองในรูปที่ 2.7 ถึง 2.10 ที่ได้นำเสนอไปนั้นเป็นแบบจำลองในรูปแบบของเซลล์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโมดูลนั้นมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองหนึ่งเซลล์ ซึ่งแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดขนาดหนึ่งโมดูลนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 [25]



รูปที่ 2.11 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติแบบสองไดโอดขนาดหนึ่งโมดูล

และจากรูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดหนึ่งโมดูล สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.13) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการที่ (2.7)

$$I_{module} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{V_{module} + I_{module} R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{V_{module} + I_{module} R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{R_p} \quad (2.13)$$

โดย

$I_{module}$	คือ	กระแสที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (A)
$V_{module}$	คือ	แรงดันที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (V)
$I_{ph}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (A)
$I_{o_j}$	คือ	กระแสอิ่มตัว (Saturation current) ของไดโอดตัวที่ $j$ ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (A)
$a_j$	คือ	แฟกเตอร์อุดมคติ (Ideality factor) ของไดโอดตัวที่ $j$ ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล
$V_{th}$	คือ	ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (Threshold voltage) ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) (V)
$R_p$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.11 ( $\Omega$ )
$R_s$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 2.11 ( $\Omega$ )
$N_s$	คือ	จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล

และสำหรับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลแบบหนึ่งไดโอด ก็สามารถเขียนได้ในลักษณะเดียวกันกับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์แบบสองไดโอด เพียงแต่จะไม่มีพจน์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่สอง ดังสมการที่ (2.14) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสมการที่ (2.8)

$$I_{module} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{a N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{R_p} \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตาม หลักการของความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2.2 นั้นยังคงสามารถใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลได้เช่นกัน เพียงแต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของความเข้มแสงและอุณหภูมินั้นจะต้องเป็นพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลด้วย ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 เรื่อง การพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

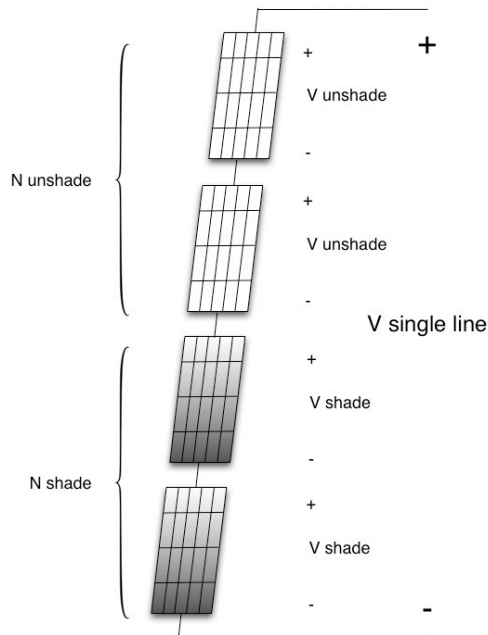
## 2.4 ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

การบังแสงแดด (Shading) หรือการบังเงา (Shadowing) นั้นส่วนใหญ่มักจะมีสาเหตุหลายประการ เช่น ใบไม้ สิ่งก่อสร้าง และเมฆที่เคลื่อนที่ผ่าน เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานที่ผลิตออกมาได้ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงอย่างมาก และเมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้นจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังนั้นมีอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดนั้นจะทำหน้าที่เป็นโหลดทางไฟฟ้าแทนที่จะทำหน้าที่จ่ายพลังงาน ดังที่จะกล่าวต่อไป [16]

เมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้นนั้น ผลที่ตามมาคือค่าความเข้มของแสงอาทิตย์มีค่าลดลง ส่งผลให้ต้องนำหลักการเกี่ยวกับความเข้มแสงที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2.2 มาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนนั้นจะส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนสองค่า คือ ค่ากระแสไฟโตอีเล็กทริกส์ และค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน [21]

ปัญหาอีกประการหนึ่งของการเกิดการบังแสงแดดต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ เมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้นจะส่งผลให้จุดทำงานกำลังสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีได้หลายค่า (Multiple peak) จุดทำงานกำลังสูงสุดเดิมในขณะที่ไม่เกิดการบังแสงแดดอาจเป็นจุดทำงานที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดของระบบหรือไม่ก็ได้ หากกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) ที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ไม่ใช่กระบวนการ Optimization ที่มีประสิทธิภาพพอก็จะไม่สามารถหาจุดทำงานกำลังสูงสุดของระบบ (Global maximum power point) พบทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้านั้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็น สำหรับรายละเอียดในส่วนนี้จะกล่าวถึงในลำดับต่อไปของหัวข้อนี้

แบบจำลองที่ศึกษาการบังแสงแดดของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่ายจะเริ่มจากการพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดและไม่เกิดการบังแสงแดดกรณีที่มีการต่อร่วมกันแบบอนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการศึกษาการบังแสงแดดอย่างง่าย

จากรูปที่ 2.12 จะพบว่าในหนึ่งแถว (String) ของเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังแสงแดดจำนวน  $N_{shade}$  โมดูล และเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ไม่ถูกบังแสงแดดจำนวน  $N_{unshade}$  โมดูล นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานอื่นๆยังคงเป็นดังเช่นที่กล่าวไปในหัวข้อที่ผ่านมา โดยแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแถว ( $V_{Single\ line}$ ) สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.15) [21]

$$V_{Single\ line} = N_{unshade} V_{unshade} + N_{shade} V_{shade} \quad (2.15)$$

โดย

- $V_{Single\ line}$  คือ แรงดันของการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกันในหนึ่งแถว จำนวน  $N_{unshade} + N_{shade}$  โมดูล (V)
- $V_{unshade}$  คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ไม่ได้เกิดการบังแสงแดด (V)

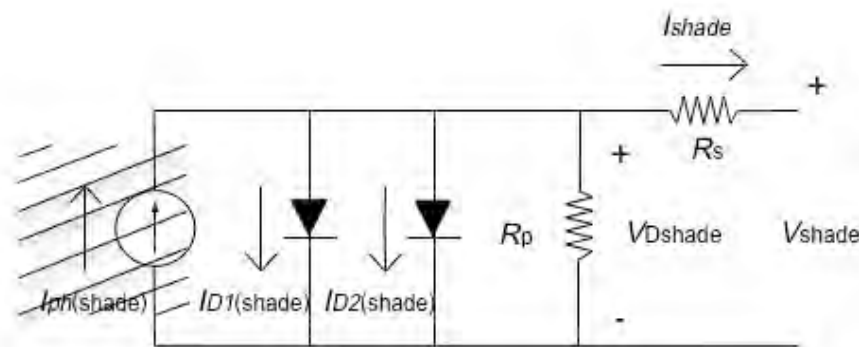
$V_{shade}$	คือ	แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด (V)
$N_{unshade}$	คือ	จำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด
$N_{shade}$	คือ	จำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด

จากสมการที่ (2.15) จะพบว่า แรงดันของการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกันในหนึ่งแถว ( $V_{single\_line}$ ) นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่จะต้องคำนวณออกมาเพื่อวิเคราะห์สถานะการของการบังแสงแดด โดยในที่นี้สามารถแบ่งหลักการคำนวณหาแรงดันของการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกันในหนึ่งแถวออกเป็น 2 กรณีคือ

- กรณีการบังแสงแดดโดยยังคงมีความเข้มแสงเหลืออยู่ ( $G > 0 \text{ W/m}^2$ )
- กรณีการบังแสงแดดโดยไม่มีมีความเข้มแสงเหลืออยู่ ( $G = 0 \text{ W/m}^2$ )

#### 2.4.1 กรณีการบังแสงแดดโดยยังคงมีความเข้มแสงเหลืออยู่

กรณีการบังแสงแดดกรณีนี้แม้ว่าโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการบังแสงแดดขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความเข้มแสงหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ส่งผลให้โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังคงทำหน้าที่จ่ายพลังงานออกมาได้ในช่วงของกระแสบางส่วน แต่เนื่องจากความเข้มแสงที่ลดลงทำให้พลังงานที่ผลิตได้มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ในเบื้องต้นขอให้อภิปรายแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดก่อน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดด



จากรูปที่ 2.13 เมื่อเขียนสมการ KCL ของกระแส จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

$$I_{shade} = I_{ph(shade)} - I_{D1(shade)} - I_{D2(shade)} - I_{Rp} \quad (2.16)$$

โดย

$I_{shade}$	คือ	กระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล เมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$I_{ph(shade)}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ (Photoelectric current) ที่เกิดขึ้นจากความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล เมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$I_{D1(shade)}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่หนึ่ง (Diode 1) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล เมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$I_{D2(shade)}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านไดโอดตัวที่สอง (Diode 2) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล เมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$I_{Rp}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล เมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)

จากสมการที่ (2.16) จะพบว่าความสัมพันธ์ของกระแสและของแรงดันเมื่อเกิดการบังแสงแดดของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.17)

$$I_{shade} = I_{ph(shade)} - I_{o1(shade)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2(shade)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{R_{p(shade)}} \quad (2.17)$$

โดย

$V_{shade}$	คือ	แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อเกิดการบังแสงแดด (V)
$I_{o1(shade)}$	คือ	กระแสอิ่มตัวของไดโอดตัวที่หนึ่งเมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$I_{o2(shade)}$	คือ	กระแสอิ่มตัวของไดโอดตัวที่สองเมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)
$R_{p(shade)}$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อเกิดการบังแสงแดด ( $\Omega$ )

จากสมการที่ (2.17) จะพบว่าสมการที่ได้เป็นสมการไม่เชิงเส้นซึ่งมีความซับซ้อน การจัดรูปสมการเพื่อแก้หาค่าพารามิเตอร์เป็นเรื่องยาก ทำให้ต้องมีการประยุกต์วิธีอย่างง่ายขึ้นซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.4.2 กรณีการบังแสงแดดโดยไม่มีความเข้มแสงเหลืออยู่

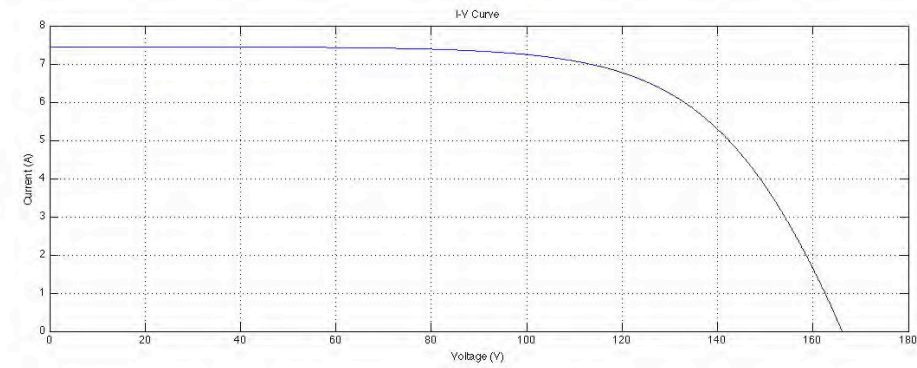
กรณีการบังแสงแดดกรณีนี้มีลักษณะของแบบจำลองเหมือนกับรูปที่ 2.13 ดังที่ได้นำเสนอไปแล้ว ทว่าในกรณีนี้เนื่องจากไม่มีค่าความเข้มแสงเหลืออยู่ จึงส่งผลให้ค่าของ กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดการบังแสงแดดกรณีนี้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ เป็นเพียงแค่โหลดเท่านั้น โดยมีสมการของความสัมพันธ์ของกระแสและของแรงดันเมื่อเกิดการบังแสงแดดของเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (2.18)

$$I_{shade} = -I_{o1(shade)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2(shade)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{shade} + I_{shade}R_s}{R_{p(shade)}} \quad (2.18)$$

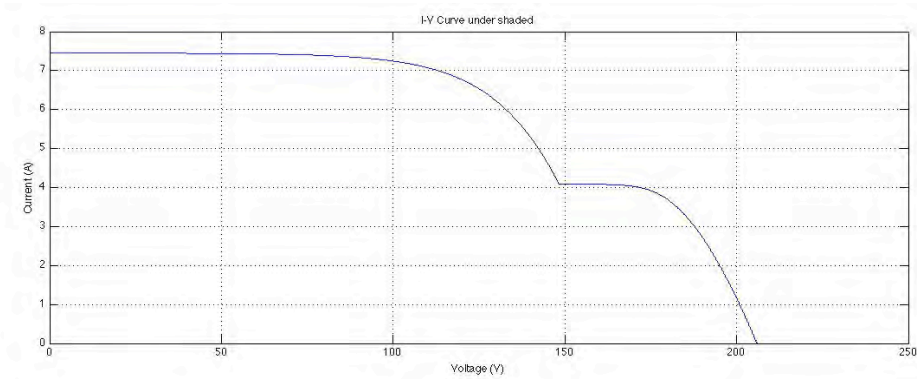
#### 2.4.3 ผลของการบังแสงแดดต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วถึงผลของการบังแสงแดดต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดเซลล์แสงอาทิตย์และกระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) ในหัวข้อย่อยนี้จึงขอนำเสนอลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดัน และ กำลังไฟฟ้าและแรงดัน เปรียบเทียบในกรณีปกติและกรณีที่เกิดการ

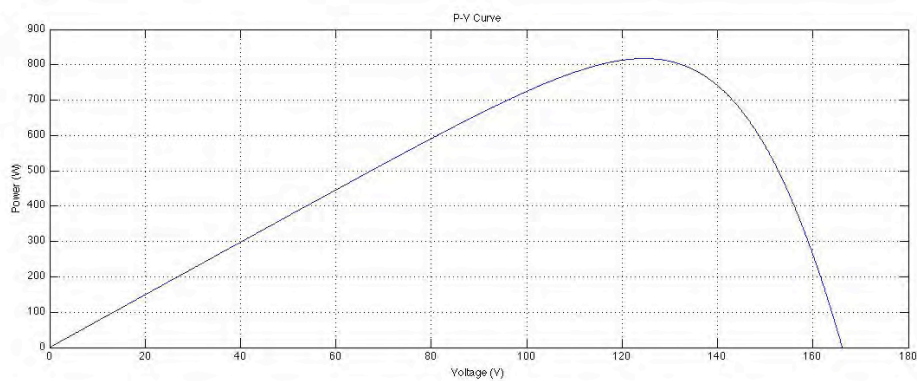
บั้งแสงแดดเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน และ กำลังไฟฟ้าและแรงดันตามลำดับ



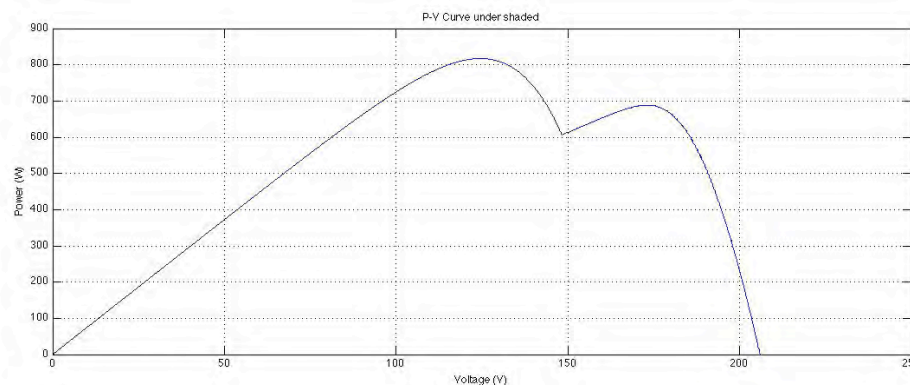
รูปที่ 2.14ก ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อไม่มีการบั้งแสงแดด



รูปที่ 2.14ข ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อเกิดการบั้งแสงแดด



รูปที่ 2.15ก ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันเมื่อไม่มีการบั้งแสงแดด

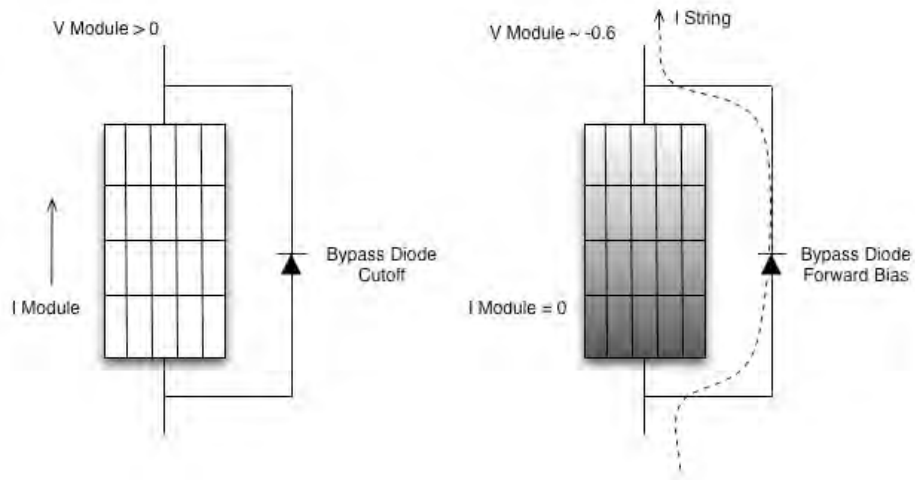


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อเกิดการบังแสงแดด

จากรูปที่ 2.15 จะพบว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดมีมากกว่าหนึ่งจุด (Multiple peak) ส่งผลให้กระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดอาจไม่สามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร หากกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดไม่สามารถหาจุดสูงสุดตลอดช่วง (Global peak) ได้ กล่าวคือเมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้น การหาจุดทำงานกำลังสูงสุดต้องสามารถแยกแยะความแตกต่างของจุดสูงสุดตลอดช่วง (ซึ่งให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุดของกรณีเกิดการบังแสงแดด) และจุดสูงสุดเฉพาะช่วง (Local peak) ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงการทำงานที่จำกัด และมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับจุดสูงสุดตลอดช่วงออกจากกันได้ [19],[20]

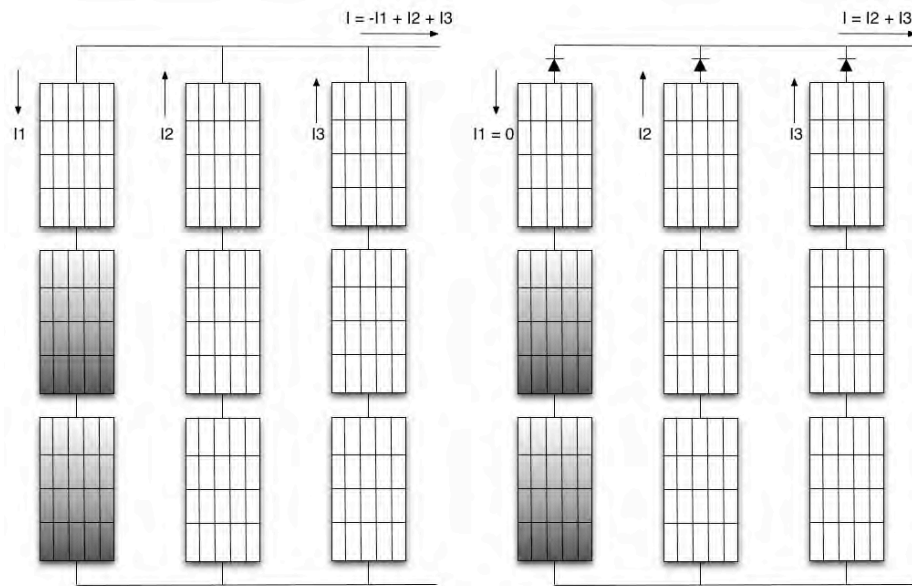
#### 2.4.4 บายพาสไดโอดและบล็อกกิ้งไดโอด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.1 และ 2.4.2 ถึงการเกิดผลกระทบต่อแบบจำลองเมื่อเกิดการบังแสงแดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกระแสไฟโตอิลเล็กทรอนิกส์ลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์โมดูลที่เกิดการบังแสงแดดเนื่องจากกระแสของแถวที่ไหลผ่านค่าความต้านทานสมมูลทั้งสองตัว หรือกล่าวคือเซลล์แสงอาทิตย์จะกลายเป็นโหลดและทำให้เกิดกำลังสูญเสียอย่างมาก จึงมักมีการต่อบายพาสไดโอดขนานกับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อช่วยลดแรงดันตกคร่อมให้ มีค่าลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ โดยการต่อบายพาสไดโอดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.16 [7]



รูปที่ 2.16 การต่อบายพาสไดโอด

จากรูปที่ 2.16 จะพบว่า เมื่อไม่เกิดการบังแสงแดดบายพาสไดโอดจะอยู่ในช่วง คัดออฟ (Cutoff) และไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่เมื่อเกิดการบังแสงแดดบายพาสไดโอด จะอยู่ในช่วงฟอเวิร์ดไบแอส (Forward bias) และยอมให้กระแสที่มาจากโมดูลอื่นไหล ผ่าน ทำให้แรงดันตกคร่อมโมดูลมีค่าต่ำมากและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ในระดับหนึ่ง และสำหรับกรณีของแถวที่ประกอบด้วยโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม กันหากนำมาต่อขนานกัน เมื่อแถวใดแถวหนึ่งเกิดการบังแสงแดดจะทำให้แถวที่เกิด การบังแสงแดดมีกระแสรวมของแถวลดลง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการดึงกระแสรวมที่ได้ จากการผลิตเข้าสู่แถวที่เกิดการบังแสงแดด ทำให้กระแสรวมที่ได้มีค่าลดลง โดยทั่วไป จึงนิยมติดไดโอดเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแสให้อยู่ในทิศของการจ่ายกระแส ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้นเรียกว่าบัสล็อกกิ้งไดโอดดังแสดงได้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลของกระแสรวมในกรณีที่มีบล็อกกิ้งไดโอดและกรณีที่ไม่มีบล็อกกิ้งไดโอด

## 2.5 ผลของความแตกต่างของแผง (Mismatch) ต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงเรื่องของผลของความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ ว่าโดยหลักการแล้วมีความคล้ายคลึงกับผลกระทบเนื่องจากการเกิดการบังแสงแดดอย่างมาก กล่าวคือ การเกิดผลกระทบจากความไม่เข้ากันของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเกิดขึ้นเมื่อมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ที่แตกต่างกัน อาจเป็นผลจากการที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันนั้นมาจากผู้ผลิตที่มีกระบวนการเฉพาะที่แตกต่างกันไป ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงมีค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆไม่เท่ากัน เมื่อนำมาทำงานภายใต้สภาวะเดียวกันทั้งอุณหภูมิและความเข้มแสงจึงให้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่างกัน (เปรียบดังกรณีของการบังแสงแดดที่เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีค่าลักษณะเฉพาะเหมือนกันแต่ทำงานภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน คือ บังแสงแดดและไม่บังแสงแดด ทำให้ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่างกัันนั่นเอง) ทำให้สภาพโดยรวมของระบบเกิดจุดทำงานกำลังสูงสุดหลายค่า ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยและหนังสือบางเล่มจึงจัดให้การบังแสงแดดนั้นเป็นหนึ่งในกรณีของความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย [19],[20] ส่งผลให้ในกระบวนการหาค่ากำลังสูงสุดโดยทั่วไปไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงของระบบได้ ระบบจึงไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามที่ควรจะเป็น ทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบลดลง ดังนั้นผลของความไม่เข้ากันของเซลล์แสง

อาทิตย์ที่มีต่อจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเป็นดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.3 นั้นเอง

## 2.6 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นความรู้เบื้องต้นในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองดังจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป รวมไปถึงผลของกรณีที่เกิดการบังแสงแดดและความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะส่งผลต่อแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

### บทที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริง (Active real power) และแรงดันที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง ทว่าไหลโดยทั่วไป เช่น บ้านเรือนที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม ต่างๆนั้นจะใช้ไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสสลับทั้งหมด ทำให้การจะเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่สถานที่ต่างๆที่กล่าวมาโดยตรงนั้นไม่สามารถทำได้ จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเพิ่มเติมเพื่อที่จะสามารถเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบของการไฟฟ้าหรือไหลโดยทั่วไป และเรียกระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Generation System: PVGS) โดยในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 4 หัวข้อ คือ

- (1) ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- (2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- (3) โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- (4) สรุป

#### 3.1 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

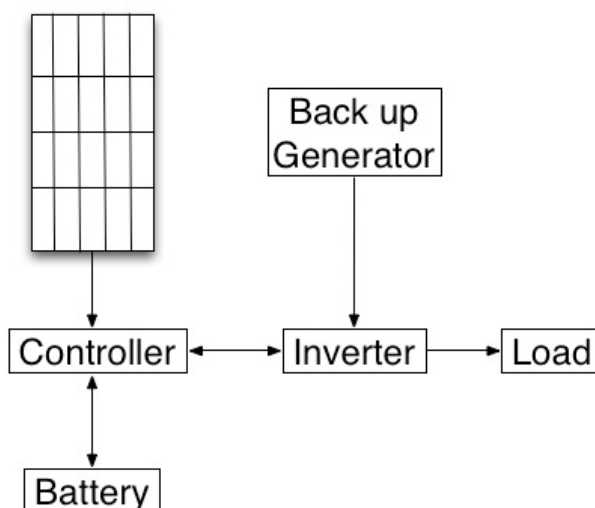
ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าการนำเซลล์แสงอาทิตย์แค่เพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ จำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเติมโดยเมื่อมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์อื่นๆและเซลล์แสงอาทิตย์เข้าด้วยกันนั้นจะเรียกรวมทั้งหมดว่า “ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์” ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิยมแบ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ประเภท คือ [34]

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ (PV stand alone system)
- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (PV grid connection system)
- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน (PV hybrid system)



### 3.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้เป็นระบบที่ไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือไม่ต้องการระบบสายส่งไฟฟ้านั่นเอง เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ห่างไกลมากๆ หรือในบริเวณพื้นที่ที่การสร้างระบบสายส่งไฟฟ้าทำได้ยาก เช่น บริเวณพื้นที่ชนบทที่ห่างไกล หรือบริเวณยอดดอยทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นต้น โดยระบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์ และบางกรณีอาจมีการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองได้ด้วย นอกจากนี้แม้ว่าค่าใช้จ่ายในการนำแบตเตอรี่มาใช้งานนั้นจะสูง อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่นั้นเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ในช่วงเวลากลางวันเพื่อนำมาใช้ในเวลากลางคืนที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยรูปแบบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ

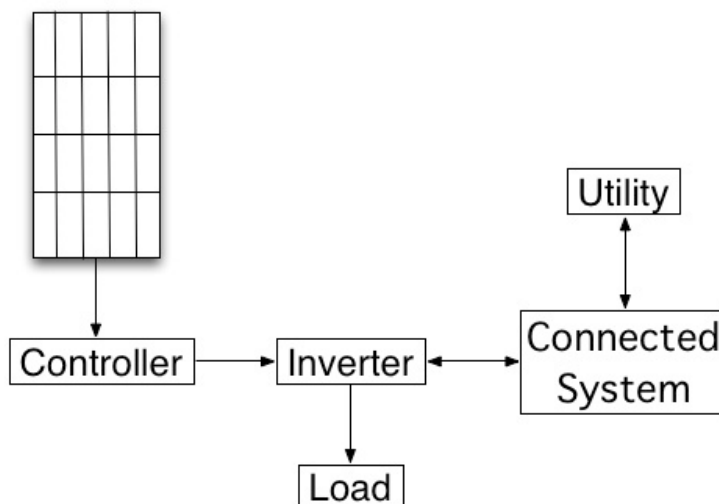
จากรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ โดยหลักการทำงานของแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ (Combination charger-inverter) ซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเก็บพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ในแบตเตอรี่

หรือเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ แล้วจึงใช้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วจึงส่งพลังงานไปยังโหลดที่ต้องการ

ทั้งนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระนั้นจะต้องการการดูแลรักษาที่ดีมากเพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้างดงามมีความแน่นอนมากขึ้น เช่น การดูแลรักษา ตรวจสอบซ่อมแซมแบตเตอรี่ หรือในบางกรณีผู้ใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้อาจต้องยอมลดความต้องการไฟฟ้าลงตามแต่สภาวะอากาศขณะนั้น รวมถึงการดูแลรักษา เต็มเชื้อเพลิง ซ่อมแซมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองให้สามารถทำงานได้อยู่เสมอ เพื่อเพิ่มความพึงพอใจให้แก่ระบบ เป็นต้น

### 3.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้เป็นระบบที่มีการออกแบบไว้สำหรับเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า หรือภายในพื้นที่ที่สาธารณูปโภคไฟฟ้าสามารถเข้าถึงได้ โดยระบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ป้องกันต่างๆตามแต่ข้อกำหนดของการเชื่อมต่อ โดยระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานในช่วงเวลากลางวัน และหากมีพลังงานไฟฟ้าที่เหลือเกินจากความต้องการก็จะจ่ายพลังงานนั้นเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า และในช่วงเวลากลางคืนที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ จึงต้องรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจ่ายโหลดต่างๆ โดยรูปแบบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ

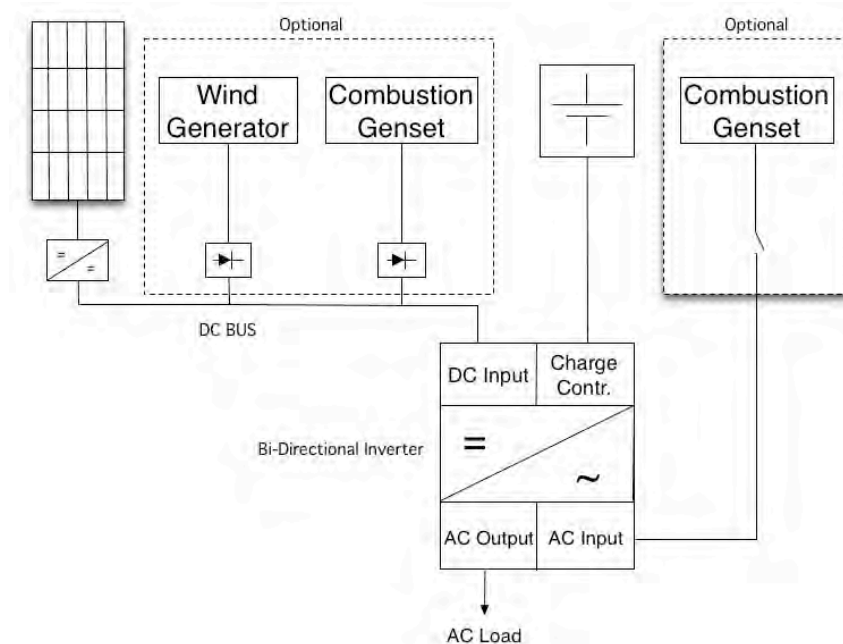
จากรูปที่ 3.2 จะแสดงถึงการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบอิสระ หากพิจารณารูปที่ 3.2 หลังจากที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานออกมา พลังงานนั้นจะส่งผ่านเข้าสู่ คอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่กำหนดการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ อินเวอร์เตอร์ และในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ มักจะต้องมีการติดตั้ง บล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode) เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสจากระบบของการไฟฟ้า และฟิวส์ที่จะมีการติดตั้งในแต่ละสตริง และอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ตัดไฟ (Ground Fault Circuit Interrupter: GFCI) ที่จะตัดระบบออกหากมีกระแสรั่วลงสู่พื้นดิน (Ground) จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งปกตินั้นแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีค่าเป็น 240 โวลต์ จากนั้นจึงจ่ายไฟฟ้าไปยังโหนดหรือเข้าสู่ระบบเชื่อมต่อของการไฟฟ้า จะพบว่าก่อนจะเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าจะต้องผ่านระบบการเชื่อมต่อ (Connected system) ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เบรกเกอร์ อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Lightning surge arrester)

ในบางกรณีการเชื่อมต่อประเภทนี้ก็อาจมีการติดตั้งเบตเตอร์ไว้ด้วยเพื่อสำรองพลังงานหากเกิดเหตุการณ์ที่ระบบของการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟได้

### 3.1.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกันกับระบบผลิตไฟฟ้าประเภทอื่นๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

เครื่องยนต์ดีเซล และกังหันน้ำ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของระบบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ตามแต่ละกรณีไป โดยรูปแบบของการเชื่อมต่อบริเวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสานสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อบริเวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อบริเวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งจะพบว่าไม่ว่าจะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทใดก็ตาม การจะนำพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโหลดต่างๆจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถเข้าสู่อุปกรณ์หรือโหลดต่างๆได้ โดยส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 อย่าง คือ

- คอนเวอร์เตอร์ (Converter)
- อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

### 3.3 โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีขั้นตอนการทำงานขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อภายในระบบดังที่ได้กล่าวไปแล้ว อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ชนิดใดที่ใช้ในการเชื่อมต่อก็ตาม จะสามารถจำแนกโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 2 โหมด คือ [26]

- โหมดการทำงานแบบ PQ
- โหมดการทำงานแบบ PV

#### 3.3.1 โหมดการทำงานแบบ PQ

โหมดการทำงานแบบ PQ เป็นโหมดการทำงานส่วนใหญ่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโหมดการทำงานแบบ PQ จะเป็นโหมดการทำงานที่ให้ค่าของกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) สูงสุดและไม่จ่ายกำลังรีแอกทีฟ (Reactive power) (เนื่องจากในการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้านั้นจะนิยมจำหน่ายเพียงแต่กำลังจริงเท่านั้น) ซึ่งการที่จะอธิบายรายละเอียดของโหมดการทำงานแบบ PQ จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษากระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เสียก่อน โดยหลักการการทำงานส่วนใหญ่จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์เตอร์ [26]

หลักการของกระบวนการหาจุดทำงานกำลังสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ จะมีลักษณะการทำงาน คือ ภายในช่วงเวลาของหลักการการทำงานหาจุดทำงานกำลังสูงสุดนั้น ค่าของความต้านทานภายในของอินเวอร์เตอร์ได้รับการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ภายในช่วงเวลาเฉพาะบางช่วงเวลาเท่านั้น ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาพร้อมกัน โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของแรงดันและกระแสดังกล่าวจะมีผลกระทบโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าจริงที่สามารถผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่าของแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าจริงดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น อินเวอร์เตอร์มีหน้าที่ในการปรับค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดจะยังคงค่าของแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงเป็นค่าของแรงดันและกระแสใหม่ ณ เวลานั้น อย่างไรก็ตามหากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นอินเวอร์เตอร์จะยังคงทำงานต่อไป โดยจุดทำงานของแรงดันและกระแสจะเป็นค่าเดิมก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันและกระแส ซึ่งจุดทำงานนี้จะถูกคงไว้จนกระทั่งถึงช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสง

อาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยปกติงานวิจัยที่ได้นำเสนอหลักการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตได้จะประกอบไปด้วยวิธีการต่างๆมากมาย ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างเพียงแค่ 3 วิธีการที่นิยมนำมาใช้ [35] คือ

- Constant Voltage Method (CV)
- Perturbation and Observation Method (P&O)
- Incremental Conductance Method (IncCond)

### 3.3.2 โหมดการทำงานแบบ PV

โหมดการทำงานแบบ PV นั้นเป็นหนึ่งในโหมดการทำงานทั้งหมดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามโหมดการทำงานแบบ PV นั้นจะไม่นิยมในการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับโหมดการทำงานแบบ PV นั้นจะต้องมีขนาดใหญ่มากพอสมควร เพื่อให้สามารถสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าได้ และในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะไม่ถูกนำมาใช้คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตขึ้นมาได้ ทำให้แม้จะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอเองก็ไม่นิยมนำโหมดการทำงานแบบ PV [26]

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ ว่าแต่ละประเภทมีลักษณะการเชื่อมต่อ เงื่อนไข และอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อแตกต่างกันอย่างไร และสิ่งใดมีความสำคัญ อีกทั้งได้กล่าวถึงโหมดการทำงานที่สำคัญทั้งสองโหมดจากโหมดการทำงานต่างๆ รวมถึงรายละเอียดของโหมดการทำงานทั้งสองด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอโหมดการทำงานทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในลำดับต่อไป

## บทที่ 4

### การพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการในการค้นหาค่าของพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของผู้ผลิตเพิ่มเติม เพื่อให้มีพารามิเตอร์เพียงพอต่อการนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลอง (ทางคณิตศาสตร์) ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 โดยคำนึงถึงปัจจัยทั้งด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิประกอบด้วย สำหรับแบบจำลองที่นำเสนอจะประกอบไปด้วย แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด และแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด นอกจากนี้แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาได้จะนำไปใช้ในการคำนวณร่วมกับกรณีการเกิดการบังแสงแดดและความไม่เข้ากันของเซลล์แสงอาทิตย์ในบทต่อไปอีกด้วย รวมถึงการคำนวณแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบในบทถัดไป

สำหรับเนื้อหาของบทนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 7 หัวข้อดังนี้ คือ

- (1) หลักการหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด
- (2) หลักการหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด
- (3) ปัจจัยทางความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
- (4) ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด
- (5) ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบสองไดโอด
- (6) ขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์
- (7) สรุป

#### 4.1 หลักการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด

จากหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งแสดงตัวอย่างของข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตแต่ละรายจะพบว่า ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจำนวน 8 พารามิเตอร์ซึ่งยังไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันเพื่อหาจุด

ทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ (2.14) สำหรับแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอด ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการคำนวณหาค่าของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากสมการที่ (2.14) ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 7 ตัว คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด ( $I_o$ ) ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) ความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) ความต่างศักย์ซีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $a$ ) และจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ( $N_s$ ) ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถหาค่าได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์มีจำนวน 3 ตัว คือ ความต่างศักย์ซีดเริ่มซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดที่สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 และจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ดังนั้นแล้วพารามิเตอร์ที่จะต้องหาเพิ่มเติมจึงมีเพียง 4 ตัว คือ

- กระแสอิ่มตัวของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Saturation current:  $I_o$ )
- ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Series resistance:  $R_s$ )
- ความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Shunt resistance:  $R_p$ )
- กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Photoelectric current:  $I_{ph}$ )

#### 4.1.1 กระแสอิ่มตัวของไดโอด

กระแสอิ่มตัวของไดโอดสามารถคำนวณได้จากสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในสมการที่ (2.14) โดยคิดในกรณีของการเปิดวงจรรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ซึ่งการเปิดวงจรรจะทำให้ค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลมีค่าเป็นศูนย์ ( $I_{module}=0$ ) และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะมีค่าเป็นแรงดันเปิดวงจรร ( $V_{module}=V_{oc}$ ) ดังนั้นจะสามารถแสดงสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีเปิดวงจรรได้ดังสมการที่ (4.1)

$$I_{module} = 0 = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{aN_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (4.1)$$

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณนั้นมาจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นค่าที่ตรวจวัดในสภาวะมาตรฐาน (STC condition) คือ



อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มแสงเป็น 1,000 (W/m<sup>2</sup>) ที่ AM. 1.5 ดังนั้นค่ากระแสอิ่มตัวที่สามารถคำนวณได้นั้นจะเป็นค่ากระแสอิ่มตัว ณ สภาวะมาตรฐานด้วยเช่นกัน

จากสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดจำนวนหนึ่งโมดูล เมื่อนำมาจัดรูปสมการเพื่อหาค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอดจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$I_o = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{N_s R_p}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{aN_s V_{th}}\right) - 1} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะสามารถประมาณพจน์ของค่ากระแสลัดวงจรให้มีค่ามากกว่าพจน์ทางขวามือ  $\left(\frac{V_{oc}}{N_s R_p}\right)$  อย่างมาก [11] ซึ่งทำให้

สามารถประมาณพจน์ของเศษในสมการที่ (4.2) ให้เหลือเพียงพจน์เดียวได้ ดังจะแสดงในสมการที่ (4.3)

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{aN_s V_{th}}\right) - 1} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) จะสามารถหาค่าของกระแสอิ่มตัว ณ สภาวะอุณหภูมิและความเข้มแสงมาตรฐานได้ และจากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.2 ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อกระแสอิ่มตัวของเซลล์แสงอาทิตย์มีเพียงปัจจัยเดียว คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (4.4) [15]

$$I_{o,T} = I_{o,T_{ref}} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{ak} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right]\right) \quad (4.4)$$

โดย

$I_{o,T}$	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิ $T$ Kelvin (A)
$I_{o,T_{ref}}$	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิ $T_{ref}$ Kelvin (A)
$k$	คือ	ค่านิจของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่า $1.38 \times 10^{-23}$ j/K
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้กระแสอิ่มตัวมีค่า $I_{o,T_{ref}}$ (K)
$T$	คือ	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้กระแสอิ่มตัวมีค่า $I_{o,T}$ (K)
$q$	คือ	ค่าประจุของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่า $1.6 \times 10^{-19}$ (C)
$a$	คือ	แฟกเตอร์อุดมคติ (Ideality factor) ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ซึ่งมีค่าตามแต่เทคโนโลยีของผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะนำมาใช้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1
$E_g$	คือ	ช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ทำไดโอด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (eV)

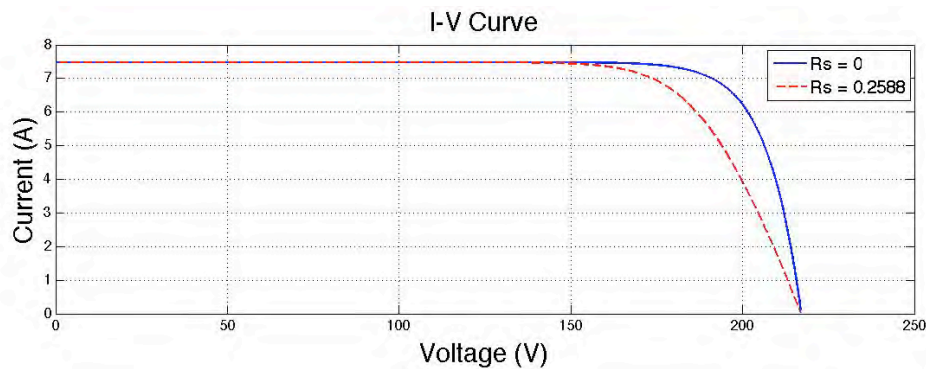
อย่างไรก็ตามสมการที่ (4.4) นั้นไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการคำนวณเนื่องจากต้องมีการศึกษาว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดใด เพื่อหาค่าของช่องว่างพลังงานที่จะนำมาใช้ในสมการ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงโดยนำค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเปิดวงจรต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของเซลล์แสงอาทิตย์มาช่วยในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิ ณ สภาวะมาตรฐาน โดยการปรับแก้จากสมการที่ (4.3) ให้กลายเป็นสมการที่ (4.5) [11]

$$I_{o,T} = \frac{I_{sc} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{a N_s V_{th}}\right) - 1} \quad (4.5)$$

จะพบว่าสมการที่ (4.5) มีความเหมาะสมที่สุดในการหาค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด ซึ่งในสมการที่ (4.5) นั้นจะรวมผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไว้ด้วย และพารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้อย่างสามารถหาได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตได้

#### 4.1.2 ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ (Ideal model) นั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่คิดผลของความต้านทานสมมูลต่อขนานและอนุกรมดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1.1 เมื่อนำข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1 จะมีลักษณะดังเส้นที่บในรูป และเมื่อนำความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมมาคำนวณร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะพบว่าค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมนั้นจะส่งผลในการควบคุมความชัน (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ทำให้กราฟโค้งลงเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในลักษณะของเส้นประ จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงกราฟทั้งสองกรณีเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะส่งผลต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังที่ได้กล่าวไปโดยปกติแล้วความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมนี้จะเป็นผลมาจากจุดเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ และความต้านทานภายในของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้โดยทั่วไปข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตนั้น จะมีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบของโมดูล ส่งผลให้ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมที่คำนวณจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะเป็นค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของโมดูลเช่นกัน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สี่โมดูลแบบอุดมคติและแบบที่มีความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม

ซึ่งแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาถึงผลของความต้านทานสมมูลอนุกรมด้วย โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมนั้นจะใช้การคำนวณร่วมกับสมการที่ (2.14) เนื่องจากสมการที่จะใช้คำนวณค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะไม่มี จึงต้องทำการประยุกต์เพิ่มเติมจากสมการเดิมที่มีอยู่ ซึ่งสมการที่ใช้จะได้มาจากการหาสมการอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยสามารถแสดงได้ในสมการที่ (4.6) [15]

$$\frac{dP_{module}}{dV_{module}} = \frac{d(I_{module} V_{module})}{dV_{module}} = I_{module} + V_{module} \left( \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right) \quad (4.6)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ซึ่งจะให้กราฟระหว่างความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์เช่นกัน จะพบว่าจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด (MPP) นั้นจะเป็นจุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นจุดที่มีความชันของกราฟเป็นศูนย์ หรือกล่าวคือเมื่อหาอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับแรงดัน ณ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (4.7)

$$\left. \frac{dP_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = \left. \frac{d(I_{module} V_{module})}{dV_{module}} \right|_{MPP} = I_{module} + V_{module} \left( \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) = 0 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) การหาอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลสามารถทำได้โดยเริ่มจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลหรือสมการที่ (2.14) มาหาอนุพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ (4.8)

$$\left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = - \left[ I_o \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) \left( \frac{1}{aN_s V_{th}} + \frac{R_s}{aN_s V_{th}} \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) \right] - \left[ \frac{1}{R_p} + \frac{R_s}{R_p} \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right] \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) นำมาจัดรูปโดยทำการคูณ  $aN_s V_{th} R_p$  ตลอดทั้งสมการจะได้สมการที่ (4.9)

$$aN_s V_{th} R_p \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = - \left[ I_o \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) \left( R_p + R_s R_p \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) \right] - \left[ aN_s V_{th} + aN_s V_{th} R_s \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right] \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.9) นำมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะได้สมการที่ (4.10)

$$\left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) - aN_s V_{th}}{aN_s V_{th} R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) + aN_s V_{th} R_s} \quad (4.10)$$

จากนั้นนำค่าของอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากสมการที่ (4.10) แทนลงในสมการที่ (4.7) จะได้ผลดังสมการที่ (4.11)

$$I_{MPP} + V_{MPP} \left( \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) - aN_s V_{th}}{aN_s V_{th} R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) + aN_s V_{th} R_s} \right) = 0 \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.11) นำมาจัดรูปเพื่อหาค่าของความต้านทานสมมูลเชื่อมต่อก่อนุกรมซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการจัดรูปได้ดังสมการที่ (4.12) ถึง (4.15) [15]

$$\frac{-I_{MPP}}{V_{MPP}} = \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) - a N_s V_{th}}{a N_s V_{th} R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th} R_s} \quad (4.12)$$

$$\frac{-I_{MPP}}{V_{MPP}} = \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) - a N_s V_{th}}{a N_s V_{th} R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th} R_s} \quad (4.13)$$

$$\frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} = \frac{a N_s V_{th} R_p}{I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th}} + \frac{\left(I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th}\right) R_s}{I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th}} \quad (4.14)$$

$$R_s = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} - \frac{a N_s V_{th} R_p}{I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th}} \quad (4.15)$$

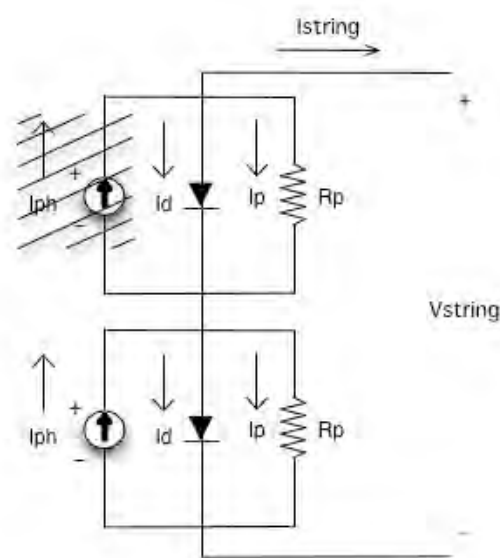
จากสมการที่ (4.15) จะพบว่าพารามิเตอร์ต่างๆจะสามารถหาค่าได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ ยกเว้นเพียงค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) เท่านั้น ดังนั้นสมการที่ (4.15) เพียงสมการเดียวจึงไม่เพียงพอที่จะหาค่าของความต้านทานสมมูลต่อก่อนุกรม ( $R_s$ ) ได้เนื่องจากยังไม่ทราบค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนาน จึงจำเป็นต้องหาสมการเพิ่มเติมดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

นอกจากนี้สำหรับค่าความต้านทานสมมูลเชื่อมต่อก่อนุกรมเมื่อสามารถคำนวณออกมาได้จะเป็นค่า ณ สภาวะมาตรฐาน (STC condition) เช่นเดียวกับค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอด และจากปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์สองปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 จะพบว่าสำหรับค่าความต้านทาน

สมมูลต่ออนุกรมจะไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ แม้ว่าความเข้มแสงหรืออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง [13],[14],[15]

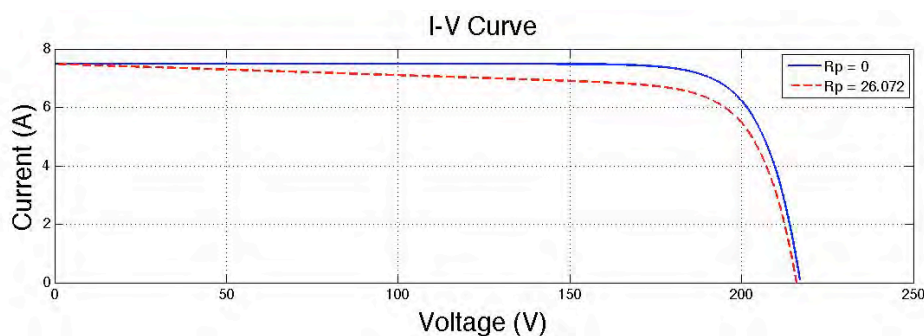
#### 4.1.3 ความต้านทานสมมูลต่อขนาน

สำหรับความต้านทานสมมูลต่อขนานได้ถูกค้นพบเนื่องจากการบังแสงแดด (Shading) ซึ่งเกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์หนึ่งในสตริงที่มีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งผลของการบังแสงแดดทำให้เซลล์ที่ถูกบังแสงแดดไม่สามารถสร้างกระแสได้ และหากพิจารณาด้วยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะพบว่าไม่สามารถมีกระแสไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดได้ (เนื่องจาก  $I_{ph}=0$ ) จากสถานการณ์ดังกล่าวจะสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามหากสมมติว่ามีกระแสสามารถไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์โดยที่ไม่มีความต้านทานสมมูลต่อขนานแล้วจะพบว่ากระแสที่ไหลผ่านจะมีค่าน้อยมากจนเกือบจะเป็นศูนย์และจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมไดโอดเป็นแรงดันไบแอสกลับ (Reverse bias voltage) ทว่าจากการทดลองจริงนั้นแม้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพต่ำมาก เมื่อถูกบังแสงแดดกลับยังคงมีกระแสไหลผ่านได้ จึงมีการทบทวนถึงความถูกต้องของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติและมีการปรับปรุงให้มีลักษณะที่ตรงกับลักษณะในทางปฏิบัติมากขึ้น คือเพิ่มองค์ประกอบความต้านทานสมมูลต่อขนานเข้าไปในแบบจำลอง [7]



รูปที่ 4.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สองโมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคตินั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่คิดผลของความต้านทานสมมูลต่อขนานและอนุกรมดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1.1 เมื่อนำข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.3 จะมีลักษณะดังเส้นที่บในรูป และเมื่อนำความต้านทานสมมูลต่อขนานมาคำนวณร่วมกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติจะพบว่าค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานนั้นจะส่งผลในการควบคุมความชัน (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงที่แรงดันมีค่าน้อยกว่าแรงดันกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ ) ลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในลักษณะของเส้นประ จากรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงกราฟทั้งสองกรณีเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะส่งผลต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังที่ได้กล่าวไป โดยทั่วไปข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตนั้น จะมีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบของโมดูล ส่งผลให้ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานที่คำนวณจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะเป็นค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของโมดูลเช่นกัน [13]



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูลแบบอุดมคติและแบบที่มีความต้านทานสมมูลต่อขนาน

หลักการคำนวณความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะเริ่มจากการพิจารณาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลดังสมการที่ (2.14) โดยจุดทำงานที่ใช้พิจารณาจะเป็นจุดทำงานที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด ณ สภาวะมาตรฐาน (STC condition) โดยกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด ( $P_{MPP}$ ) จะสามารถหาได้



จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิต โดยสมการของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.16)

$$P_{MPP} = I_{MPP} V_{MPP} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.16) เมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของกระแส ณ จุดทำงานกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ ) และแทนค่าของกระแสของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลลงจากสมการที่ (2.14) จะได้ผลดังสมการที่ (4.17)

$$\frac{P_{MPP}}{V_{MPP}} = I_{MPP} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{R_p} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) เมื่อนำมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของความต้านทานสมมูลต่อขนานจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.18)

$$R_p = \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{MPP}} \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.18) จะพบว่าเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน อย่างไรก็ตามจะพบว่าเพียงสมการที่ (4.18) สมการเดียวไม่เพียงพอที่จะคำนวณค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน เพราะถึงแม้ว่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่สามารถทราบค่าได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตแต่ภายในสมการที่ (4.18) ยังต้องการค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) และค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริก ( $I_{ph}$ ) ซึ่งไม่ปรากฏในข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณด้วย ดังนั้นในการคำนวณค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมและความต้านทานสมมูลต่อขนานนั้นเพียงแค่สมการที่ (4.15) และ (4.18) ก็ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถทำการคำนวณได้ จำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตอิเล็กทริกมาประกอบการคำนวณด้วย

นอกจากนี้สำหรับค่าความต้านทานสมมูลเชื่อมต่อขนานเมื่อสามารถคำนวณออกมาได้จะเป็นค่า ณ สภาวะมาตรฐาน (STC) เช่นเดียวกับค่าของกระแสอิ่มตัวของ

ไดโอดและความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม และจากปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์สองปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 จะพบว่าสำหรับค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยความเข้มแสงเพียงปัจจัยเดียว โดยจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในสมการที่ (4.19) [13],[14], [15]

$$R_{p,G} = R_{p,G_{ref}} \left( \frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (4.19)$$

โดย

$R_{p,G}$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ขณะที่ค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $G \text{ W/m}^2$ ( $\Omega$ )
$R_{p,G_{ref}}$	คือ	ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ขณะที่ค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $G_{ref} \text{ W/m}^2$ ( $\Omega$ )
$G$	คือ	ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลมีค่า $R_{p,G} \text{ } \Omega$ ( $\text{W/m}^2$ )
$G_{ref}$	คือ	ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลมีค่า $R_{p,G_{ref}} \text{ } \Omega$ ( $\text{W/m}^2$ )

โดยทั่วไปนั้นมักจะพิจารณาให้ค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และค่ากระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ ( $I_{ph}$ ) มีค่าเท่ากัน (โดยปกติแล้วค่าของค่ากระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์จะมากกว่ากระแสลัดวงจรประมาณ 0.01 A) [25],[36] อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วค่าของกระแสทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นการพิจารณาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความแม่นยำจึงควรพิจารณาค่าของกระแสทั้งสองให้มีความต่างกันด้วย จึงต้องมีการหาสมการเพื่อคำนวณหาค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

#### 4.1.4 กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์

กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์คือกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์จะเกิดจากความเข้มแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ โดยผลของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์เมื่อค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งหากค่าความเข้มแสงมีค่าต่ำลงจนเป็นศูนย์ก็จะทำให้ค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์นั้นมีค่าเป็นศูนย์ตามไปด้วย โดยจะสามารถประมาณค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลได้ดังสมการที่ (4.20) [13],[15]

$$I_{ph} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{SC} \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.20) จะพบว่าเพียงสมการที่ (4.20) สมการเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะคำนวณหาค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ออกมาได้เนื่องจากค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานและอนุกรมนั้นไม่สามารถหาได้จากข้อมูลทางเทคนิค จึงต้องนำสมการในกรณี (4.15) และ (4.18) มาคำนวณร่วมด้วยเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ทั้งสาม อย่างไรก็ตามสมการทั้งสามนั้นไม่เป็นสมการเส้นตรง (Non-linear equation) ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์หลักการหาจุดเหมาะสม (Optimization) เพื่อหาคำตอบของสมการทั้งสามที่ต้องการ

#### 4.2 หลักการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะเป็นแบบจำลองหลักสำหรับใช้คำนวณหาจุดทำงานในสถานะต่างๆในวิทยานิพนธ์นี้ จากหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งแสดงตัวอย่างของข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตแต่ละรายจะพบว่าข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจำนวน 8 พารามิเตอร์ซึ่งยังไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันเพื่อหาจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ (2.13) สำหรับแบบจำลองชนิดสองไดโอด ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการคำนวณหาค่าของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากสมการที่ (2.13) ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 9 ตัว คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอดตัวที่หนึ่ง ( $I_{o1}$ ) กระแสอิ่มตัวของไดโอดตัวที่สอง ( $I_{o2}$ ) ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) ความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) ความต่างศักย์ซีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดตัวที่หนึ่ง ( $a_1$ ) แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดตัวที่สอง ( $a_2$ )

และจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ( $N_s$ ) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วจะพบว่า พารามิเตอร์ที่สามารถหาค่าได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์มีจำนวน 2 ตัว คือ ความต่างศักย์ซีดเริ่มซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) และจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม เนื่องจากพารามิเตอร์ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นแต่สมการความสัมพันธ์ยังคงมีจำนวนเท่าเดิม จึงไม่สามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆด้วยวิธีเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 4.1 ได้ทำให้ต้องนำหลักการอย่างง่าย (Simplify method) มาช่วยในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

โดยหลักการอย่างง่ายที่นำมาช่วยในการคำนวณนี้จะช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าลงได้และทำให้การคำนวณหาค่าตอบของสมการไม่เชิงเส้นลดความซับซ้อนลงมาก โดยเริ่มจากการพิจารณาไดโอดทั้งสองตัวในแบบจำลองให้มีคุณลักษณะเหมือนกันทุกประการ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของกระแสอิ่มตัวทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากันด้วย ( $I_{o1} = I_{o2}$ ) [8] จากนั้นจึงพิจารณาถึงแพกเตอร์อุดมคติของไดโอด ซึ่งโดยทั่วไปหากเป็นแบบจำลองหนึ่งไดโอดมักจะอนุมานให้ค่าแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดนั้นมีค่าคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 ดังที่ได้กล่าวไป แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดนั้นเป็นฟังก์ชันของแรงดันตกคร่อมเซลล์ หากแรงดันตกคร่อมเซลล์มีค่าสูงจะทำให้เมื่อเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination) นั้นเกิดที่บริเวณพื้นผิวเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะทำให้ค่าแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง แต่หากแรงดันตกคร่อมเซลล์มีค่าต่ำจะทำให้การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดบริเวณรอยต่อ (Junction) ซึ่งจะทำให้ค่าแพกเตอร์อุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ของช็อกเลย์ (Shockley's diffusion theory) [25] ดังนั้นเพื่อชดเชยผลของค่าของแพกเตอร์อุดมคติที่มีค่าใกล้เคียงสองในช่วงที่แรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจึงเกิดจากการพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดที่เพิ่มไดโอดตัวที่สองต่อขนานกับไดโอดตัวที่หนึ่งและให้ไดโอดตัวที่หนึ่งและไดโอดตัวที่สองมีค่าแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดเป็นหนึ่งและสองตามลำดับ ( $a_1 = 1, a_2 = 2$ ) ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองหนึ่งไดโอดในช่วงที่ความเข้มแสงต่ำ ทำให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าแบบจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด และประมาณให้ค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าเท่ากับ กระแสลัดวงจร ( $I_{ph} \equiv I_{SC}$ ) [36]

ดังนั้นแล้วพารามิเตอร์ที่จะต้องหาเพิ่มเติมจึงมีเพียง 3 ตัว คือ

- กระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองตัวของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Diodes saturation current:  $I_{o,j} \Big|_{j=1,2}$ )
- ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Series resistance:  $R_s$ )
- ความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Shunt resistance:  $R_p$ )

#### 4.2.1 กระแสอิ่มตัวของไดโอด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าหลักการอย่างง่ายนั้นจะมีการกำหนดให้กระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามจากหลักการคำนวณหากระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองในแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนี้ยังคงมีหลักการเช่นเดียวกันกับหลักการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ทำให้สมการที่ใช้คำนวณหาค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองมีลักษณะคล้ายคลึงกับสมการที่ (4.5) ดังจะสามารถแสดงได้ในสมการที่ (4.21)

$$I_{o1} = I_{o2} = \frac{I_{SC} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{OC} + K_v \Delta T}{N_s V_{th}}\right) - 1} \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.21) จะพบว่าสามารถหาค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอดได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิต ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าเพียงสองตัว คือ ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม และความต้านทานสมมูลต่อขนาน โดยทั่วไปค่าของความต้านทานทั้งสองจะถูกคำนวณโดยแยกอิสระจากกัน (Independently) อย่างไรก็ตามผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่ง ซึ่งในที่นี้จะทำการคำนวณค่าของความต้านทานทั้งสองให้มีความสัมพันธ์กัน (Simultaneously) โดยมีหลักคือการปรับจุดทำงานให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งรายละเอียดการคำนวณจะกล่าวในหัวข้อของขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ในลำดับถัดไป [25]

#### 4.2.2 ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการหาค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมนั้นจะทำการคำนวณพร้อมกันกับการหาค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานผ่านการคำนวณแบบวนซ้ำ (Iteration) ซึ่งค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทุกรอบของการคำนวณเพื่อหาค่าของความต้านทานทั้งสองที่ทำให้เกิดจุดทำงานกำลังสูงสุด โดยค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition of  $R_s$ :  $R_{s,0}$ ) ดังสมการที่ (4.22)

$$R_{s,0} = 0 \quad (4.22)$$

และค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเมื่อสิ้นสุดกระบวนการวนซ้ำจะได้ค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมที่ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมจริงของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมากที่สุด

#### 4.2.3 ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการหาค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานนั้นจะทำการคำนวณพร้อมกันกับการหาค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมผ่านการคำนวณแบบวนซ้ำ ซึ่งค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทุกรอบของการคำนวณ เนื่องจากเมื่อค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อหาค่าของความต้านทานทั้งสองที่ทำให้เกิดจุดทำงานกำลังสูงสุด เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.13) ณ สภาวะที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.23)

$$I_{MPP} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_1 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_2 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{R_p} \quad (4.23)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (4.23) ให้อยู่ในรูปของความต้านทานสมมูลต่อขนานจะได้ผลดังสมการที่ (4.24)

$$R_p = \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{MPP}} \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.24) นำแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{MPP}$ ) คูณทั้งเศษและส่วนจะได้ผลดังสมการที่ (4.25)

$$R_p = \frac{V_{MPP}(V_{MPP} + I_{MPP}R_s)}{\left\{ (V_{MPP}) \left[ I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] \right] - P_{MPP} \right\}} \quad (4.25)$$

โดยสมการที่ (4.25) นี้จะเป็นสมการที่ใช้หาค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานในทุกรอบการวนซ้ำการคำนวณ ในขณะที่ค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละรอบการคำนวณ อย่างไรก็ตามค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานจะมีเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition of  $R_p : R_{p,0}$ ) ดังสมการที่ (4.26) [25]

$$R_{p,0} = \frac{V_{MPP}}{I_{SC} - I_{MPP}} - \frac{V_{OC} - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (4.26)$$

และค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อสิ้นสุดกระบวนการวนซ้ำจะได้ค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานที่ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานจริงของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมากที่สุด สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมและค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานนั้นจะมีการอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อของขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ในลำดับถัดไป

### 4.3 ปัจจัยทางอุณหภูมิจและความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อที่ 2.2.2 จะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์นั้นจะประกอบไปด้วยความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจัยทั้งสองยังคงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลด้วย โดยค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่

สามารถหาได้จากหัวข้อที่ 4.1 และหัวข้อที่ 4.2 โดยใช้พารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตนั้นจะเป็นค่าของพารามิเตอร์ ณ อุณหภูมิและความเข้มแสงมาตรฐาน (STC condition) ด้วย ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงค่าของพารามิเตอร์เมื่ออุณหภูมิและความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะมาตรฐาน

#### 4.3.1 ปัจจัยด้านอุณหภูมิ

ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2.1 ถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์จำนวนสามตัว คือ กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ กระแสอิ่มตัวของไดโอด และความต่างศักย์ซีดีเริ่ม

##### 4.3.1.1 กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลนั้นสามารถแสดงได้ในสมการที่ (4.27) [9],[11],[21]

$$I_{ph,T} = I_{ph,T_{ref}} + K_i (T - T_{ref}) \quad (4.27)$$

โดย

$I_{ph,T}$  คือ กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่อุณหภูมิมีค่าเป็น  $T^{\circ}\text{C}$  (A)

$I_{ph,T_{ref}}$  คือ กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่อุณหภูมิมีค่าเป็น  $T_{ref}^{\circ}\text{C}$  (A)

##### 4.3.1.2 กระแสอิ่มตัวของไดโอด

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดนั้นได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5) สำหรับแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอด และหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.21)



#### 4.3.1.3 ความต่างศักย์ขีดเริ่ม

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) ซึ่งภายในสมการจะมีพารามิเตอร์ของอุณหภูมิอยู่ด้วย ทำให้การคำนวณค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มนั้นจะรวมผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะมาตรฐานแล้ว

#### 4.3.2 ปัจจัยด้านความเข้มแสง

ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2.2 ถึงผลกระทบของความเข้มแสงว่าจะมีผลต่อพารามิเตอร์จำนวนสองตัว คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ และค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน

##### 4.3.2.1 กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่อค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลนั้นสามารถแสดงได้ในสมการที่ (4.28) [9],[11],[21]

$$I_{ph,G} = I_{ph,G_{ref}} \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (4.28)$$

โดย

$I_{ph,G}$  คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ณ ความเข้มแสง  $G \text{ W/m}^2$  (A)

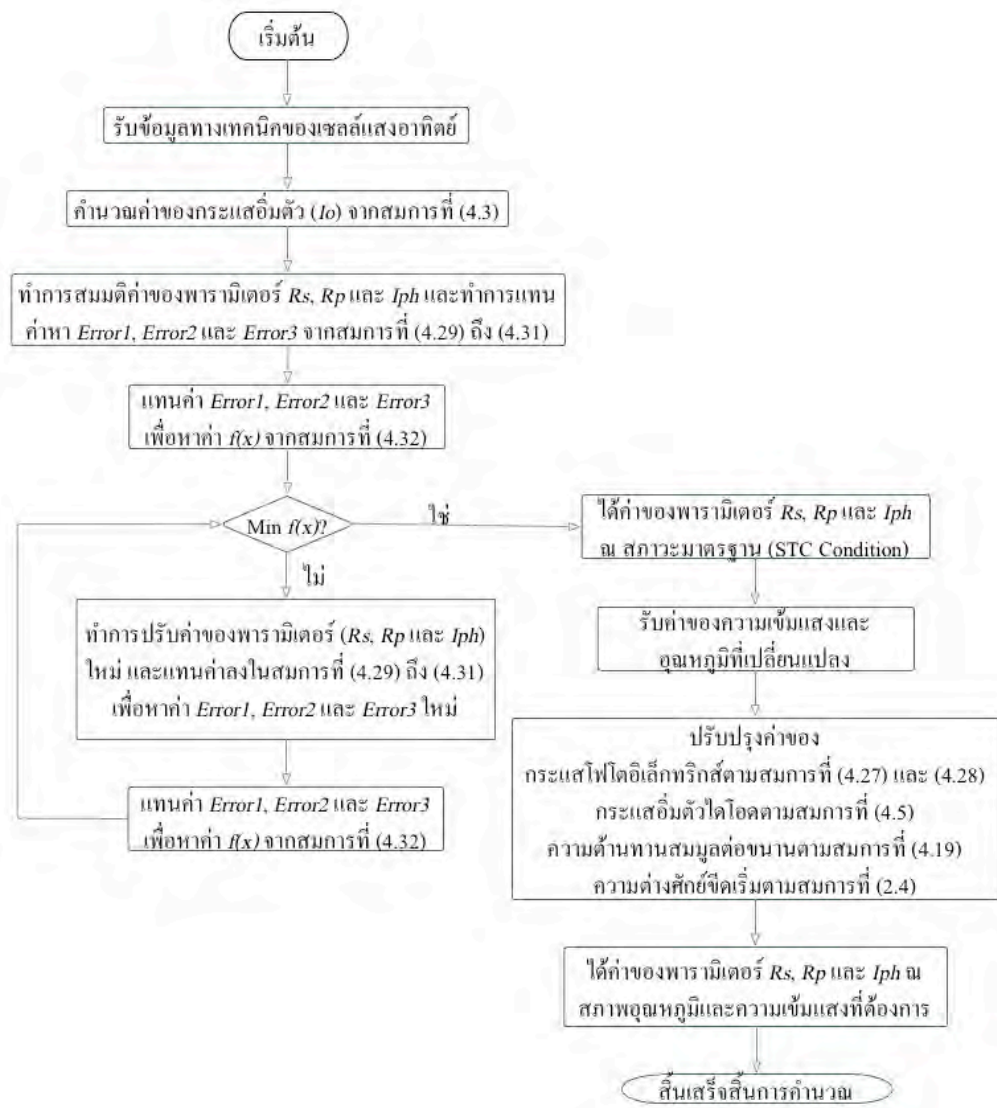
$I_{ph,G_{ref}}$  คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ณ ความเข้มแสง  $G_{ref} \text{ W/m}^2$  (A)

##### 4.3.2.2 ความต้านทานสมมูลต่อขนาน

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่อค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลนั้นสามารถแสดงดังสมการที่ (4.19) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3

#### 4.4 ขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม ซึ่งจากหัวข้อที่ 4.1 นั้นจะพบว่าสมการในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear equation) จึงต้องมีการประยุกต์หลักการหาจุดทำงานที่เหมาะสม (Optimization) มาช่วยในการคำนวณ โดยขั้นตอนของการคำนวณค่าของพารามิเตอร์ที่จะกล่าวต่อไปนี้ ได้รวมผลของปัจจัยทั้งความเข้มแสงและอุณหภูมิซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.3 ไว้ด้วยแล้ว โดยขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดนั้น สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 8 ตัว คือ  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $P_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ,  $K_i$ ,  $K_v$ , และ  $N_s$
- ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณค่าของกระแสอิ่มตัวไดโอดจากสมการที่ (4.3)
- ขั้นตอนที่ 3 : สมมติค่าเริ่มต้นของ ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ความต้านทานสมมูลต่อขนาน และค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $R_s$ ,  $R_p$  และ  $I_{ph}$ )
- ขั้นตอนที่ 4 : แทนค่าพารามิเตอร์ทั้งสาม ( $R_s$ ,  $R_p$  และ  $I_{ph}$ ) ลงในสมการที่ (4.29) ถึง (4.31) เพื่อหาค่าของ  $Error1$   $Error2$  และ  $Error3$  โดยสมการทั้งสามนั้นมีที่มาจากสมการที่ (4.15), (4.18) และ (4.20) ตามลำดับ

$$Error1 = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} - \frac{aN_s V_{th} R_p}{I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{aN_s V_{th}}\right) + aN_s V_{th}} - R_s \quad (4.29)$$

$$Error2 = \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{aN_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{MPP}} - R_p \quad (4.30)$$

$$Error3 = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{SC} - I_{ph} \quad (4.31)$$

- ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าของพารามิเตอร์  $R_s$ ,  $R_p$  และ  $I_{ph}$  ที่จะทำให้อาชีพของ  $f(x)$  ในสมการที่ (4.32) มีค่าต่ำที่สุด

$$f(x) = Error1^2 + Error2^2 + Error3^2 \quad (4.32)$$

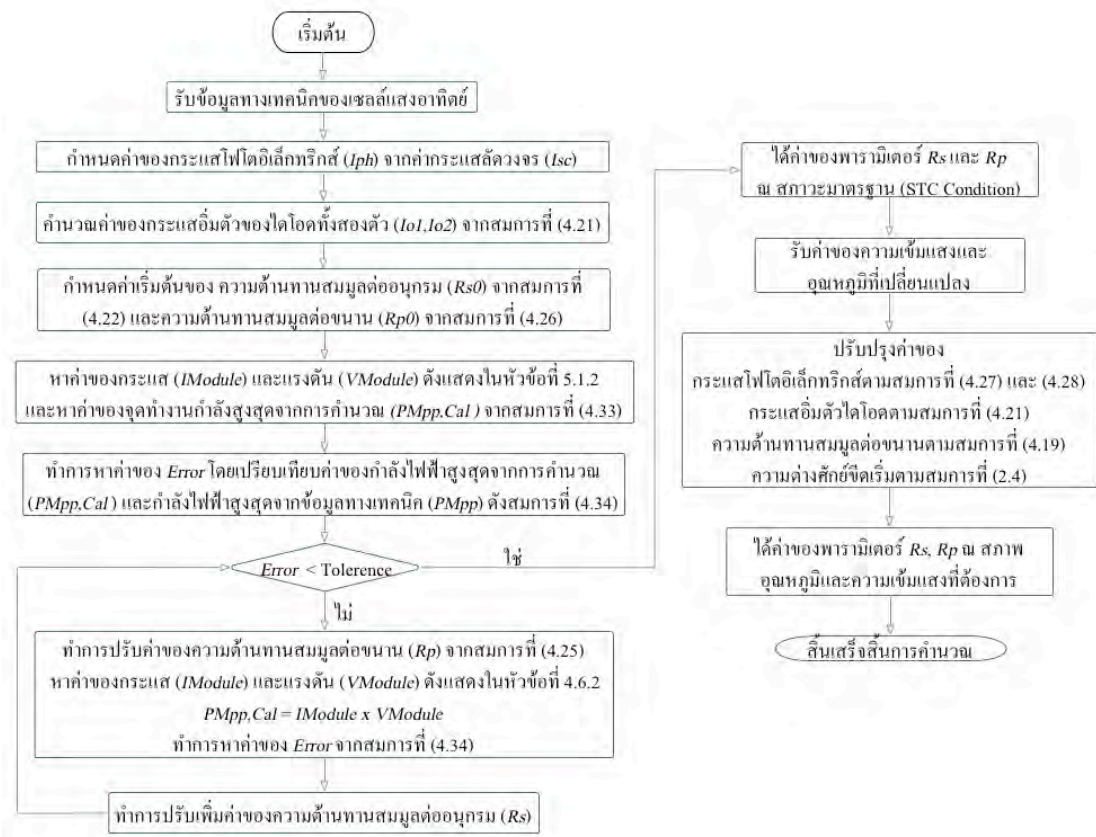
- ขั้นตอนที่ 6 : รับค่าสภาวะแวดล้อมของความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน

ขั้นตอนที่ 7 : ปรับปรุงค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์ตามสมการที่ (4.27) และ (4.28) ค่าของกระแสอิมิตัวไดโอดตามสมการที่ (4.5) ค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานตามสมการที่ (4.19) และค่าของความต่างศักย์ซีดีเริ่มตามสมการที่ (2.4)

ขั้นตอนที่ 8 : ลึ้นสู่การคำนวณได้ค่าของพารามิเตอร์  $R_s, R_p$  และ  $I_{ph}$  ตามต้องการ

#### 4.5 ขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม ซึ่งจากหัวข้อที่ 4.2 นั้นจะพบว่าสมการในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear equation) และแม้ว่าจะมีการนำหลักการอย่างง่าย (Simplify method) มาช่วยลดจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าลง อย่างไรก็ตามการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ยังคงมีความซับซ้อนอยู่ จึงต้องมีการประยุกต์หลักการหาจุดทำงานที่เหมาะสม (Optimization) มาช่วยในการคำนวณ โดยขั้นตอนของการคำนวณค่าของพารามิเตอร์ที่จะกล่าวต่อไปนี้ ได้รวมผลของปัจจัยทั้งความเข้มแสงและอุณหภูมิซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.3 ไว้ด้วยแล้ว โดยขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบสองไดโอดนั้น สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบจำลองแบบสองไดโอด

- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 8 ตัว คือ  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $P_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ,  $K_i$ ,  $K_v$  และ  $N_s$
- ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) จากค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )
- ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองตัว ( $I_{o1}$ ,  $I_{o2}$ ) จากสมการที่ (4.21)
- ขั้นตอนที่ 4 : กำหนดค่าเริ่มต้นของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_{s0}$ ) จากสมการที่ (4.22) และความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_{p0}$ ) จากสมการที่ (4.26)

ขั้นตอนที่ 5 : หาค่าของกระแส ( $I_{module}$ ) และแรงดัน ( $V_{module}$ ) ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.6.2 และหาค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดจากการคำนวณ ( $P_{MPP,Cal}$ ) จากสมการที่ (4.33)

$$P_{MPP,Cal} = I_{module} \times V_{module} \quad (4.33)$$

ขั้นตอนที่ 6 : ทำการหาค่าของ *Error* โดยเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการคำนวณ ( $P_{MPP,Cal}$ ) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากข้อมูลทางเทคนิค ( $P_{MPP}$ ) ดังสมการที่ (4.34)

$$Error = |P_{MPP,Cal} - P_{MPP}| \quad (4.34)$$

ขั้นตอนที่ 7 : ทำการปรับค่าของ *Error* โดย

- ทำการปรับค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) จากสมการที่ (4.25)
- ทำตามขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6 อีกครั้ง
- ทำการปรับเพิ่มค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) จนกระทั่งค่าของ *Error* มีค่าน้อยอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

ขั้นตอนที่ 8 : รับค่าสภาวะแวดล้อมของความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน

ขั้นตอนที่ 9 : ปรับปรุงค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ตามสมการที่ (4.27) และ (4.28) ค่าของกระแสอิ่มตัวไดโอดตามสมการที่ (4.21) ค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานตามสมการที่ (4.19) และค่าของความต่างศักย์ซีดีเริ่มตามสมการที่ (2.4)

ขั้นตอนที่ 10: สิ้นสุดการคำนวณ จะได้ค่าของพารามิเตอร์  $R_s$  และ  $R_p$  ตามต้องการ

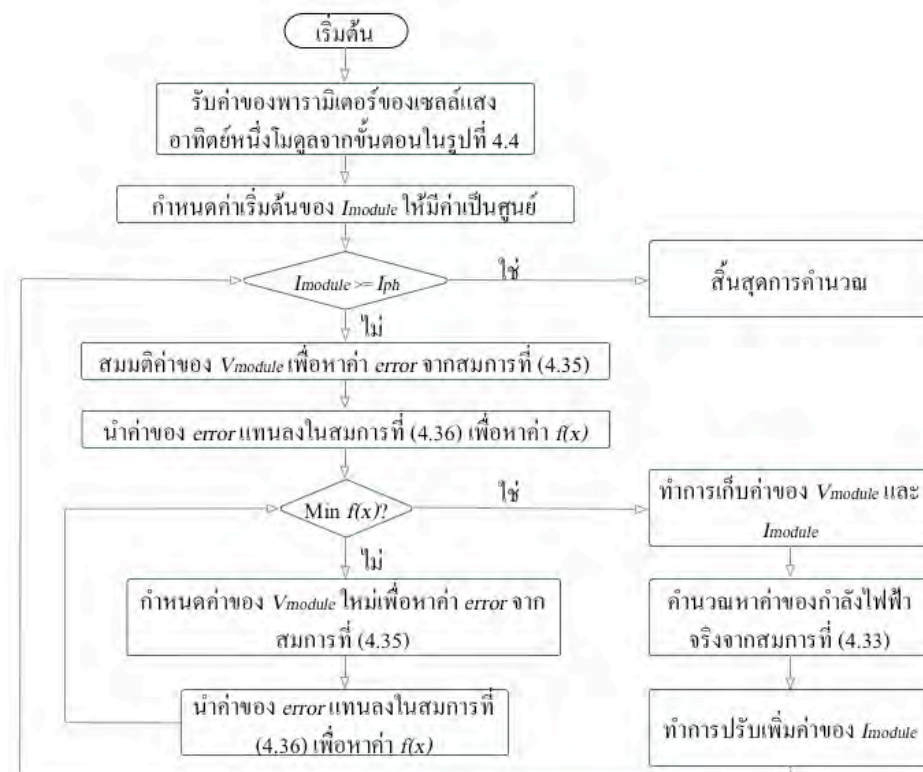
#### 4.6 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยจะแบ่งเป็น

- ขั้นตอนคำนวณความสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด
- ขั้นตอนคำนวณความสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

#### 4.6.1 ขั้นตอนคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด

สำหรับขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดนั้น สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.6 เริ่มจากการพิจารณาจากสมการที่ (2.14) จะพบว่าเป็นสมการไม่เชิงเส้นจึงนำหลักการค้นหาอย่างง่ายมาช่วยในการคำนวณ



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบไปด้วย  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $a$ ,  $V_{th}$ ,  $N_s$ ,  $R_p$  และ  $R_s$

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $I_{module}$  ให้มีค่าเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 : สมมติค่าของ  $V_{module}$  ในช่วง  $[0, V_{oc}]$  เพื่อหาค่า error จากสมการที่ (4.35) ซึ่งมีที่มาจากสมการที่ (2.14)

$$error = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{module} + I_{module}R_s}{aN_sV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + I_{module}R_s}{R_p} - I_{module} \quad (4.35)$$

ขั้นตอนที่ 4 : ค้นหาแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ( $V_{module}$ ) ที่จะทำให้ค่าของ  $f(x)$  จากสมการที่ (4.36) มีค่าต่ำสุด

$$f(x) = error^2 \quad (4.36)$$

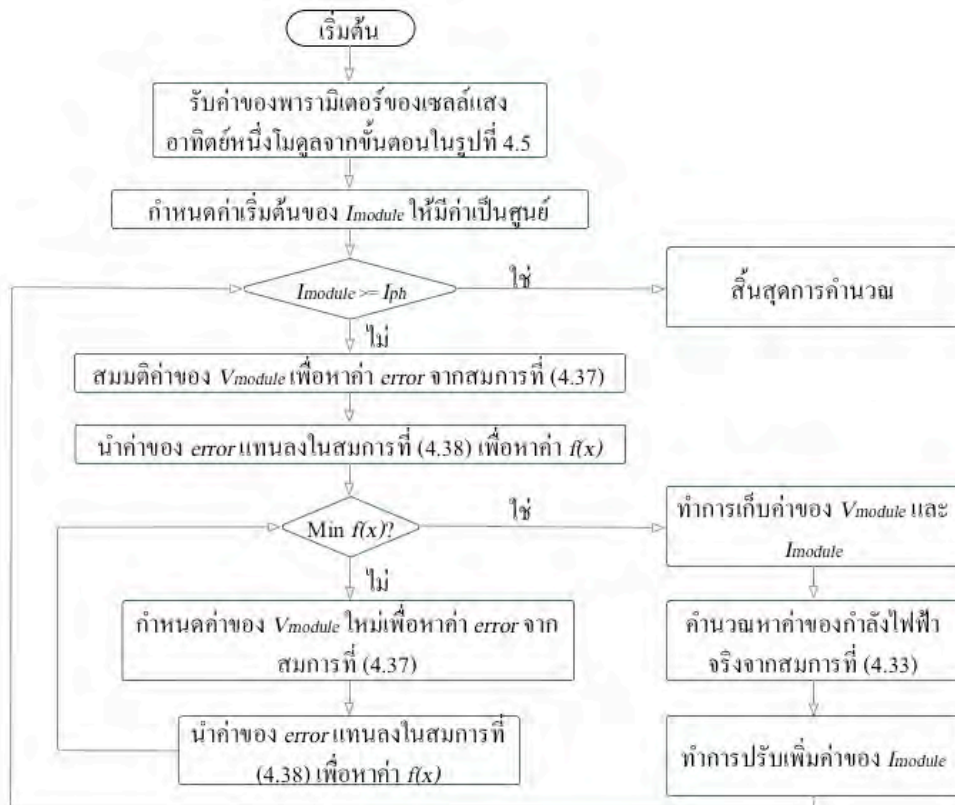
ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าจริงจากสมการที่ (4.33)

ขั้นตอนที่ 6 : ปรับเพิ่มค่าของ  $I_{module}$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และกลับสู่ขั้นตอนที่ 3 เพื่อคำนวณหาแรงดัน  $V_{module}$  ใหม่จนกระทั่ง  $I_{module}$  มีค่ามากกว่า  $I_{ph}$  จึงหยุดการคำนวณ

#### 4.6.2 ขั้นตอนคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

สำหรับขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบสองไดโอดนั้น สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.7 โดยจะมีความซับซ้อนและแตกต่างจากการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดเล็กน้อยเนื่องจากสมการที่ต่างกันและค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังคงมีแนวทางใกล้เคียงกัน โดยเริ่มจากการพิจารณาจากสมการที่ (2.13) จะพบว่าเป็นสมการไม่เชิงเส้นจึงนำหลักการค้นหาอย่างง่ายมาช่วยในการคำนวณ





รูปที่ 4.7 ขั้นตอนคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองแบบสองไดโอด

ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากรูปที่ 4.5 ซึ่งประกอบไปด้วย  $I_{ph}, I_o, a, V_{th}, N_s, R_p$  และ  $R_s$

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $I_{module}$  ให้มีค่าเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 : สมมติค่าของ  $V_{module}$  ในช่วง  $[0, V_{oc}]$  เพื่อหาค่า error จากสมการที่ (4.37) ซึ่งมีที่มาจากสมการที่ (2.13)

$$error = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{a_1 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp \left( \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{a_2 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + I_{module} R_s}{R_p} - I_{module} \quad (4.37)$$

ขั้นตอนที่ 4 : ค้นหาแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ( $V_{module}$ ) ที่จะทำให้ค่าของ  $f(x)$  จากสมการที่ (4.38) มีค่าต่ำสุด

$$f(x) = error^2 \quad (4.38)$$

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าจริงจากสมการที่ (4.33)

ขั้นตอนที่ 6 : ปรับเพิ่มค่าของ  $I_{module}$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และกลับสู่ขั้นตอนที่ 3 เพื่อคำนวณหาแรงดัน  $V_{module}$  ใหม่จนกระทั่ง  $I_{module}$  มีค่ามากกว่า  $I_{ph}$  จึงหยุดการคำนวณ

#### 4.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม โดยพารามิเตอร์ที่ขาดไปจากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด ( $I_0$ ) ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) ความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) และกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รวมถึงการปรับค่าของพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะมาตรฐาน (STC condition) ซึ่งจะแตกต่างกันไปเล็กน้อยในแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอดและชนิดสองไดโอด

## บทที่ 5

### ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 4 ถึงหลักการคำนวณพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งชนิดหนึ่งไดโอดและสองไดโอดจากข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิต ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สามารถผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริงจะไม่สามารถทำการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่โหลดตามบ้านเรือนได้โดยตรงดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 การเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าจริงที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม โดยบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า (Photovoltaic Connected System: PVGS) เพียงประเภทเดียวเนื่องจากมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

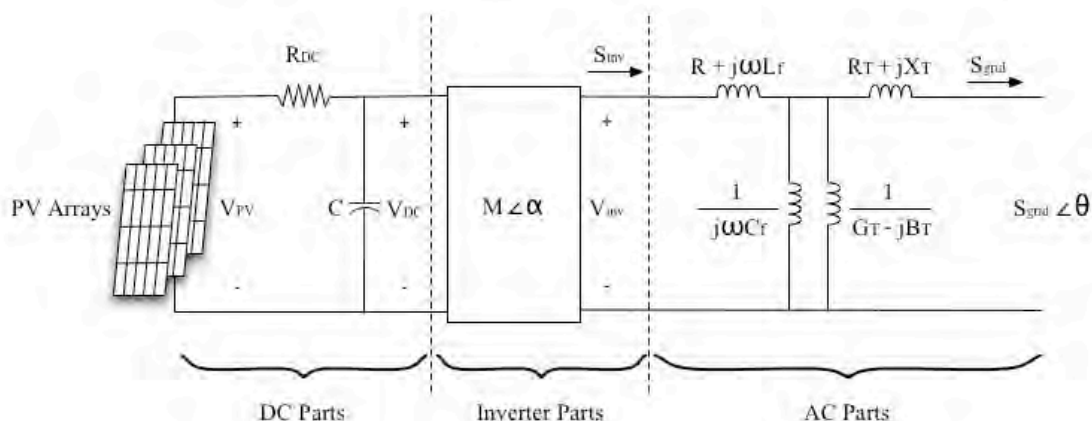
- (1) แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
- (2) ขั้นตอนคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
- (3) สรุป

#### 5.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆดังที่ได้กล่าวไป ซึ่งในบทนี้จะศึกษาแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าเพียงประเภทเดียว โดยแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

- แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรง (DC part)
- แบบจำลองส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter part)
- แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part)

แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ เข้าสู่แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ก่อนเข้าสู่แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า โดยลักษณะการเชื่อมต่อของแบบจำลองทั้งสามส่วนสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการเชื่อมต่อแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า

### 5.1.1 แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความต้านทานที่มาจากสายไฟ ( $R_{DC}$ ) และอุปกรณ์ค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) คือ คอนเวอร์เตอร์ที่มีหน้าที่ควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) โดนหลักการคำนวณจะเริ่มจากพิจารณาสมการที่ (2.14) สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด และสมการที่ (2.13) สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ดังนั้นในส่วนของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็นหัวข้อย่อยได้สามหัวข้อ คือ

- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด
- แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด
- แบบจำลองการเชื่อมต่อส่วนไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนอินเวอร์เตอร์

### 5.1.1.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด

สำหรับแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดนี้จะเริ่มจากการพิจารณาสมการที่ (2.14) ซึ่งพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{MPP}$ ) จะกล่าวได้ว่ากระแสและแรงดัน ณ จุดนั้นจะเป็นค่ากระแสและแรงดันที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด ( $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ) โดยจะสามารถแสดงสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลชนิดหนึ่งไดโอดหลังจากแทนค่าจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดได้ดังสมการที่ (5.1) [25]

$$I_{MPP} = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{R_p} \quad (5.1)$$

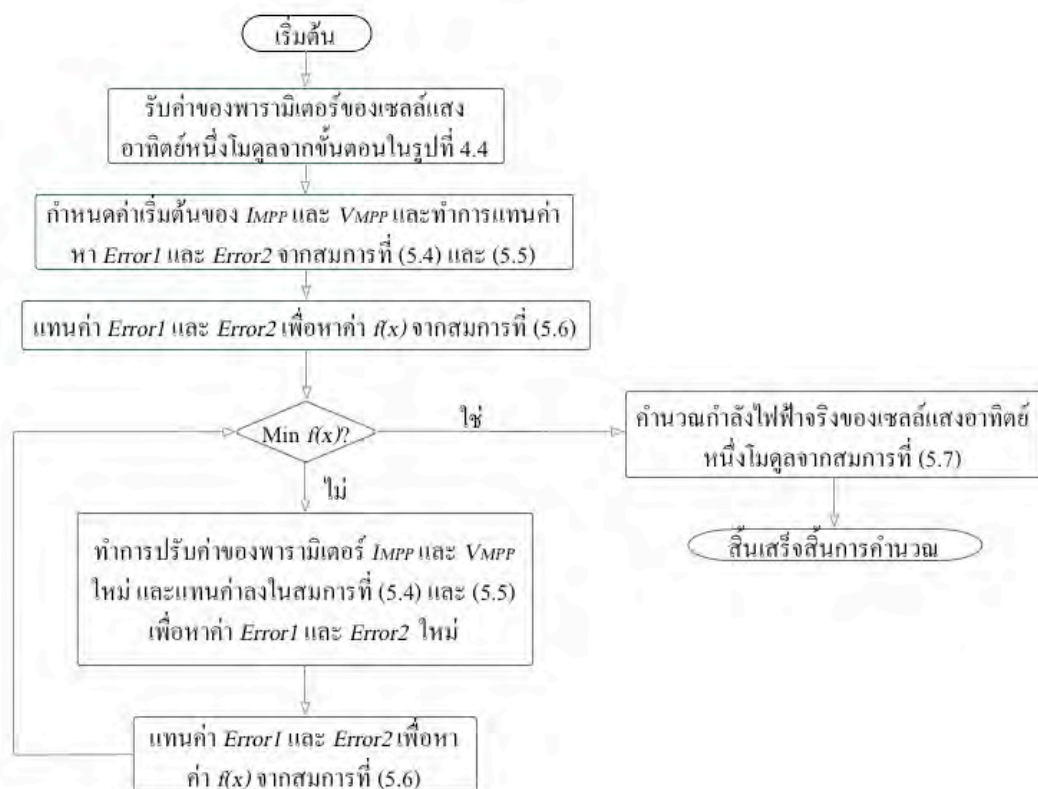
อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.14) เพียงสมการเดียวไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดได้ จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มสมการเพิ่มเติม โดยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะพบว่า หากพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดจะมีค่าอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเป็นศูนย์ ดังจะแสดงได้ในสมการที่ (5.2)

$$\left. \frac{dP_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = \left. \frac{d(I_{module} V_{module})}{dV_{module}} \right|_{MPP} = I_{module} + V_{module} \left( \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) = 0 \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.2) ซึ่งมีลักษณะเหมือนสมการที่ (4.7) และสมการที่ (5.1) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการที่ (2.14) จึงสามารถจัดสมการที่ (5.2) ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล โดยมีขั้นตอนการแปลงสมการเช่นเดียวกับการจัดรูปสมการที่ (4.7) ไปเป็นสมการที่ (4.11) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.3)

$$I_{MPP} + V_{MPP} \left( \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) - a N_s V_{th}}{a N_s V_{th} R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a N_s V_{th}}\right) + a N_s V_{th} R_s} \right) = 0 \quad (5.3)$$

ซึ่งสมการที่ (5.1) และสมการที่ (5.3) จะเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด อย่างไรก็ตามสมการทั้งสองเป็นสมการไม่เชิงเส้นจึงต้องนำหลักการค้นหาอย่างง่ายมาช่วยในการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดหนึ่งโมดูลได้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอดหนึ่งโมดูล

ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบไปด้วย  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $a$ ,  $V_{th}$ ,  $N_s$ ,  $R_p$  และ  $R_s$

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$

ขั้นตอนที่ 3 : ทำการแทนค่าของ  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$  เพื่อหา  $Error1$  และ  $Error2$  จากสมการที่ (5.4) และ (5.5)

$$Error1 = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_sV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{R_p} - I_{MPP} \quad (5.4)$$

$$Error2 = I_{MPP} + V_{MPP} \left( \frac{-I_o R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_sV_{th}}\right) - aN_sV_{th}}{aN_sV_{th}R_p + I_o R_s R_p \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{aN_sV_{th}}\right) + aN_sV_{th}R_s} \right) \quad (5.5)$$

ขั้นตอนที่ 4 : แทนค่า  $Error1$  และ  $Error2$  เพื่อหาค่า  $f(x)$  จากสมการที่ (5.6)

$$f(x) = Error1^2 + Error2^2 \quad (5.6)$$

ขั้นตอนที่ 5 : ค้นหาค่าของพารามิเตอร์  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$  ที่จะทำให้ค่าของ  $f(x)$  ในสมการที่ (5.6) มีค่าต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากสมการที่ (5.7)

$$P_{MPP} = I_{MPP} \times V_{MPP} \quad (5.7)$$

ขั้นตอนที่ 7 : สิ้นสุดการคำนวณ จะได้ค่าของพารามิเตอร์  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  และ  $P_{MPP}$  ตามต้องการ

### 5.1.1.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

สำหรับแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดนี้จะเริ่มจากการพิจารณาสมการที่ (2.13) ซึ่งพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{MPP}$ ) จะกล่าวได้ว่ากระแสและแรงดัน ณ จุดนั้นจะเป็นค่ากระแสและแรงดันที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด ( $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ) โดยจะสามารถแสดงสมการของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลชนิดสองไดโอดหลังจากแทนค่าจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดได้ดังสมการที่ (5.8) [25]

$$I_{MPP} = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{R_p} \quad (5.8)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.13) เพียงสมการเดียวไม่เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดได้ จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มสมการเพิ่มเติม โดยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะพบว่า หากพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดจะมีค่าอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเป็นศูนย์ ดังจะแสดงได้ในสมการที่ (5.2)

จากสมการที่ (5.2) ซึ่งมีลักษณะเหมือนสมการที่ (4.7) และสมการที่ (5.8) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการที่ (2.13) จึงสามารถจัดสมการที่ (5.8) ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลได้โดยเริ่มจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดหนึ่งโมดูลหรือสมการที่ (2.13) มาหาอนุพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ (5.9)

$$\left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} = - \left[ I_{o1} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) \left( \frac{1}{a_1 N_s V_{th}} + \frac{R_s}{a_1 N_s V_{th}} \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) \right] - \left[ I_{o2} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) \left( \frac{1}{a_2 N_s V_{th}} + \frac{R_s}{a_2 N_s V_{th}} \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right) \right] - \left[ \frac{1}{R_p} + \frac{R_s}{R_p} \cdot \left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP} \right] \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.9) นำมาจัดรูปโดยทำการรวมพจน์ของ  $\left. \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \right|_{MPP}$  เข้าด้วยกัน

จะได้ดังสมการที่ (5.10)



$$\frac{dI_{module}}{dV_{module}} \Big|_{MPP} = \left[ \frac{-I_{o1} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - I_{o2} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - \frac{1}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right] + \left[ \frac{dI_{module}}{dV_{module}} \Big|_{MPP} \cdot \left( \frac{-I_{o1} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - I_{o2} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - \frac{R_s}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right) \right] \quad (5.10)$$

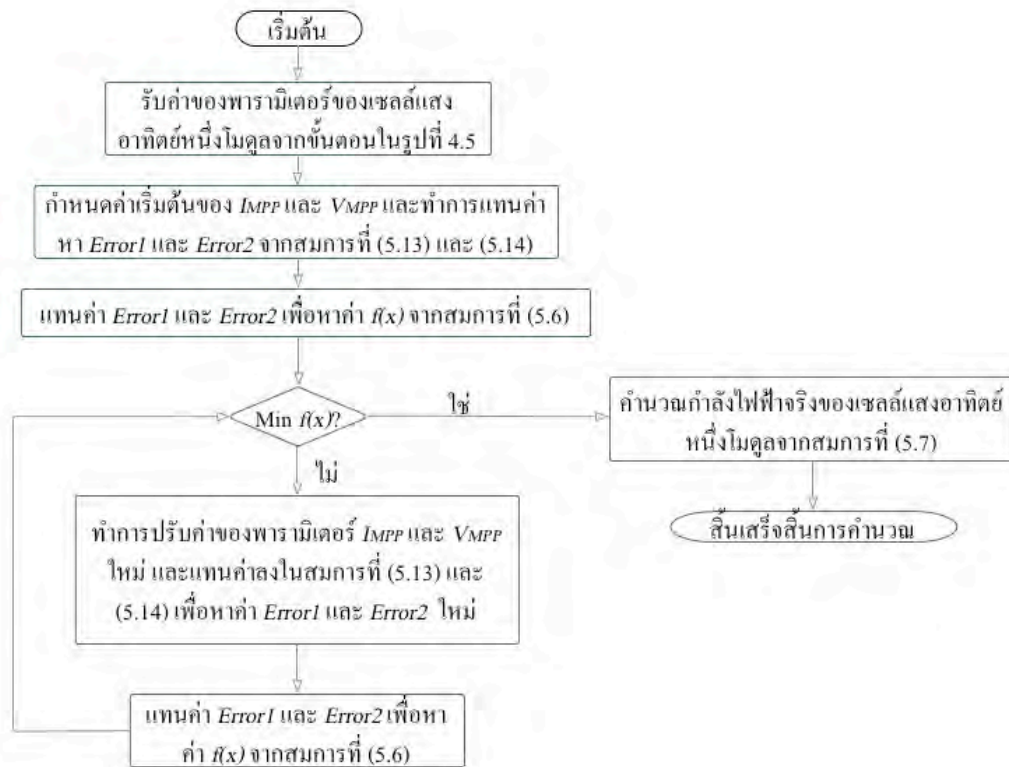
จากสมการที่ (5.10) นำมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจะได้สมการที่ (5.11)

$$\frac{dI_{module}}{dV_{module}} \Big|_{MPP} = \frac{\left( \frac{-I_{o1} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - I_{o2} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - \frac{1}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right)}{\left( 1 + \frac{I_{o1} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) + I_{o2} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) + \frac{R_s}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right)} \quad (5.11)$$

จากนั้นนำค่าของอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากสมการที่ (5.11) แทนลงในสมการที่ (5.2) จะได้ผลดังสมการที่ (5.12)

$$I_{MPP} + V_{MPP} \left( \frac{\left( \frac{-I_{o1} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - I_{o2} \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - \frac{1}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right)}{\left( 1 + \frac{I_{o1} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) + I_{o2} R_s \exp\left(\frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) + \frac{R_s}{R_p}}{a_1 N_s V_{th}} \right)} \right) = 0 \quad (5.12)$$

ซึ่งสมการที่ (5.8) และสมการที่ (5.12) จะเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด อย่างไรก็ตามสมการทั้งสองเป็นสมการไม่เชิงเส้นจึงต้องนำหลักการค้นหาอย่างง่ายมาช่วยในการคำนวณหาจุดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดหนึ่งโมดูลได้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอดหนึ่งโมดูล

ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากรูปที่ 4.5 ซึ่งประกอบไปด้วย  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $a$ ,  $V_{th}$ ,  $N_s$ ,  $R_p$  และ  $R_s$

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$

ขั้นตอนที่ 3 : ทำการแทนค่าของ  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$  เพื่อหา  $Error1$  และ  $Error2$  จากสมการที่ (5.13) และ (5.14)

$$Error1 = I_{ph} - I_{o1} \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_1 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{o2} \left[ \exp \left( \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_2 N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{R_p} - I_{MPP} \quad (5.13)$$

$$Error2 = I_{MPP} + V_{MPP} \left( \frac{\frac{-I_{o1} \exp(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_1 N_s V_{th}})}{a_1 N_s V_{th}} - \frac{I_{o2} \exp(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_2 N_s V_{th}})}{a_2 N_s V_{th}} - \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_{o1} R_s \exp(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_1 N_s V_{th}})}{a_1 N_s V_{th}} + \frac{I_{o2} R_s \exp(\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{a_2 N_s V_{th}})}{a_2 N_s V_{th}} + \frac{R_s}{R_p}} \right) \quad (5.14)$$

ขั้นตอนที่ 4 : แทนค่า  $Error1$  และ  $Error2$  เพื่อหาค่า  $f(x)$  จากสมการที่ (5.6)

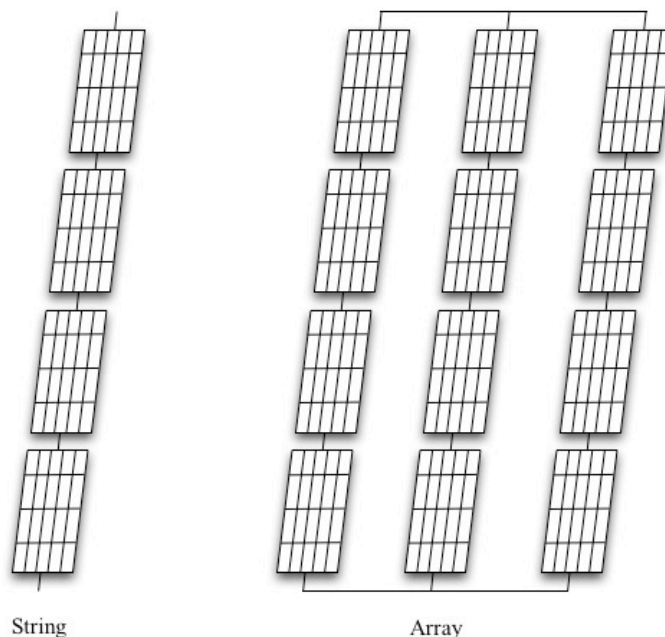
ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าของพารามิเตอร์  $I_{MPP}$  และ  $V_{MPP}$  ที่จะทำให้ค่าของ  $f(x)$  ในสมการที่ (5.6) มีค่าต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณกำลังไฟฟ้าจริงของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากสมการที่ (5.7)

ขั้นตอนที่ 7 : สิ้นสุดการคำนวณ จะได้ค่าของพารามิเตอร์  $I_{MPP}$  ,  $V_{MPP}$  และ  $P_{MPP}$  ตามต้องการ

### 5.1.1.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อส่วนไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนอินเวอร์เตอร์

โดยปกตินั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติไม่ได้นำมาใช้งานเพียงหนึ่งโมดูลแต่จะเชื่อมต่ออนุกรมกันหลายโมดูลกลายเป็นสตริง (String) และเชื่อมต่อแต่ละสตริงขนานกันเป็นอาร์เรย์ (Array) ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เป็น สตริง(ซ้าย) และอาเรย์(ขวา)

โดยการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจะช่วยเพิ่มแรงดันที่ผลิตได้ในขณะที่การเชื่อมต่อแบบขนานจะช่วยเพิ่มกระแสที่ผลิตได้ ซึ่งจะสามารถแสดงการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดได้ดังสมการที่ (5.15) ถึง (5.17)

$$V_{pv} = N_{ss} V_{MPP} \tag{5.15}$$

$$I_{pv} = N_{pp} I_{MPP} \tag{5.16}$$

$$P_{pv} = I_{pv} \times V_{pv} \tag{5.17}$$

โดย

$N_{ss}$  คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมในแต่ละสตริง (โมดูล)

$N_{pp}$  คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อแบบขนานในแต่ละสตริง (โมดูล)

$V_{pv}$	คือ	แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด (V)
$I_{pv}$	คือ	กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด (A)
$P_{pv}$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด (W)

จากรูปที่ 5.1 จะพบว่าแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงนั้นนอกจากจะประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และคอนเวอเตอร์แล้ว ยังประกอบด้วยความต้านทานจากสายไฟซึ่งโดยปกติจะสามารถละเลยความต้านทานดังกล่าวได้ ทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับแรงดันขาเข้าของแบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ ( $V_{DC}$ ) ดังสมการที่ (5.18)

$$V_{pv} = V_{DC} \quad (5.18)$$

โดย

$V_{DC}$  คือ แรงดันขาเข้าสู่แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ (V)

### 5.1.2 แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์

แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์นั้นมีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งเป็นส่วนที่เข้าสู่แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ ให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นกระแสที่ออกจากแบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ โดยแบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ครึ่งบริดจ์สามเฟส และ Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) โดยแรงดันของเฟส A จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.19) ในขณะที่แรงดันเฟส B และเฟส C จะมีลักษณะคล้ายกับเฟส A คือ มีขนาดของแรงดันเท่ากันแต่มุมจะต่างกันเฟสละ 120 องศา

$$V_{inv} \angle \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} MV_{DC} \angle \alpha \quad (5.19)$$

โดย

$V_{inv}$  คือ แรงดันขาออกของแบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ (V)

$M$  คือ Amplitude modulation ratio

$\alpha$  คือ มุมของอินเวอร์เตอร์ (Phase shift angle) (Degree)

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้าและขาออกจากอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (5.20)

$$P_{inv} = kP_{pv} \quad (5.20)$$

โดย

$k$  คือ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (%)

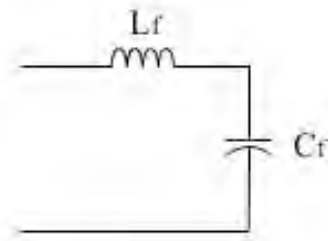
### 5.1.3 แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ

แบบจำลองส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับจะเป็นแบบจำลองส่วนที่มีไฟฟ้ากระแสสลับไหลภายในเพียงอย่างเดียว โดยภายในแบบจำลองดังกล่าวจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สองตัว คือ

- ฟิลเตอร์
- หม้อแปลงไฟฟ้า

#### ฟิลเตอร์

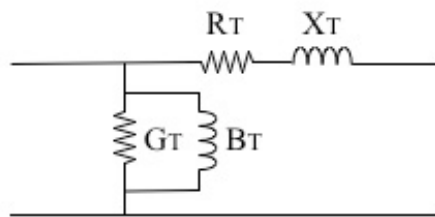
ฟิลเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการกรองความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้งไปซึ่งวงจรสมมูลของฟิลเตอร์จะประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_f$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_f$ ) โดยวงจรสมมูลของฟิลเตอร์หนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

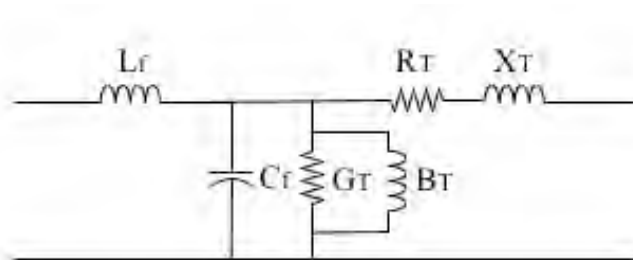
### หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยกขนาดของแรงดันให้สูงพอที่จะเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าได้ ซึ่งวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



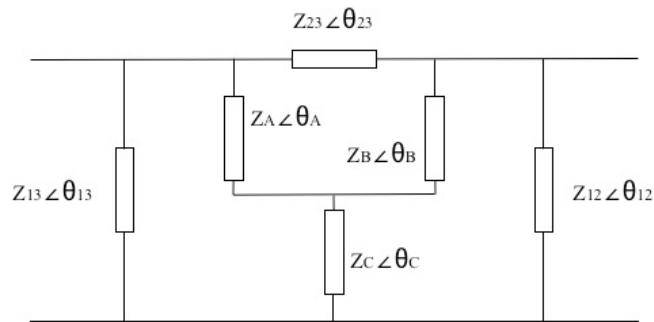
รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งสองประเภทมารวมกันจะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 5.7 ซึ่งแสดงวงจรสมมูลของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อแบบวาย



รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อแบบวาย

รูปที่ 5.7 จะเป็นวงจรสมมูลเพื่อใช้วิเคราะห์หากำลังปรากฏและแรงดันขาเข้าของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ ร่วมกับกำลังปรากฏและแรงดันขาออกของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 5.7 แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับมีการเชื่อมต่อแบบวายเป็นการเชื่อมต่อแบบเดลต้า ซึ่งหลักการแปลงการเชื่อมต่อแบบวายเป็นการเชื่อมต่อแบบเดลต้า ซึ่งหลักการแปลงการเชื่อมต่อแบบวายเป็นเดลต้าสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.8 และสมการที่ (5.21) ถึงสมการที่ (5.23)



รูปที่ 5.8 การเชื่อมต่อแบบวายเป็นเดลต้า

$$Z_{12} \angle \theta_{12} = \frac{Z_A Z_B \angle (\theta_A + \theta_B) + Z_A Z_C \angle (\theta_A + \theta_C) + Z_B Z_C \angle (\theta_B + \theta_C)}{Z_C \angle \theta_C} \quad (5.21)$$

$$Z_{13} \angle \theta_{13} = \frac{Z_A Z_B \angle (\theta_A + \theta_B) + Z_A Z_C \angle (\theta_A + \theta_C) + Z_B Z_C \angle (\theta_B + \theta_C)}{Z_B \angle \theta_B} \quad (5.22)$$

$$Z_{23} \angle \theta_{23} = \frac{Z_A Z_B \angle (\theta_A + \theta_B) + Z_A Z_C \angle (\theta_A + \theta_C) + Z_B Z_C \angle (\theta_B + \theta_C)}{Z_A \angle \theta_A} \quad (5.23)$$

จากรูปที่ 5.8 จะพบว่าค่าของอิมพีแดนซ์  $Z_A, \theta_A, Z_B, \theta_B, Z_C$  และ  $\theta_C$  นั้นจะแสดงได้ดังสมการที่ (5.24) ถึงสมการที่ (5.26) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 5.1

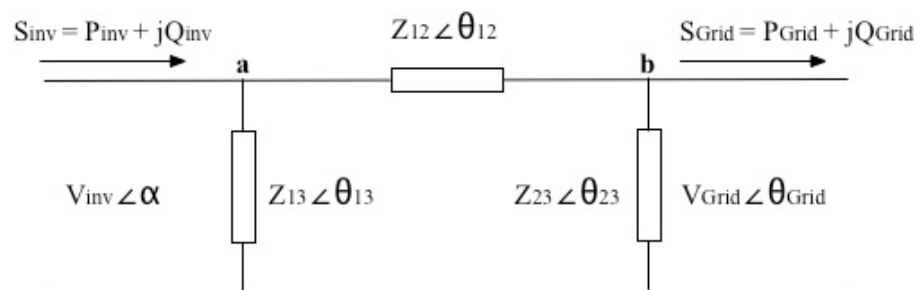
$$Z_A \angle \theta_A = j\omega L_f \quad (5.24)$$



$$Z_B \angle \theta_B = \frac{1}{j\omega C_f + G_T - jB_T} \quad (5.25)$$

$$Z_C \angle \theta_C = R_T + jX_T \quad (5.26)$$

เมื่อพารามิเตอร์จากการเชื่อมต่อแบบวายแปลงเป็นพารามิเตอร์การเชื่อมต่อแบบเดลต้าแล้ว จะสามารถแสดงการเชื่อมต่อพารามิเตอร์หลังจากการแปลงวายเป็นเดลต้าได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เชื่อมต่อแบบเดลต้า

การคำนวณกำลังปรากฏขาเข้าและขาออกของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ ( $S_{inv}$  และ  $S_{Grid}$ ) ซึ่งจะเริ่มการคำนวณจากฝั่งขาเข้า โดยเริ่มจากสมการที่ (5.27)

$$S_{inv} = V_{inv} \tilde{I}_{inv} \quad (5.27)$$

จากรูปที่ 5.9 พิจารณาผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ณ จุด a โดยใช้หลักการของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's current law) ที่กล่าวว่าผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าสู่จุด a จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากจุด a ดังสมการที่ (5.28)

$$\sum I_{in,a} = \sum I_{out,a} \quad (5.28)$$

เมื่อทำการแทนค่าของกระแสที่สามารถหาได้จากรูปที่ 5.9 ลงในสมการที่ (5.28) จะได้ผลดังสมการที่ (5.29)

$$I_{inv} = \frac{V_{inv} \angle \alpha}{Z_{13} \angle \theta_{13}} + \frac{V_{inv} \angle \alpha - V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{12} \angle \theta_{12}} \quad (5.29)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (5.29) ลงในสมการที่ (5.27) จะได้ผลดังสมการที่ (5.30)

$$S_{inv} = V_{inv} \angle \alpha \left( \frac{V_{inv} \angle \alpha}{Z_{13} \angle \theta_{13}} + \frac{V_{inv} \angle \alpha - V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{12} \angle \theta_{12}} \right) \quad (5.30)$$

เมื่อจัดรูปของสมการที่ (5.30) ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ที่ปรากฏในรูปที่ 5.9 จะได้ผลดังสมการที่ (5.31)

$$S_{inv} = P_{inv} + jQ_{inv} = V_{inv} \angle \alpha \left( \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \angle (\alpha - \theta_{13}) + \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \angle (\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \angle (\theta_{Grid} - \theta_{12}) \right) \quad (5.31)$$

จากนั้นจัดรูปแบบทางพีชคณิตของสมการที่ (5.31) ให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อนที่เขียนในรูป  $a + jb$  จะได้ผลดังสมการที่ (5.32)

$$P_{inv} + jQ_{inv} = (V_{inv} \cos \alpha) \left[ \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \cos(\alpha - \theta_{13}) + \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos(\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{12}) \right] \\ + (jV_{inv} \sin \alpha) \left[ -j \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \sin(\alpha - \theta_{13}) - j \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\alpha - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{12}) \right] \quad (5.32)$$

จากนั้นให้ส่วนจริงของสมการมีค่าเท่ากับส่วนจริงของสมการที่ (5.32) และส่วนจินตภาพของสมการมีค่าเท่ากับส่วนจินตภาพของสมการที่ (5.32) จะได้ผลดังสมการที่ (5.33) และสมการที่ (5.34) ตามลำดับ

$$P_{inv} = (V_{inv} \cos \alpha) \left[ \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \cos(\alpha - \theta_{13}) + \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos(\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{12}) \right] \quad (5.33)$$

$$jQ_{inv} = (jV_{inv} \sin \alpha) \left[ -j \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \sin(\alpha - \theta_{13}) - j \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\alpha - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{12}) \right] \quad (5.34)$$

จากนั้นพิจารณาคูณสมบัติการกระจายโคไซน์ในแต่ละพจน์ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติตั้งสมการที่ (5.35) เพื่อกระจายและจัดรูปสมการที่ (5.33) ซึ่งจะได้ผลตั้งสมการที่ (5.36)

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B \quad (5.35)$$

$$P_{inv} = V_{inv} \left( \frac{V_{inv} \cos \theta_{13}}{Z_{13}} + \frac{V_{inv} \cos \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos(\alpha - \theta_{Grid} + \theta_{12})}{Z_{12}} \right) \quad (5.36)$$

และพิจารณาคูณสมบัติการกระจายไซน์ในแต่ละพจน์ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติตั้งสมการที่ (5.37) เพื่อกระจายและจัดรูปสมการที่ (5.34) ซึ่งจะได้ผลตั้งสมการที่ (5.38)

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B \quad (5.37)$$

$$Q_{inv} = V_{inv} \left( \frac{V_{inv} \sin \theta_{13}}{Z_{13}} + \frac{V_{inv} \sin \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \sin(\alpha - \theta_{Grid} + \theta_{12})}{Z_{12}} \right) \quad (5.38)$$

ต่อมาพิจารณาการคำนวณกำลังปรากฏขาออกของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ ( $S_{Grid}$ ) ซึ่งจะแสดงการคำนวณโดยเริ่มจากสมการที่ (5.39)

$$S_{Grid} = V_{Grid} \tilde{I}_{Grid} \quad (5.39)$$

จากรูปที่ 5.9 พิจารณาผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ณ จุด b โดยใช้หลักการของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's current law) ที่กล่าวว่าผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าสู่จุด b จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากจุด b ตั้งสมการที่ (5.40)

$$\sum I_{in,b} = \sum I_{out,b} \quad (5.40)$$

เมื่อทำการแทนค่าของกระแสที่สามารถหาได้จากรูปที่ 5.9 ลงในสมการที่ (5.40) จะได้ผลดังสมการที่ (5.41)

$$I_{Grid} = \frac{V_{inv} \angle \alpha - V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{12} \angle \theta_{12}} - \frac{V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{23} \angle \theta_{23}} \quad (5.41)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (5.41) ลงในสมการที่ (5.39) จะได้ผลดังสมการที่ (5.42)

$$S_{Grid} = V_{Grid} \angle \theta_{Grid} \left( \frac{V_{inv} \angle \alpha - V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{12} \angle \theta_{12}} - \frac{V_{Grid} \angle \theta_{Grid}}{Z_{23} \angle \theta_{23}} \right) \quad (5.42)$$

เมื่อจัดรูปของสมการที่ (5.42) ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ที่ปรากฏในรูปที่ 5.9 จะได้ผลดังสมการที่ (5.43)

$$S_{Grid} = P_{Grid} + jQ_{Grid} = V_{Grid} \angle \theta_{Grid} \left( \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \angle (\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \angle (\theta_{Grid} - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \angle (\theta_{Grid} - \theta_{23}) \right) \quad (5.43)$$

จากนั้นจัดรูปแบบทางฝั่งขวามือของสมการที่ (5.43) ให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อนที่เขียนในรูป  $a + jb$  จะได้ผลดังสมการที่ (5.44)

$$P_{Grid} + jQ_{Grid} = (V_{Grid} \cos \theta_{Grid}) \left[ \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos(\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{23}) \right] \\ + (jV_{Grid} \sin \theta_{Grid}) \left[ -j \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\alpha - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{23}) \right] \quad (5.44)$$

จากนั้นให้ส่วนจริงของสมการมีค่าเท่ากับส่วนจริงของสมการที่ (5.44) และส่วนจินตภาพของสมการมีค่าเท่ากับส่วนจินตภาพของสมการที่ (5.44) จะได้ผลดังสมการที่ (5.45) และสมการที่ (5.46) ตามลำดับ

$$P_{Grid} = (V_{Grid} \cos \theta_{Grid}) \left[ \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos(\alpha - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{12}) - \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \cos(\theta_{Grid} - \theta_{23}) \right] \quad (5.45)$$

$$jQ_{Grid} = (jV_{Grid} \sin \theta_{Grid}) \left[ -j \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\alpha - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{12}) + j \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \sin(\theta_{Grid} - \theta_{23}) \right] \quad (5.46)$$

จากนั้นพิจารณาคุณสมบัติการกระจายโคไซน์ในแต่ละพจน์ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติดังสมการที่ (5.35) เพื่อกระจายและจัดรูปสมการที่ (5.46) ซึ่งจะได้ผลดังสมการที่ (5.47)

$$P_{Grid} = V_{Grid} \left( \frac{V_{inv} \cos(\theta_{Grid} - \alpha + \theta_{12})}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{23}}{Z_{23}} \right) \quad (5.47)$$

และพิจารณาคุณสมบัติการกระจายไซน์ในแต่ละพจน์ด้วยสมบัติของตรีโกณมิติดังสมการที่ (5.37) เพื่อกระจายและจัดรูปสมการที่ (5.47) ซึ่งจะได้ผลดังสมการที่ (5.48)

$$Q_{Grid} = V_{Grid} \left( \frac{V_{inv} \sin(\theta_{Grid} - \alpha + \theta_{12})}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \sin \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{23}}{Z_{23}} \right) \quad (5.48)$$

เนื่องจากสมการที่ (5.36), (5.38), (5.47) และ (5.48) ที่ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนขาเข้าและขาออกของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ ( $P_{inv}$ ,  $Q_{inv}$ ,  $P_{Grid}$  และ  $Q_{Grid}$ ) นั้นเป็นสมการหนึ่งเฟสเท่านั้น ทว่าการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะพิจารณาในรูปแบบของไฟฟ้าสามเฟส ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมการที่ (5.36), (5.38), (5.47) และ (5.48) ให้อยู่ในรูปแบบไฟฟ้าสามเฟสได้ดังแสดงในสมการที่ (5.49) ถึงสมการที่ (5.52)

$$P_{inv} = 3V_{inv} \left( \frac{V_{inv} \cos \theta_{13}}{Z_{13}} + \frac{V_{inv} \cos \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos(\alpha - \theta_{Grid} + \theta_{12})}{Z_{12}} \right) \quad (5.49)$$

$$Q_{inv} = 3V_{inv} \left( \frac{V_{inv} \sin \theta_{13}}{Z_{13}} + \frac{V_{inv} \sin \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \sin(\alpha - \theta_{Grid} + \theta_{12})}{Z_{12}} \right) \quad (5.50)$$

$$P_{Grid} = 3V_{Grid} \left( \frac{V_{inv} \cos(\theta_{Grid} - \alpha + \theta_{12})}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{23}}{Z_{23}} \right) \quad (5.51)$$

$$Q_{Grid} = 3V_{Grid} \left( \frac{V_{inv} \sin(\theta_{Grid} - \alpha + \theta_{12})}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \sin \theta_{12}}{Z_{12}} - \frac{V_{Grid} \cos \theta_{23}}{Z_{23}} \right) \quad (5.52)$$

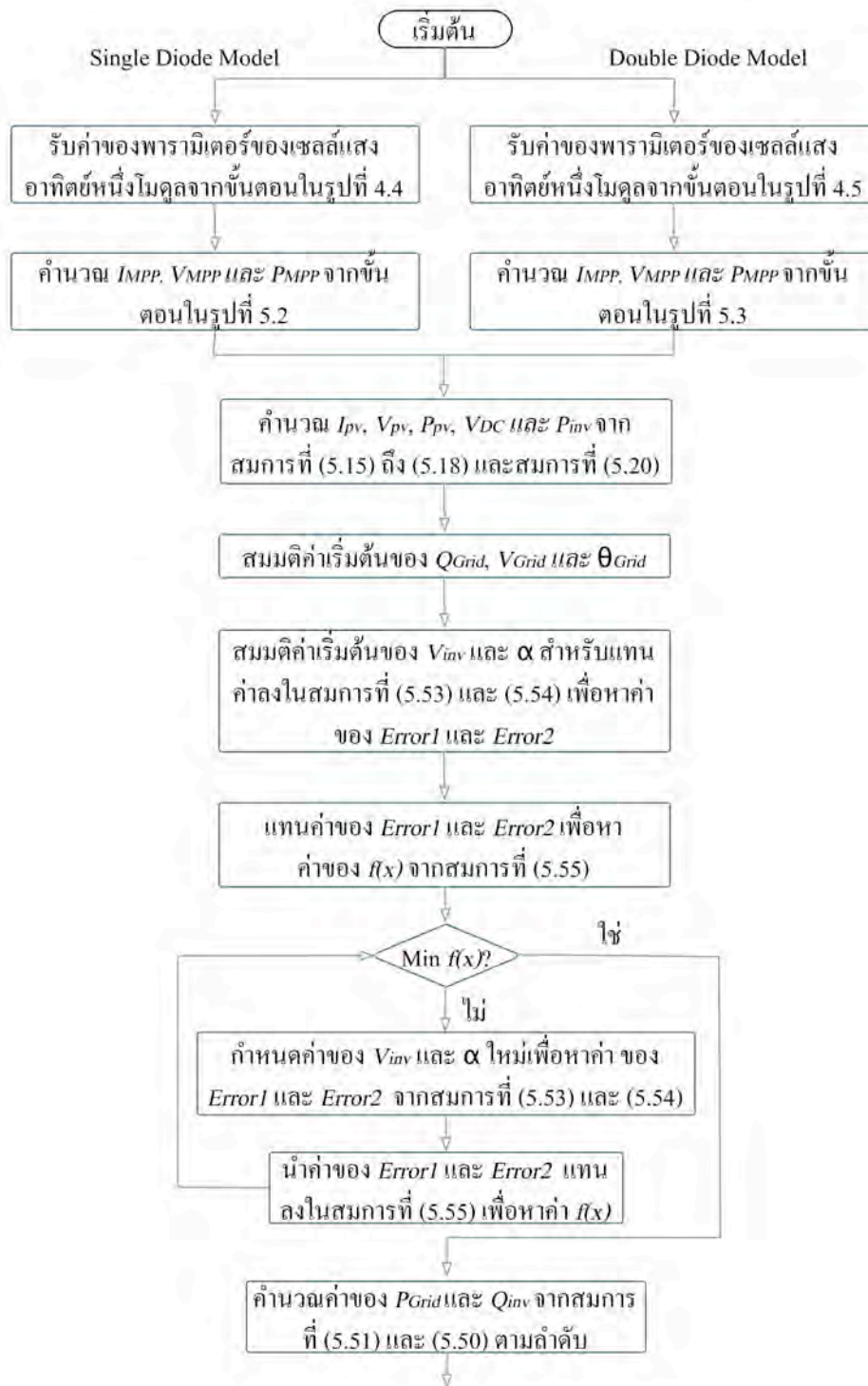
## 5.2 ขั้นตอนคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อยสามส่วนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.1 โดยการวิเคราะห์แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าจะพิจารณากำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ที่อยู่ในทุกตำแหน่งของแบบจำลองทั้งสาม ซึ่งจะประกอบไปด้วย  $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$ ,  $P_{pv}$ ,  $V_{DC}$ ,  $M$ ,  $V_{inv}$ ,  $\alpha$ ,  $P_{inv}$ ,  $Q_{inv}$ ,  $V_{Grid}$ ,  $\theta_{Grid}$ ,  $P_{Grid}$  และ  $Q_{Grid}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ทั้งนี้การคำนวณพารามิเตอร์ภายในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องประยุกต์รวมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow calculation)

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาพัฒนาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์สองรูปแบบ คือ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด และแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.1.1.1 สำหรับส่วนของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด และ 5.1.1.2 สำหรับส่วนของแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด จะพบว่าการคำนวณหาค่าของแบบจำลองส่วน

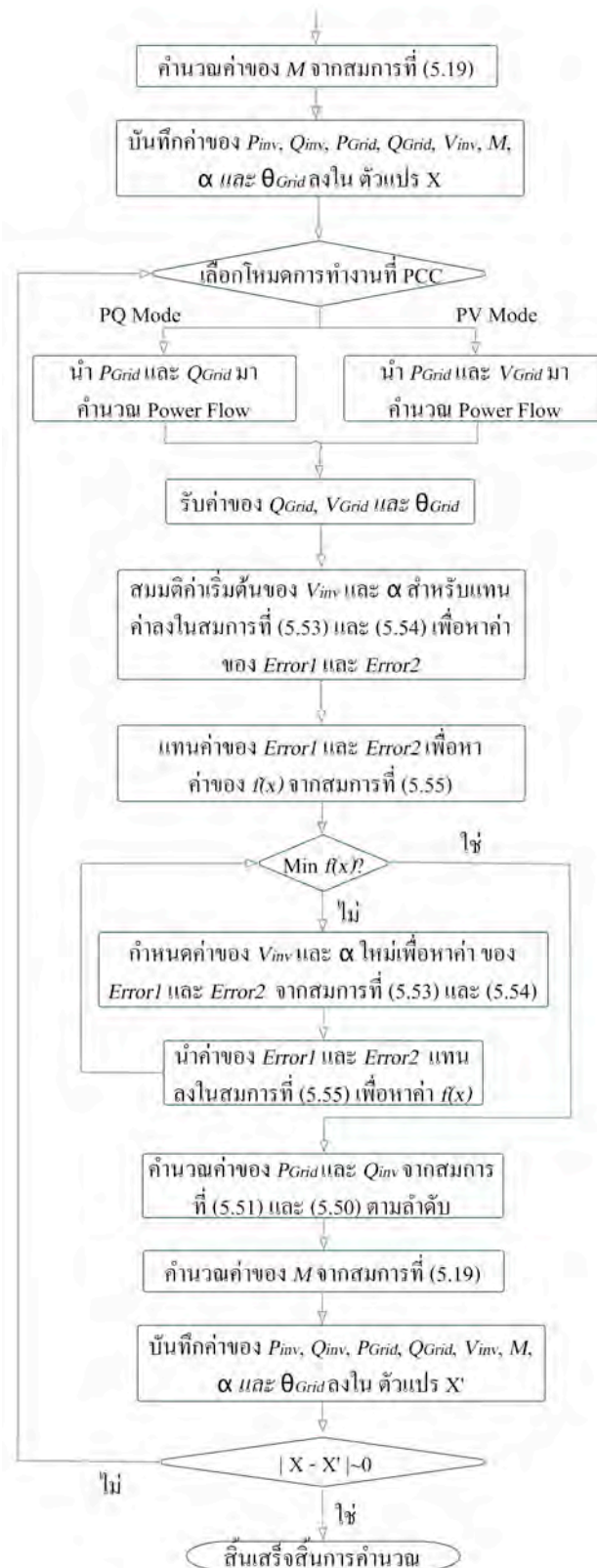
ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีกระบวนการที่แตกต่างกันเล็กน้อย ตามแต่ชนิดของแบบจำลอง ซึ่งส่งผลถึงขั้นตอนการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้านี้ด้วย ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 5.10

นอกจากนั้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ถึงโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองโหมด คือ PQ โหมดและ PV โหมด ดังนั้นการแสดงผลการคำนวณในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นสองกรณีตามแต่ประเภทของโหมดการทำงาน ซึ่งจะสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าได้ในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า





รูปที่ 5.10 (ต่อ) ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า

- ขั้นตอนที่ 1 : รับค่าของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากขั้นตอนในรูปที่ 4.4 (สำหรับแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอด) หรือ รับค่าของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากขั้นตอนในรูปที่ 4.5 (สำหรับแบบจำลองชนิดสองไดโอด)
- ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณหา  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  และ  $P_{MPP}$  จากขั้นตอนในรูปที่ 5.2 (สำหรับแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอด) หรือ คำนวณหา  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  และ  $P_{MPP}$  จากขั้นตอนในรูปที่ 5.3 (สำหรับแบบจำลองชนิดสองไดโอด)
- ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณ  $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$ ,  $P_{pv}$ ,  $V_{DC}$  และ  $P_{inv}$  จากสมการที่ (5.15) ถึง (5.18) และสมการที่ (5.20)
- ขั้นตอนที่ 4 : สมมติค่าเริ่มต้นของ  $Q_{Grid}$ ,  $V_{Grid}$  และ  $\theta_{Grid}$
- ขั้นตอนที่ 5 : สมมติค่าเริ่มต้นของ  $V_{inv}$  และ  $\alpha$  สำหรับแทนค่าลงในสมการที่ (5.53) และ (5.54) เพื่อหาค่าของ  $Error1$  และ  $Error2$

$$Error1 = \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos\theta_{12} + \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \cos\theta_{13} - \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{Grid} - \alpha - \theta_{12}) - P_{inv} \quad (5.53)$$

$$Error2 = 3V_{Grid} \left( \frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\alpha - \theta_{Grid} - \theta_{12}) + \frac{V_{Grid}}{Z_{12}} \sin\theta_{12} + \frac{V_{Grid}}{Z_{23}} \sin\theta_{23} \right) - Q_{Grid} \quad (5.54)$$

- ขั้นตอนที่ 6 : แทนค่า  $Error1$  และ  $Error2$  เพื่อหาค่า  $f(x)$  จากสมการที่ (5.55)

$$f(x) = Error1^2 + Error2^2 \quad (5.55)$$

- ขั้นตอนที่ 7 : ค้นหาค่าของพารามิเตอร์  $V_{inv}$  และ  $\alpha$  ที่จะทำให้ค่าของ  $f(x)$  ในสมการที่ (5.55) มีค่าต่ำที่สุด

- ขั้นตอนที่ 8 : คำนวณค่าของ  $P_{Grid}$  และ  $Q_{inv}$  จากสมการที่ (5.51) และ (5.50) ตามลำดับ
- ขั้นตอนที่ 9 : คำนวณค่าของ  $M$  จากสมการที่ (5.19)
- ขั้นตอนที่ 10: บันทึกค่าของ  $P_{inv}, Q_{inv}, P_{Grid}, Q_{Grid}, V_{inv}, M, \alpha$  และ  $\theta_{Grid}$  ลงใน ตัวแปร  $X$
- ขั้นตอนที่ 11: เลือกโหมดการทำงานที่ PCC (PV Mode หรือ PQ Mode)
- ขั้นตอนที่ 12: นำ  $P_{Grid}$  และ  $Q_{Grid}$  มาคำนวณ Power Flow (สำหรับ PQ Mode) หรือ นำ  $P_{Grid}$  และ  $V_{Grid}$  มาคำนวณ Power Flow (สำหรับ PV Mode)
- ขั้นตอนที่ 13: รับค่าของ  $Q_{Grid}, V_{Grid}$  และ  $\theta_{Grid}$  จาก Power flow
- ขั้นตอนที่ 14: กระทำตามขั้นตอนที่ 5 ถึงขั้นตอนที่ 9 อีกครั้ง และบันทึกค่าของ  $P_{inv}, Q_{inv}, P_{Grid}, Q_{Grid}, V_{inv}, M, \alpha$  และ  $\theta_{Grid}$  ลงใน ตัวแปร  $X'$
- ขั้นตอนที่ 15: กระทำตามขั้นตอนที่ 11 ถึงขั้นตอนที่ 14 จนกระทั่งค่าของ  $X$  และ  $X'$  มีค่าใกล้เคียงกัน

### 5.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองที่พิจารณาจะประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อยอีกสามส่วน คือ แบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองส่วนอินเวอร์เตอร์ และแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ อีกทั้งได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองย่อยส่วนต่างๆ และมีการวิเคราะห์โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ด้วย รวมถึงการแสดงขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองเมื่อมีการทำงาน ทั้งในโหมด PQ และโหมด PV ร่วมกับการไหลของกำลังไฟฟ้าอีกด้วย

## บทที่ 6

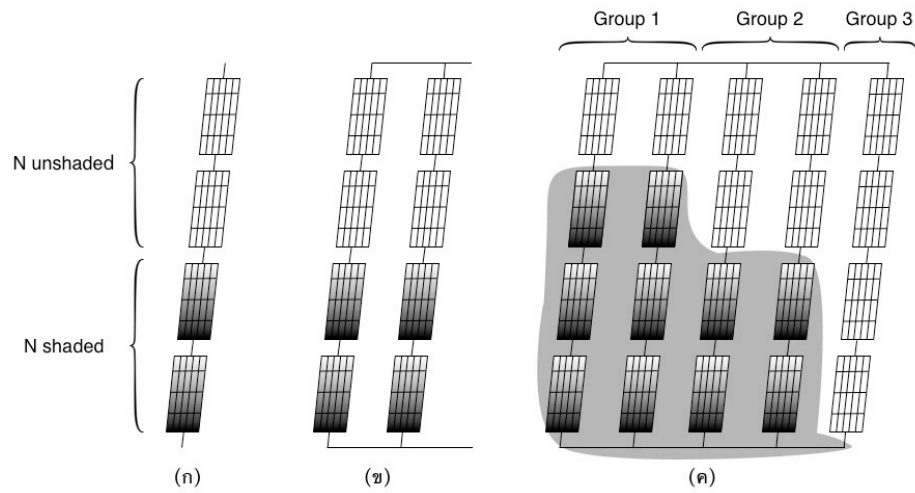
### การบังแสงแดด

จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ถึงผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งในกรณีที่มีบายพาสไดโอดและไม่มีบายพาสไดโอด อย่างไรก็ตามแม้ว่าในปัจจุบันทางผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แทบทั้งหมดได้มีการติดตั้งบายพาสไดโอดรวมอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์ของตนแล้วก็ตาม [31], [32], [33] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงผลของการบังแสงแดดในกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีบายพาสไดโอดด้วยพอลัสเซป ซึ่งในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 6 หัวข้อ คือ

- (1) การวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (2) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอด
- (3) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอด
- (4) ขั้นตอนคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด
- (5) ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งอาร์เรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด
- (6) สรุป

#### 6.1 การวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะแบ่งการพิจารณาออกเป็นกลุ่ม โดยในกลุ่มเดียวกันจะมีจำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดด ( $N_{shaded}$ ) และปริมาณการถูกบดบังความเข้มแสงที่เท่ากัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 6.1 [17]



รูปที่ 6.1 (ก) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดในหนึ่งสตรึง (ข) กลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ และ (ค) อาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มที่ถูกบังแสงแดดจำนวนสามกลุ่ม

จากรูปที่ 6.1(ก) จะพบว่าในหนึ่งสตรึง จะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดดจำนวน  $N_{unshaded}$  โมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดจำนวน  $N_{shaded}$  โมดูล ดังนั้นในหนึ่งสตรึงจะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจำนวน  $N_{total}$  โมดูล ดังสมการที่ (6.1)

$$N_{total} = N_{shaded} + N_{unshaded} \quad (6.1)$$

และเรียกสตรึงที่มีลักษณะการบังแสงแดดเหมือนกันที่มีการต่อขนานกันว่า “กลุ่ม” ดังรูปที่ 6.1(ข) อย่างไรก็ตามในหนึ่งอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถประกอบไปด้วยกลุ่มที่เกิดการบังแสงแดดมากกว่าหนึ่งกลุ่มได้ ดังรูปที่ 6.1(ค) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของการบังแสงแดดของอาเรย์ได้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ลักษณะการบังแสงแดดของอาคารในรูปที่ 6.1 (ค)

กลุ่ม ที่	จำนวนโมดูลที่ไม่ ถูกบังแสงแดด	จำนวนโมดูลที่ถูก บังแสงแดด	จำนวนสตริงของ แต่ละกลุ่ม	จำนวนโมดูล ทั้งหมดในกลุ่ม
1	1	3	2	8
2	2	2	2	8
3	4	0	1	4

และจากรูปที่ 6.1(ก) จะพบว่าในแต่ละสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดดจำนวน  $N_{unshaded}$  โมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดจำนวน  $N_{shaded}$  โมดูล โดยแรงดันของแต่ละสตริง ( $V_{string}$ ) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.2)

$$V_{string} = N_{unshaded} V_{unshaded} + N_{shaded} V_{shaded} \quad (6.2)$$

โดย

$V_{unshaded}$  คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด (V)

$V_{shaded}$  คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อเกิดการบังแสงแดด (V)

## 6.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอด

สำหรับการวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอด (ซึ่งในทางปฏิบัติจะระบุอยู่ในข้อมูลทางเทคนิค) นั้นจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ

- เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด

### 6.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดด

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดดนั้น จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (6.3) ซึ่งมีที่มาจากสมการที่ (2.13) ภายใต้สภาวะที่ไม่เกิดการบังแสงแดด (Unshaded) นั้นเอง

$$I_{unshaded} = I_{ph(unshaded)} - I_{o1(unshaded)} \left[ \exp\left(\frac{V_{unshaded} + I_{unshaded}R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2(unshaded)} \left[ \exp\left(\frac{V_{unshaded} + I_{unshaded}R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{unshaded} + I_{unshaded}R_s}{R_p}$$

(6.3)

โดย

$I_{unshaded}$	คือ	กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด (A)
$V_{unshaded}$	คือ	แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด (V)

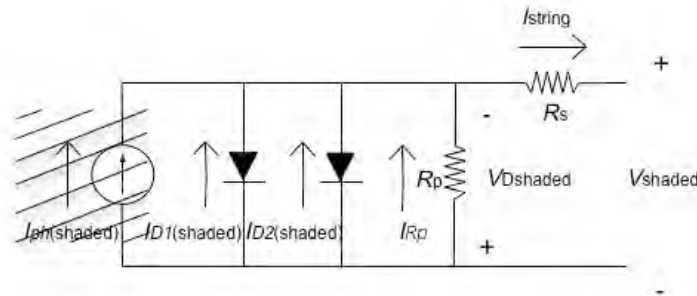
### 6.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดดนั้น ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.4.4 ว่าเมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้นจะส่งผลให้ค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าลดลง ( $I_{ph,shaded}$ ) ต่ำกว่าในสภาวะปกติที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $I_{ph,unshaded}$ ) ทำให้ในบางช่วงของกระแสในสตริง ( $I_{string}$ ) ที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ถูกบังแสงแดดนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นโหลด ( $I_{ph,shaded} \leq I_{string} \leq I_{ph,unshaded}$ ) และในบางช่วงของกระแสในสตริงที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ถูกบังแสงแดดนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟปกติ ( $I_{ph,unshaded} < I_{string} < I_{ph,shaded}$ ) ดังนั้นจึงแบ่งพิจารณาออกเป็นสองช่วงกระแส ดังต่อไปนี้

### 6.2.2.1 ช่วงกระแสที่ เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นโหลด

$$(I_{ph,shaded} \leq I_{string} \leq I_{ph,unshaded})$$

เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด หากมีกระแสที่ไหลผ่านในช่วงนี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นโหลดแทนที่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งเป็นผลจากการที่กระแสในสตริง ( $I_{string}$ ) ที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลมีค่ามากกว่ากระแสโฟโตอิล็กทริกส์เมื่อเกิดการบังแสงแดด ( $I_{ph,shaded}$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.28) ทำให้ไดโอดในวงจรเกิดการไบแอสย้อน (Reverse bias) โดยทิศทางของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 [17], [18]



รูปที่ 6.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด

จากรูปที่ 6.2 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.4)

$$I_{string} = I_{ph,shaded} + I_{o1} \left[ \exp\left(\frac{-V_{shaded} - I_{string} R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] + I_{o2} \left[ \exp\left(\frac{-V_{shaded} - I_{string} R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] + \frac{-V_{shaded} - I_{string} R_s}{R_p} \quad (6.4)$$

โดย

$I_{string}$  คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ไหลในสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด (A)



หรือเมื่อพิจารณาว่าค่าของกระแสอิ่มตัวทั้งสอง ( $I_{o1}, I_{o2}$ ) มีค่าน้อยมาก สมการที่ (6.4) จะลดรูปเป็น

$$I_{string} \cong I_{ph,shaded} + \frac{-V_{shaded} - I_{string} R_s}{R_p} \quad (6.5)$$

จากสมการที่ (6.5) นำมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเมื่อเกิดการบังแสงแดด จะได้เป็นสมการที่ (6.6) และมีทิศทางแสดงในรูปที่ 6.2 อย่างไรก็ตามแรงดันที่ได้จะมีค่าเป็นลบ เนื่องจากค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ไหลในสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดมีค่ามากกว่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์เมื่อเกิดการบังแสงแดด ( $I_{string} > I_{ph,shaded}$ ) จึงส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นโหลดนั่นเอง

$$V_{shaded} \cong (I_{ph,shaded} - I_{string}) R_p - I_{string} R_s \quad (6.6)$$

**6.2.2.2 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย ( $0 < I_{string} < I_{ph,shaded}$ )**

เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด หากมีกระแสที่ไหลผ่านในช่วงนี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟปกติเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดดในช่วงกระแสนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.7)

$$I_{shaded} = I_{ph,shaded} - I_{o1(shaded)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shaded} + I_{string} R_s}{a_1 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - I_{o2(shaded)} \left[ \exp\left(\frac{V_{shaded} + I_{string} R_s}{a_2 N_s V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{shaded} + I_{string} R_s}{R_p} \quad (6.7)$$

### 6.3 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอด

สำหรับการวิเคราะห์ผลของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอด (ซึ่งในทางปฏิบัติจะระบุอยู่ในข้อมูลทางเทคนิค) นั้นจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ

- เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด และ
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด

#### 6.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดด

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดดนั้น จะมีหลักการคำนวณเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ไม่เกิดการบังแสงแดด (เนื่องจากไม่เกิดการบังแสงแดด แม้จะมีหรือไม่มีบายพาสไดโอดก็จะมีผลเหมือนกัน) โดยความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสามารถหาได้จากสมการที่ (6.3) ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.2.1

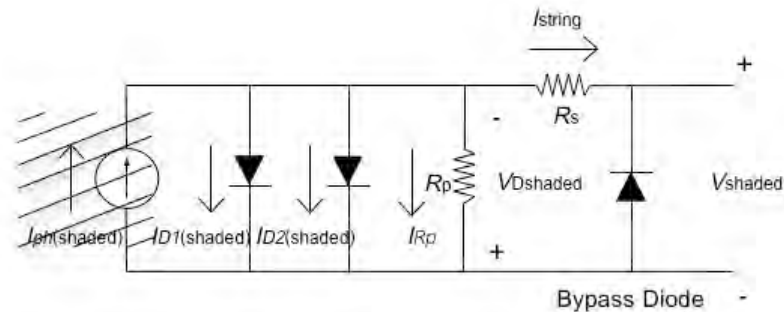
#### 6.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดดนั้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.4.4 ว่าเมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้นจะส่งผลให้ค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าลดลง ( $I_{ph,shaded}$ ) ต่ำกว่าในสภาวะปกติที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $I_{ph,unshaded}$ ) แต่ด้วยผลของบายพาสไดโอด ทำให้ในบางช่วงของกระแสในสตริง ( $I_{string}$ ) ที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ถูกบังแสงแดดนั้นเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันเข้าใกล้ศูนย์ ( $I_{ph,shaded} \leq I_{string} \leq I_{ph,unshaded}$ ) และในบางช่วงของกระแสในสตริงที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีบายพาสไดโอดที่ถูกบังแสงแดดนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟปกติ ( $I_{ph,unshaded} < I_{string} < I_{ph,shaded}$ ) ดังนั้นจึงแบ่งพิจารณาออกเป็นสองช่วงกระแส

##### 6.3.2.1 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันเข้าใกล้ศูนย์ ( $I_{ph,shaded} \leq I_{string} \leq I_{ph,unshaded}$ )

เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด หากมีกระแสที่ไหลผ่านในช่วงนี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันที่มีค่าเป็นลบ ทำให้

บายพาสไดโอดจะเกิดการฟอเวิร์ดไบแอส (Forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ทำให้กระแสในสตริงไหลผ่านบายพาสไดโอดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทมีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดด

หากค่าของกระแสในสตริงที่ไหลผ่านมีค่าอยู่ในช่วงนี้ จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทมีบายพาสไดโอดมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันฟอเวิร์ดไบแอสของบายพาสไดโอดซึ่งมีค่าน้อยมาก โดยแรงดันตกคร่อมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทมีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดดจะสามารถประมาณได้ดังสมการที่ (6.8)

$$V_{shaded} \cong 0 \quad (6.8)$$

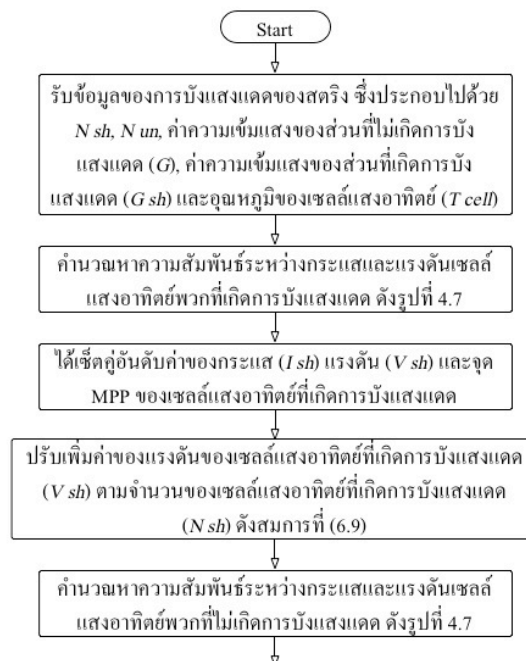
### 6.3.2.2 ช่วงกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย ( $0 < I_{string} < I_{ph,shaded}$ )

เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทที่มีบายพาสไดโอดที่เกิดการบังแสงแดด หากมีกระแสที่ไหลผ่านในช่วงนี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟปกติเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลประเภทมีบายพาสไดโอดเมื่อเกิดการบังแสงแดดในช่วงกระแสนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.7)

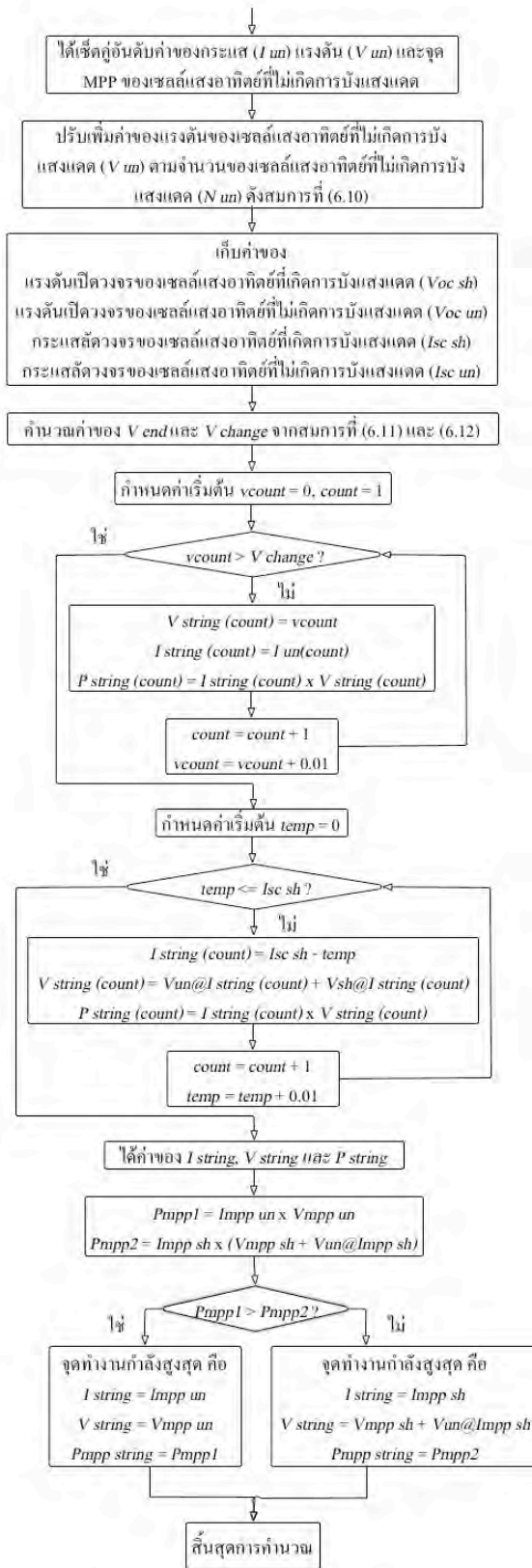
## 6.4 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด

ในตอนนี้จะนำเสนอขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งสตริง ดังแสดงในรูปที่ 6.1(ก) จะพบว่าในหนึ่งสตริงสามารถ

แบ่งเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทที่โดนบังแสงแดด และไม่โดนบังแสงแดด และเนื่องจากในหนึ่งสตริงจะเป็นการต่อเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรมกันเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละโมดูลของสตริงเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน และแรงดันรวมของสตริงสามารถหาได้จากผลบวกของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละโมดูลดังสมการที่ (6.2) ซึ่งการค้นหาสมการทั่วไปที่สามารถแสดงคุณลักษณะของสตริงจะมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากรูปแบบการบังแสงแดดของสตริงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแต่ช่วงเวลา อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่โดนบังแสงแดดแล้วใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่โดนบังแสงแดด แล้วจึงพิจารณาร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่ไม่โดนบังแสงแดดแล้วใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่ไม่โดนบังแสงแดด ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.6 ร่วมกันแล้วจึงหาค่าความสัมพันธ์รวมของสตริงระหว่างกระแสและแรงดันออกมา ก็จะสามารถลดความซับซ้อนลงไปได้มาก โดยขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด



รูปที่ 6.4 (ต่อ) ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด

- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลของการบังแสงแดดของสตริง ซึ่งประกอบไปด้วย  $N_{shaded}$  ,  $N_{unshaded}$  , ค่าความเข้มแสงของส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $G$ ) , ค่าความเข้มแสงของส่วนที่เกิดการบังแสงแดด ( $G_{shaded}$ ) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T_{cell}$ )
- ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่เกิดการบังแสงแดด ดังรูปที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 3 : ได้หาคู่อันดับค่าของกระแส ( $I_{sh}$ ) แรงดัน ( $V_{sh}$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด
- ขั้นตอนที่ 4 : ปรับเพิ่มค่าของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด ( $V_{sh}$ ) ตามจำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{sh}$ ) ดังสมการที่ (6.9)

$$V_{sh} = V_{sh} \times N_{sh} \quad (6.9)$$

- ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์พวกที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ดังรูปที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 6 : ได้หาคู่อันดับค่าของกระแส ( $I_{un}$ ) แรงดัน ( $V_{un}$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด
- ขั้นตอนที่ 7 : ปรับเพิ่มค่าของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $V_{un}$ ) ตามจำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{un}$ ) ดังสมการที่ (6.10)

$$V_{un} = V_{un} \times N_{un} \quad (6.10)$$

ขั้นตอนที่ 8 : เก็บค่าของ

แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด  
( $V_{OC,sh}$ )

แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด  
( $V_{OC,un}$ )

กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด ( $I_{SC,sh}$ )  
กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด  
( $I_{SC,un}$ )

ขั้นตอนที่ 9 : คำนวณค่าของ  $V_{end}$  และ  $V_{change}$  จากสมการที่ (6.11) และ (6.12)

$$V_{end} = V_{OC,sh} + V_{OC,un} \quad (6.11)$$

$$V_{change} = V_{un} \Big|_{I_{string} = I_{SC,sh}} \quad (6.12)$$

ขั้นตอนที่ 10 : กำหนดค่าเริ่มต้น  $vcount = 0$  ,  $count = 1$

ขั้นตอนที่ 11 : ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $I_{string}$ ) แรงดัน ( $V_{string}$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P_{string}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสิ้นตรงจากสมการที่ (6.13) - (6.15)

$$I_{string,count} = I_{un,count} \Big|_{count=1,2,3,...} \quad (6.13)$$

$$V_{string,count} = vcount \Big|_{count=1,2,3,...} \quad (6.14)$$

$$P_{string,count} = \left( I_{string,count} \times V_{string,count} \right) \Big|_{count=1,2,3,...} \quad (6.15)$$

ขั้นตอนที่12: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และ  $vcount$  ขึ้นอีก 0.01

ขั้นตอนที่13: ทำตามขั้นตอนที่ 11 และ 12 จนกระทั่งค่าของ  $vcount$  มากกว่า  $V_{change}$

ขั้นตอนที่14: กำหนดค่าเริ่มต้น  $temp = 0$

ขั้นตอนที่15: ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $I_{string}$ ) แรงดัน ( $V_{string}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสตริง จากสมการที่ (6.16), (6.18) และกำลัง ( $P_{string}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสตริง จากสมการที่ (6.15)

$$I_{string, count} = I_{sc, sh, count} - temp \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (6.16)$$

$$V_{string, count} = \left[ \left( V_{un} \Big|_{I_{string} = I_{string, count}} \right) + \left( V_{sh} \Big|_{I_{string} = I_{string, count}} \right) \right] \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (6.17)$$

ขั้นตอนที่16: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และ  $temp$  ขึ้นอีก 0.01

ขั้นตอนที่17: ทำตามขั้นตอนที่ 15 และ 16 จนกระทั่งค่าของ  $temp$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $I_{sc, sh}$

ขั้นตอนที่18: ได้ค่าของ กระแส แรงดัน และกำลัง ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสตริง

ขั้นตอนที่19: ทำการคำนวณค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดค่าแรก ( $P_{MPP1}$ ) และค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดค่าที่สอง ( $P_{MPP2}$ ) จากสมการที่ (6.18) และ (6.19)

$$P_{MPP1} = I_{MPP, un} \times V_{MPP, un} \quad (6.18)$$

$$P_{MPP2} = I_{MPP, sh} \times \left( V_{MPP, sh} + V_{un} \Big|_{I_{string} = I_{MPP, sh}} \right) \quad (6.19)$$



ขั้นตอนที่20: พิจารณาค่าของ  $P_{MPP1}$  และค่าของ  $P_{MPP2}$

- หากค่าของ  $P_{MPP1} > P_{MPP2}$  จุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริง คือ

$$I_{string} = I_{MPP,un}, V_{string} = V_{MPP,un} \text{ และ } P_{string} = P_{MPP1}$$

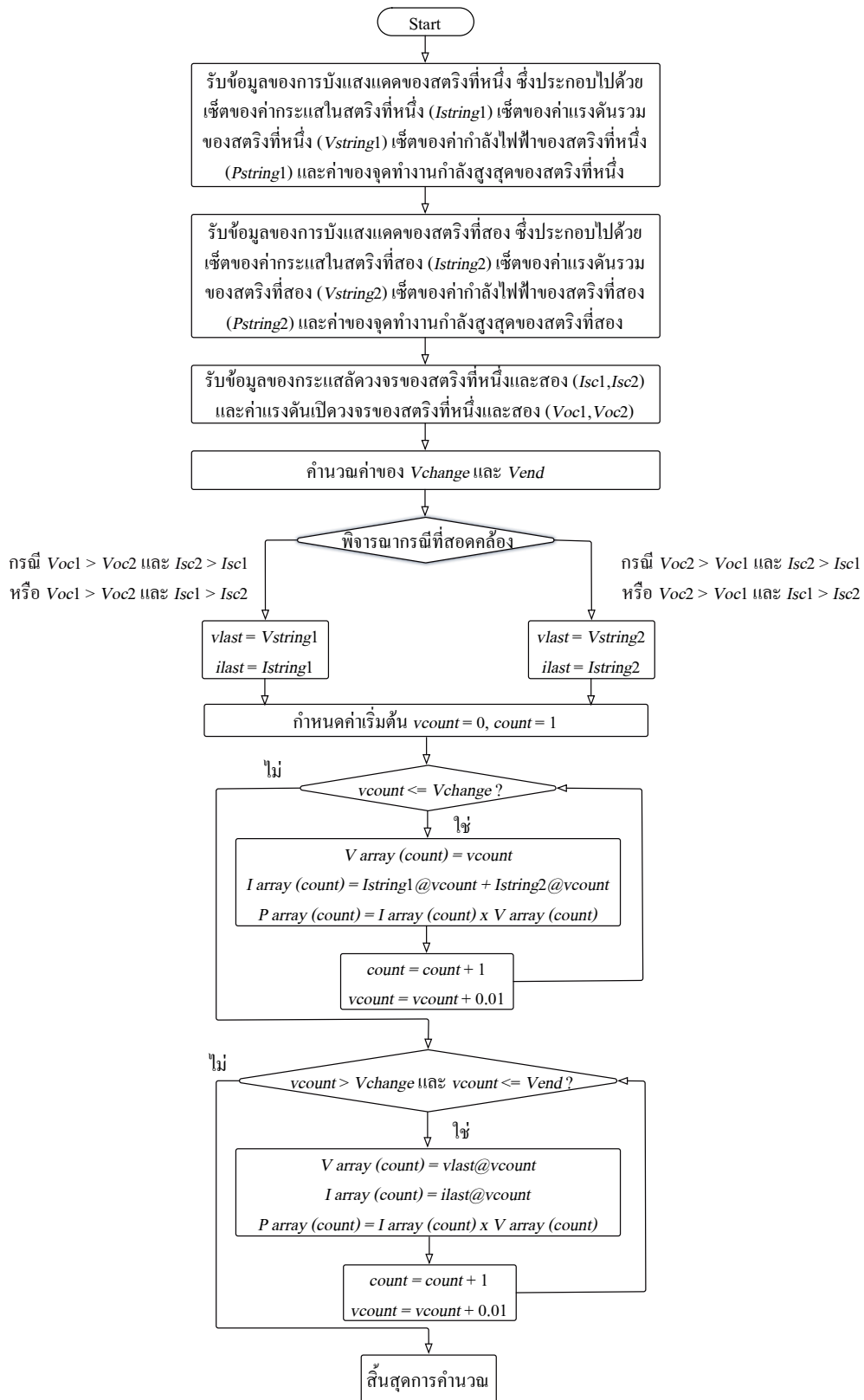
- หากค่าของ  $P_{MPP1} < P_{MPP2}$  จุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริง คือ

$$I_{string} = I_{MPP,sh}, V_{string} = V_{MPP,sh} + V_{un} \Big|_{I_{string} = I_{MPP,sh}} \text{ และ } P_{string} = P_{MPP2}$$

ขั้นตอนที่21: ลื่นสุดการคำนวณ ได้เขตของค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสตริง และจุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริง

## 6.5 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

ในส่วนนี้จะนำเสนอขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งอาเรย์ดังแสดงในรูปที่ 6.1(ค) จะพบว่าในหนึ่งอาเรย์จะประกอบไปด้วยสตริงที่ต่อขนานกันตามแต่ขนาดความต้องการกระแสที่จะนำไปจ่ายแก่โหลด และเนื่องจากแต่ละสตริงจะเป็นการเชื่อมต่อกันแบบขนาน ส่งผลให้แรงดันของแต่ละสตริงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากัน และกระแสรวมของอาเรย์สามารถหาได้จากผลบวกของกระแสของแต่ละสตริง ซึ่งการค้นหาสมการทั่วไปที่สามารถแสดงคุณลักษณะของอาเรย์จะมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากรูปแบบการบังแสงแดดที่เกิดขึ้นบนอาเรย์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแต่ช่วงเวลา อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรย์โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของแต่ละสตริงที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน ก็จะสามารถลดความซับซ้อนลงไปได้มาก โดยขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์  
หนึ่งอาร์เรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลของการบังแสงแดดของสตริงที่หนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย เซ็ตของค่ากระแสในสตริงที่หนึ่ง ( $I_{string1}$ ) เซ็ตของค่าแรงดันรวมของสตริงที่หนึ่ง ( $V_{string1}$ ) เซ็ตของค่ากำลังไฟฟ้าของสตริงที่หนึ่ง ( $P_{string1}$ ) และค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริงที่หนึ่ง
- ขั้นตอนที่ 2 : รับข้อมูลของการบังแสงแดดของสตริงที่สอง ซึ่งประกอบไปด้วย เซ็ตของค่ากระแสในสตริงที่สอง ( $I_{string2}$ ) เซ็ตของค่าแรงดันรวมของสตริงที่สอง ( $V_{string2}$ ) เซ็ตของค่ากำลังไฟฟ้าของสตริงที่สอง ( $P_{string2}$ ) และค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริงที่สอง
- ขั้นตอนที่ 3 : รับข้อมูลของกระแสลัดวงจรของสตริงที่หนึ่งและสอง ( $I_{SC1}, I_{SC2}$ ) และค่าแรงดันเปิดวงจรของสตริงที่หนึ่งและสอง ( $V_{OC1}, V_{OC2}$ )
- ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณค่าของ  $V_{change}$  และ  $V_{end}$  จากสมการที่ (6.20) และ (6.21)

$$V_{change} = \min(V_{OC1}, V_{OC2}) \quad (6.20)$$

$$V_{end} = \max(V_{OC1}, V_{OC2}) \quad (6.21)$$

- ขั้นตอนที่ 5 : พิจารณากรณีที่สอดคล้อง

$$\text{หาก } V_{OC1} > V_{OC2} \text{ ให้ } v_{last} = V_{string1} \text{ และ } i_{last} = I_{string1}$$

$$\text{หาก } V_{OC1} < V_{OC2} \text{ ให้ } v_{last} = V_{string2} \text{ และ } i_{last} = I_{string2}$$

- ขั้นตอนที่ 6 : กำหนดค่าเริ่มต้น  $vcount = 0$  ,  $count = 1$

- ขั้นตอนที่ 7 : ทำการคำนวณค่าของเซ็ตของกระแส ( $I_{array}$ ) แรงดัน ( $V_{array}$ ) และกำลัง ( $P_{array}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรย์ จากสมการที่ (6.22) - (6.24)

$$V_{array, count} = vcount \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (6.22)$$

$$I_{array, count} = \left[ I_{string1} \Big|_{V_{array} = vcount} + I_{string2} \Big|_{V_{array} = vcount} \right] \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (6.23)$$

$$P_{array, count} = \left( I_{array, count} \times V_{array, count} \right) \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (6.24)$$

ขั้นตอนที่ 8 : ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และ  $vcount$  ขึ้นอีก 0.01

ขั้นตอนที่ 9 : ทำตามขั้นตอนที่ 7 และ 8 จนกระทั่งค่าของ  $vcount$  มากกว่า  $V_{change}$

ขั้นตอนที่ 10 : ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $I_{array}$ ) และแรงดัน ( $V_{array}$ ) จากสมการที่ (6.25) และ (6.26) ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเซตของกำลัง ( $P_{array}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรย์ จากสมการที่ (6.24)

$$I_{array, count} = ilast \Big|_{vlast = vcount} \quad (6.25)$$

$$V_{array, count} = vlast \Big|_{vlast = vcount} \quad (6.26)$$

ขั้นตอนที่ 11 : ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และ  $vcount$  ขึ้นอีก 0.01

ขั้นตอนที่ 12 : ทำตามขั้นตอนที่ 10 และ 11 จนกระทั่งค่าของ  $vcount$  มากกว่า  $V_{end}$

ขั้นตอนที่ 13 : สิ้นสุดการคำนวณ ได้เซตของค่ากระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรย์

จากรูปที่ 6.1(ค) จะพบว่าในหนึ่งอาเรย์จะประกอบด้วยสตริงหลายเส้นเชื่อมต่อกันแบบขนานการคำนวณหาความสัมพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรย์นั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาสตริงที่เชื่อมต่อกันที่ละคู่ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6.5 นั้นเอง

## 6.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันจริงในทางปฏิบัติ คือ รูปแบบของสตริงและอาเรย์ โดยได้กล่าวถึงการวิเคราะห์การเกิดการบังแสงแดดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งชนิดที่มีและไม่มีบายพาสไดโอด รวมถึงวิเคราะห์หาจุดทำงานกำลังสูงสุดของสตริงและอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด รวมถึงได้แสดงขั้นตอนและวิธีการคำนวณหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบของสตริงและอาเรย์อีกด้วย

## บทที่ 7

### ความแตกต่างของแผง (Mismatch)

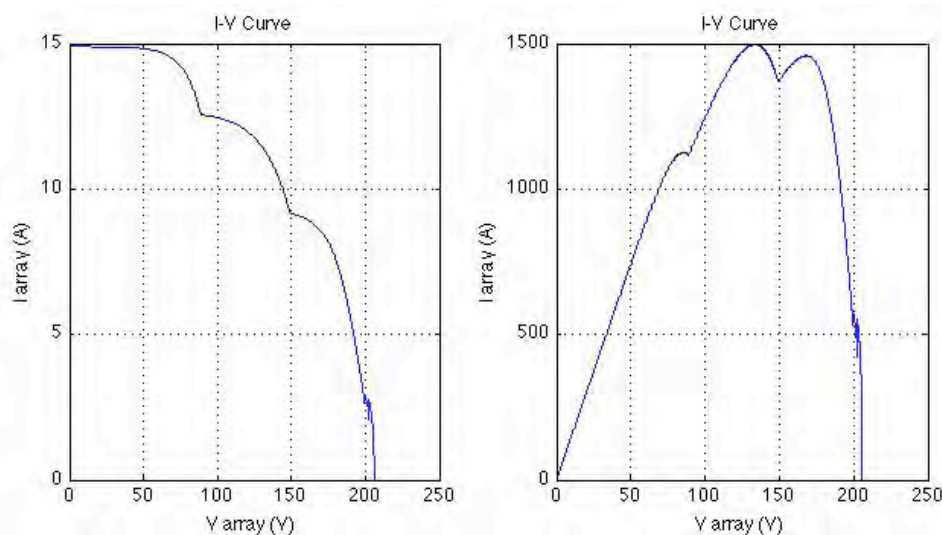
จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ถึงผลกระทบของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ว่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เนื่องจากจุดทำงานกำลังสูงสุดที่มีมากกว่าหนึ่งจุด โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงผลของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในกรณีที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและขนาน ซึ่งในบทนี้จะแบ่งการเสนออกเป็น 4 หัวข้อ คือ

- (1) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียในกรณีเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์
- (2) ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม
- (3) ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อแบบขนาน
- (4) สรุป

#### 7.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ถึงผลกระทบของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีผลต่อลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และแรงดันที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ในกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่มาจากผู้ผลิตที่แตกต่างกันมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน เนื่องจากเทคโนโลยีของแต่ละผู้ผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาเชื่อมต่อกันนั้นต่างมีคุณลักษณะ (Characteristic) และค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆที่ไม่เหมือนกัน หรือแม้กระทั่งเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตเดียวกันที่เกิดการเสื่อมสภาพไม่เท่ากันก็ตาม ดังนั้นแม้จะทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเข้มแสงที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวนี้จะมีลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน หรือกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่แตกต่างกันด้วย ทำให้เมื่อนำมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันไม่ว่าเชื่อมต่อแบบอนุกรมหรือแบบขนาน

ก็ตามแต่ แทบทุกครั้งจะเกิดปัญหาจุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน หรือกำลังสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 จุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันเมื่อเกิดความแตกต่างของแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากจุดยอดของกำลังสูงสุดที่มีมากกว่าหนึ่งจุดนี้ ส่งผลให้กระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power point Tracking: MPPT) โดยทั่วไป เช่น กระบวนการ P&O (Perturb and Observation algorithm) ไม่สามารถค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดตลอดช่วงความสัมพันธ์ได้ [38] เนื่องจากจะถูกทำให้เข้าใจว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดจุดแรกที่พบคือจุดทำงานกำลังสูงสุดตลอดช่วงของความสัมพันธ์แล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงวิธีการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อรองรับปัญหาดังกล่าว (ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาผลกระทบของความแตกต่างของแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อวิธีการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เป็นหลัก เนื่องจากเป็นวิธีการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดพื้นฐานไม่ซับซ้อน และมีการใช้ในทางปฏิบัติจริง) อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลของความแตกต่างของแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะทำให้กระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธีการ P&O ไม่สามารถค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดตลอดช่วงเจอ แต่ก็ยังมีบางกรณีที่ผลของความแตกต่างของแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ทำให้การค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ผิดพลาด ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงการวิเคราะห์และเงื่อนไขที่

กระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ยังคงสามารถค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดตลอดช่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

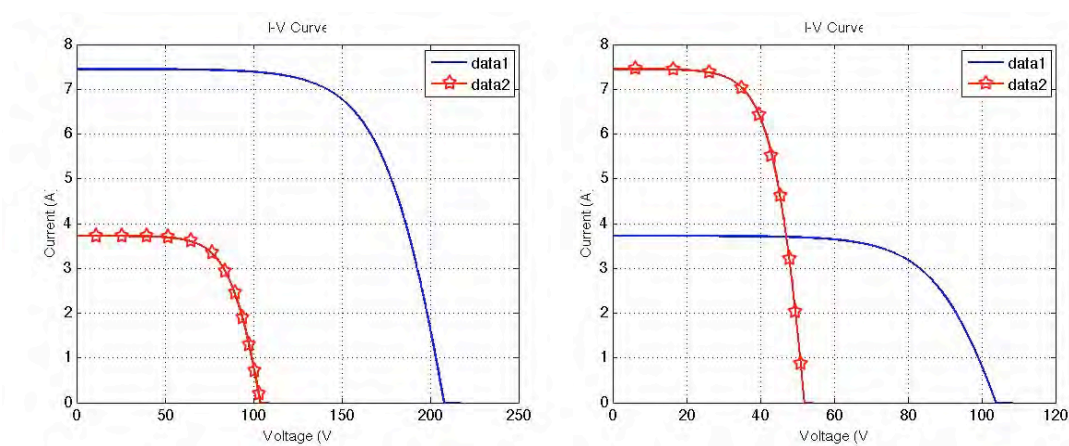
กระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O นั้นมีขั้นตอน คือ เริ่มต้นที่จุดทดสอบแรกที่แรงดันมีค่าเป็นแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) แล้วหาค่าของกำลังไฟฟ้า ณ ค่าแรงดันดังกล่าว ต่อมาจึงทำการเปลี่ยนจุดทดสอบโดยลดค่าของแรงดันลงเล็กน้อย แล้วหาค่าของกำลังไฟฟ้า ณ แรงดันค่าใหม่ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าจากทั้งสองจุด หากค่ากำลังไฟฟ้าของจุดทดสอบจุดที่สองมีค่ามากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าจากจุดทดสอบแรกก็จะเลื่อนจุดทดสอบจากจุดทดสอบแรกมายังจุดทดสอบที่สอง แล้วทำการลดแรงดันลงเพื่อทำการทดสอบหาค่าของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทดสอบที่สามต่อไป กระบวนการเช่นนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าของกำลังไฟฟ้าจากจุดทดสอบถัดไปมีค่าน้อยกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าจากจุดทดสอบก่อนหน้า จึงจะถือว่าจุดทดสอบดังกล่าวเป็นจุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือกล่าวคือ กระบวนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยกระบวนการ P&O จะถือว่า จุดทำงานกำลังสูงสุดจุดแรกที่เจอเมื่อเริ่มต้นการค้นหาจากแรงดันเปิดวงจร คือจุดทำงานกำลังสูงสุดนั่นเอง ดังนั้นแล้ว หากผลของความแตกต่างของแอมพลิจูดของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้น แล้วทำให้เกิดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด อย่างไรก็ตามหากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดช่วงความสัมพันธ์เกิดขึ้น ณ ค่าแรงดันกำลังสูงสุดที่มากที่สุด กระบวนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ก็จะสามารถค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดได้โดยไม่ได้รับผลกระทบใดๆนั่นเอง

อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ผลของความแตกต่างของแอมพลิจูดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้น จะพบว่าปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดหรือเกิดปัญหาเนื่องจากจุดยอดของกำลังสูงสุดที่มีมากกว่าหนึ่งจุด จะเกิดภายใต้สภาวะการณ์เพียงสองรูปแบบเท่านั้น คือ

- **รูปแบบที่ 1 :** กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง มีค่าน้อยกว่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง
- **รูปแบบที่ 2 :** กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง มีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง แต่แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง มีค่ามากกว่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง



ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงทั้งสองรูปแบบที่กล่าวไปสามารถแสดงได้ในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผง รูปแบบที่ 1 (ซ้าย) และรูปแบบที่ 2 (ขวา)

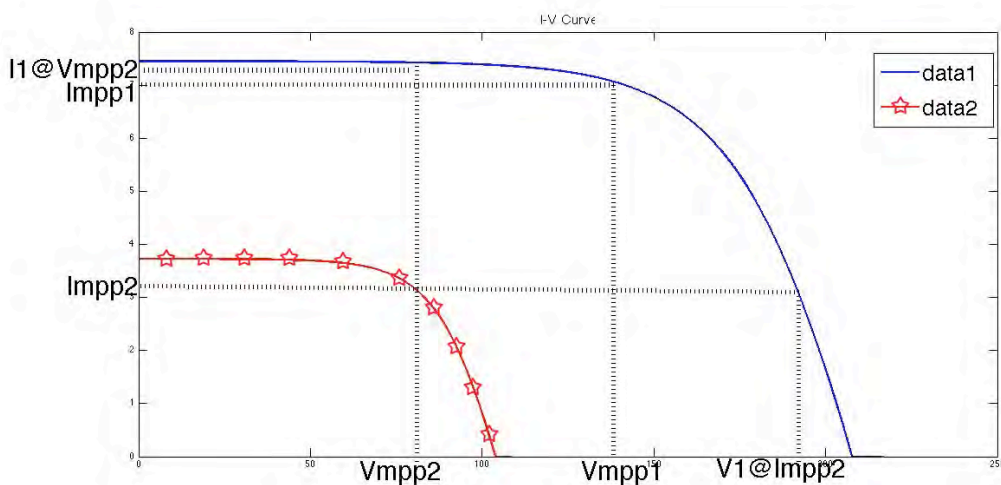
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า หากผลของความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้น แล้วทำให้เกิดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด แล้วจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดช่วงความสัมพันธ์เกิดขึ้น ณ ค่าแรงดันกำลังสูงสุดที่มากที่สุด กระบวนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ก็จะสามารถค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดได้โดยไม่ได้รับผลกระทบใดๆ และผลกระทบต่อจุดทำงานกำลังสูงสุดหรือปัญหาเนื่องจากจุดยอดของกำลังสูงสุดที่มีมากกว่าหนึ่งจุดนั้นจะเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะการณ์เพียงสองรูปแบบเท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดผลของความแตกต่างของแผง นั้นส่งผลกระทบต่อกระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วย ในลำดับถัดไปจึงแสดงการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์โดยออกเป็น 4 หัวข้อย่อยดังนี้

- กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม
- กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม
- กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนาน

- กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนาน

**7.1.1 เกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม**

สำหรับผลกระทบต่อกระบวนการค้นหากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในกรณีนี้ นั้น จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 7.3 เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น



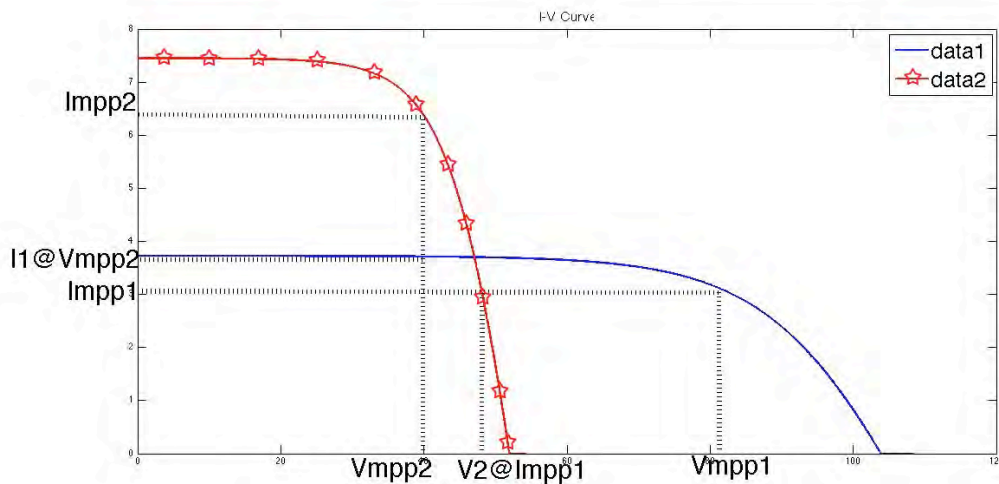
รูปที่ 7.3 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.3 ประกอบกับหลักการการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะพบว่าความแตกต่างของแผงที่เกิดกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการ P&O ก็ต่อเมื่อสมการที่ (7.1) เป็นจริง

$$I_{mpp1} \times V_{mpp1} < I_{mpp1} \times (V_{mpp2} + V_{1@I_{mpp2}}) \tag{7.1}$$

**7.1.2 เกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม**

สำหรับผลกระทบต่อกระบวนการค้นหากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในกรณีนี้ นั้น จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 7.4 เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 7.4 กรณีเกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 2

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.4 ประกอบกับหลักการการค้นหาค่ากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะพบว่าความแตกต่างของแผงที่เกิดกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมนั้น จะไม่ส่งผลต่อกระบวนการหาค่ากำลังสูงสุดด้วยวิธีการ P&O ก็ต่อเมื่อสมการที่ (7.2) เป็นจริง

$$I_{mpp2} \times V_{mpp2} < I_{mpp1} \times (V_{mpp1} + V_{2@I_{mpp1}}) \quad (7.2)$$

### 7.1.3 เกิดความแตกต่างของแผงในรูปแบบที่ 1 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนาน

สำหรับผลกระทบต่อกระบวนการค้นหาค่ากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในกรณีนี้ นั้น จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 7.3 เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.3 ประกอบกับหลักการการค้นหาค่ากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะพบว่าความแตกต่างของแผงที่เกิดกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมนั้น จะไม่ส่งผลต่อกระบวนการหาค่ากำลังสูงสุดด้วยวิธีการ P&O ก็ต่อเมื่อสมการที่ (7.3) เป็นจริง

$$V_{mpp2} \times (I_{mpp2} + I_{1@V_{mpp2}}) < I_{mpp1} \times V_{mpp1} \quad (7.3)$$

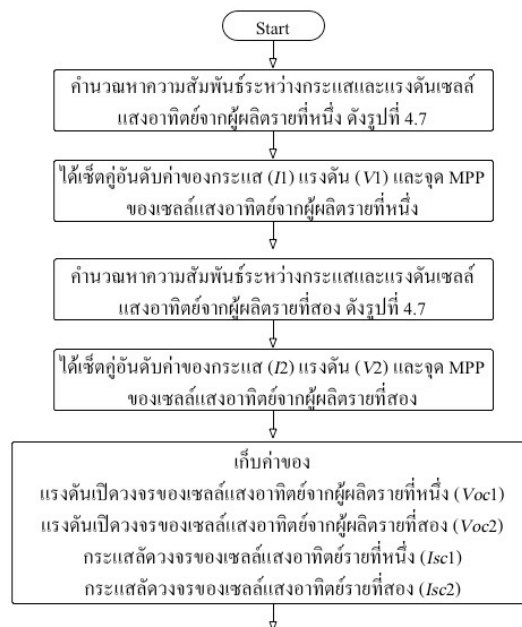
#### 7.1.4 เกิดความแตกต่างของแฉงในรูปแบบที่ 2 และโมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนาน

สำหรับผลกระทบต่อกระบวนการค้นหากำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ในกรณีนี้ จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 7.4 เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.4 ประกอบกับหลักการการค้นหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะพบว่าความแตกต่างของแฉงที่เกิดกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการ P&O ก็ต่อเมื่อสมการที่ (7.3) เป็นจริง เช่นกัน

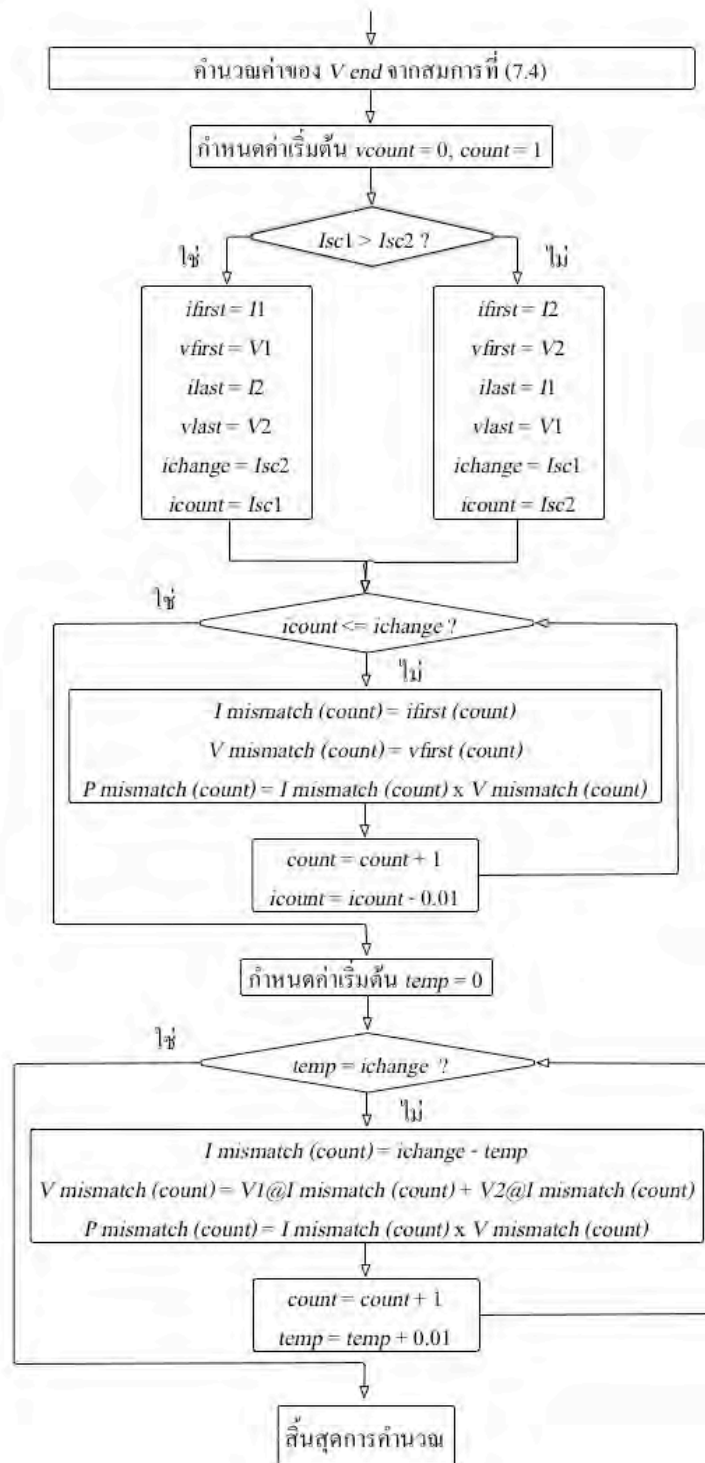
#### 7.2 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแฉงกรณีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

ในส่วนนี้จะนำเสนอขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแฉงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรม ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแฉงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบ

อนุกรม



รูปที่ 7.5 (ต่อ) ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแอมพลิจูดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรม

- ขั้นตอนที่ 1 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ดังรูปที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 2 : ได้เซตคู่อันดับค่าของกระแส ( $I_1$ ) แรงดัน ( $V_1$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง
- ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ดังรูปที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 4 : ได้เซตคู่อันดับค่าของกระแส ( $I_2$ ) แรงดัน ( $V_2$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง
- ขั้นตอนที่ 5 : เก็บค่าของ  
 แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ( $V_{oc1}$ )  
 แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ( $V_2$ )  
 กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ( $I_{sc1}$ )  
 กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ( $I_{sc2}$ )
- ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณค่าของ  $V_{end}$  จากสมการที่ (7.4)

$$V_{end} = V_{oc1} + V_{oc2} \quad (7.4)$$

- ขั้นตอนที่ 7 : กำหนดค่าเริ่มต้น  $vcount = 0$  ,  $count = 1$
- ขั้นตอนที่ 8 : พิจารณาค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตทั้งสอง  
 หากค่ากระแสลัดวงจรจากผู้ผลิตรายที่หนึ่งมีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรจากผู้ผลิตรายที่สอง ให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (7.5) ถึงสมการที่ (7.10) เป็นดังนี้

$$i_{first} = I_1 \quad (7.5)$$

$$v_{first} = V_1 \quad (7.6)$$

$$i_{last} = I_2 \quad (7.7)$$

$$v_{last} = V_2 \quad (7.8)$$

$$i_{change} = I_{sc2} \quad (7.9)$$

$$i_{count} = I_{sc1} \quad (7.10)$$

หากค่ากระแสลัดวงจรจากผู้ผลิตรายที่หนึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรจากผู้ผลิตรายที่สอง ให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (7.5) ถึงสมการที่ (7.10) เป็นดังนี้

$$i_{first} = I_2 \quad (7.5)$$

$$v_{first} = V_2 \quad (7.6)$$

$$i_{last} = I_1 \quad (7.7)$$

$$v_{last} = V_1 \quad (7.8)$$

$$i_{change} = I_{sc1} \quad (7.9)$$

$$i_{count} = I_{sc2} \quad (7.10)$$

ขั้นตอนที่ 9 : ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $I_{mismatch}$ ) แรงดัน ( $V_{mismatch}$ ) และกำลัง ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความแตกต่างของแผงจากสมการที่ (7.11) ถึงสมการที่ (7.13)

$$I_{mismatch, count} = i_{first, count} \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.11)$$

$$V_{mismatch, count} = v_{first, count} \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.12)$$

$$P_{mismatch, count} = \left( I_{mismatch, count} \times V_{mismatch, count} \right) \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.13)$$

ขั้นตอนที่10: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และลดค่าของ  $i_{count}$  ลง 0.01

ขั้นตอนที่11: ทำตามขั้นตอนที่ 9 และ 10 จนกระทั่งค่าของ  $i_{count}$  มากกว่า  $i_{change}$

ขั้นตอนที่12: กำหนดค่าเริ่มต้น  $temp = 0$

ขั้นตอนที่13: ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $I_{mismatch}$ ) แรงดัน ( $V_{mismatch}$ ) จากสมการที่ (7.14) และ (7.15) และค่าของเซตของกำลัง ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความแตกต่างของแผง จากสมการที่ (7.13)

$$I_{mismatch, count} = i_{change} - temp \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.14)$$

$$V_{mismatch, count} = \left( V_1 \Big|_{I=I_{mismatch, count}} + V_2 \Big|_{I=I_{mismatch, count}} \right) \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.15)$$

ขั้นตอนที่14: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และ  $temp$  ขึ้นอีก 0.01

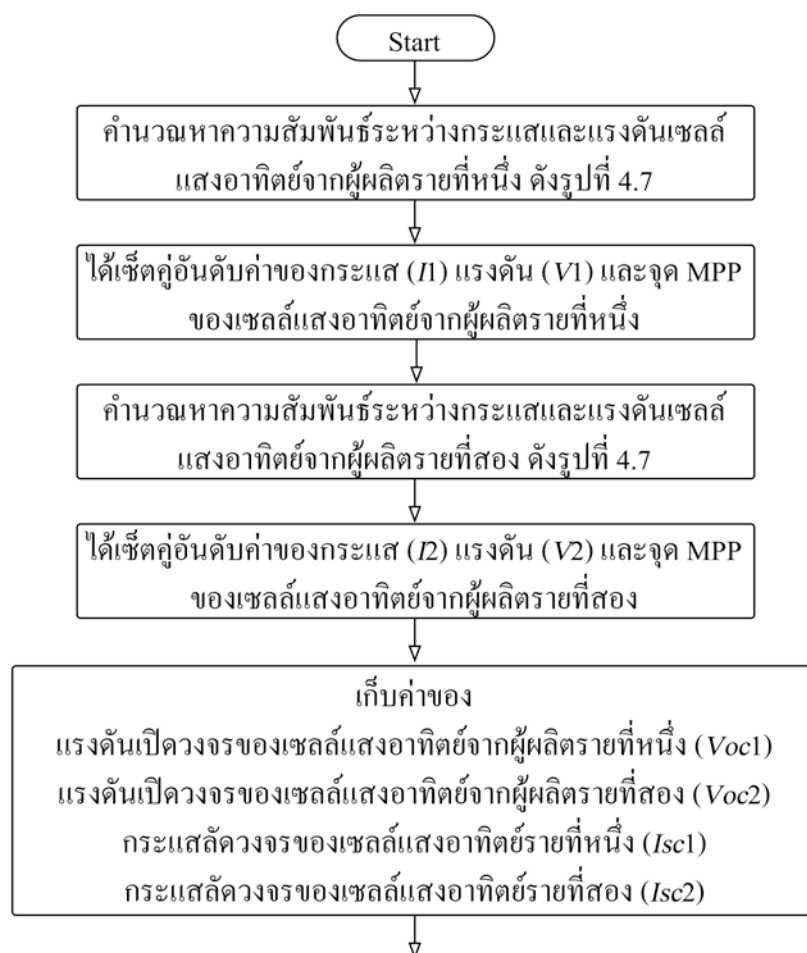
ขั้นตอนที่15: ทำตามขั้นตอนที่ 13 และ 14 จนกระทั่งค่าของ  $temp$  มีค่าเท่ากับ  $i_{change}$

ขั้นตอนที่16: สิ้นสุดการคำนวณ จะได้พารามิเตอร์ความสัมพันธ์ประกอบด้วย เซตของค่ากระแส ( $I_{mismatch}$ ) เซตของค่าแรงดัน ( $V_{mismatch}$ ) และเซตของค่ากำลังไฟฟ้า ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดผลความแตกต่างของแผงที่มีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม

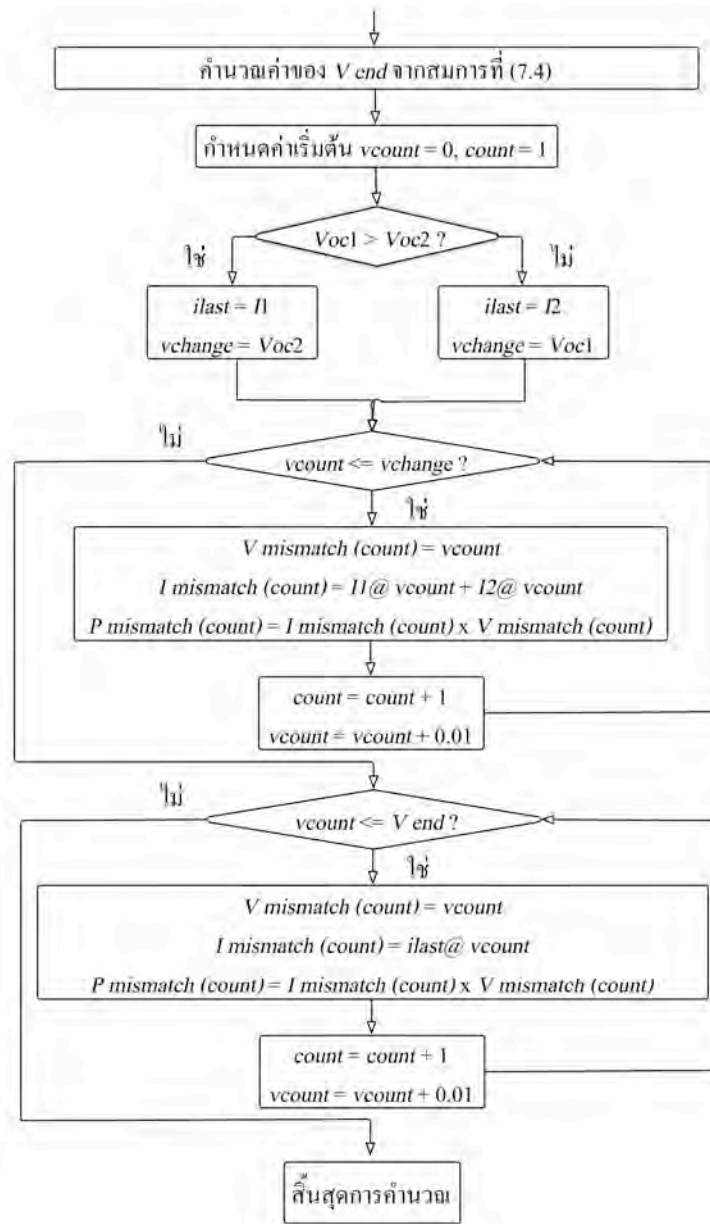


### 7.3 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงกรณีการเชื่อมต่อแบบขนาน

ในส่วนนี้จะนำเสนอขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน ซึ่งมีขั้นตอนแตกต่างไปจากขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรมเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน



รูปที่ 7.6 (ต่อ) ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบขนาน

ขั้นตอนที่ 1 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ดังรูปที่ 4.7

ขั้นตอนที่ 2 : ได้ใช้ตัวคูณอันดับค่าของกระแส ( $I_1$ ) แรงดัน ( $V_1$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง

- ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ดังรูปที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 4 : ได้หาคู่อันดับค่าของกระแส ( $I_2$ ) แรงดัน ( $V_2$ ) และจุด MPP ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง
- ขั้นตอนที่ 5 : เก็บค่าของ  
 แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ( $V_{oc1}$ )  
 แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ( $V_2$ )  
 กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่หนึ่ง ( $I_{sc1}$ )  
 กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่สอง ( $I_{sc2}$ )
- ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณค่าของ  $V_{end}$  จากสมการที่ (7.4)
- ขั้นตอนที่ 7 : กำหนดค่าเริ่มต้น  $vcount = 0$  ,  $count = 1$
- ขั้นตอนที่ 8 : พิจารณาค่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตทั้งสอง  
 หากค่าแรงดันเปิดวงจรจากผู้ผลิตรายที่หนึ่งมีค่ามากกว่าค่าแรงดันเปิดวงจรจากผู้ผลิตรายที่สอง ให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (7.16) - (7.17) เป็นดังนี้

$$i_{last} = I_1 \quad (7.16)$$

$$V_{change} = V_{OC2} \quad (7.17)$$

หากค่าแรงดันเปิดวงจรจากผู้ผลิตรายที่หนึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันเปิดวงจรจากผู้ผลิตรายที่สอง ให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (7.16) - (7.17) เป็นดังนี้

$$i_{last} = I_2 \quad (7.16)$$

$$V_{change} = V_{oc1} \quad (7.17)$$

ขั้นตอนที่ 9: ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $V_{mismatch}$ ) แรงดัน ( $I_{mismatch}$ ) จากสมการที่ (7.18) และ (7.19) และค่าของเซตของกำลัง ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความแตกต่างของแผง จากสมการที่ (7.13)

$$V_{mismatch, count} = vcount \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.18)$$

$$I_{mismatch, count} = \left( I_1 \Big|_{V=vcount} + I_2 \Big|_{V=vcount} \right) \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.19)$$

ขั้นตอนที่10: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และเพิ่มค่าของตัวแปร  $vcount$  อีก 0.01

ขั้นตอนที่11: ทำตามขั้นตอนที่ 9 และ 10 จนกระทั่งค่าของ  $vcount$  มากกว่า  $V_{change}$

ขั้นตอนที่12: ทำการคำนวณค่าของเซตของกระแส ( $V_{mismatch}$ ) แรงดัน ( $I_{mismatch}$ ) จากสมการที่ (7.18) และ (7.20) และค่าของเซตของกำลัง ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความแตกต่างของแผง จากสมการที่ (7.13)

$$I_{mismatch, count} = \left[ i_{last} \Big|_{V=vcount} \right] \Big|_{count=1,2,3,\dots} \quad (7.20)$$

ขั้นตอนที่13: ทำการปรับเพิ่มค่าของตัวแปร  $count$  ขึ้นอีก 1 และเพิ่มค่าของตัวแปร  $vcount$  อีก 0.01

ขั้นตอนที่14: ทำตามขั้นตอนที่ 12 และ 13 จนกระทั่งค่าของ  $vcount$  มากกว่า  $V_{end}$

ขั้นตอนที่15: ลึ้นสุดการคำนวณ จะได้พารามิเตอร์ความสัมพันธ์ประกอบด้วย เซ็ตของค่ากระแส ( $I_{mismatch}$ ) เซ็ตของค่าแรงดัน ( $V_{mismatch}$ ) และเซตของค่ากำลังไฟฟ้า ( $P_{mismatch}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดผลของความแตกต่างของแผงที่มีการเชื่อมต่อกันแบบขนาน

#### 7.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดผลของความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงวิเคราะห์หากรณีที่กระบวนการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ยังคงสามารถทำงานได้แม้เกิดผลของความแตกต่างของแผง และได้แสดงขั้นตอนและวิธีการคำนวณหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรมและขนานเมื่อเกิดผลของความแตกต่างของแผงของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

## บทที่ 8

### โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้

ในบทนี้จะนำเสนอโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ หรือ Graphic User Interface (GUI) โดยจะนำเสนอถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ GUI รวมไปถึงจุดเด่นในด้านต่างๆของโปรแกรมในรูปแบบ GUI นี้และโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ในทางปฏิบัติของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 5 หัวข้อ คือ

- (1) ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้
- (2) โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ด้านระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์
- (3) การสร้างโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Matlab
- (4) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้
- (5) สรุป

#### 8.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้

เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์ ทำให้ในปัจจุบันได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการทำงานในลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้นกว่าในอดีตมาก รวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมด้วย อย่างไรก็ตามในการแก้ปัญหาเฉพาะทาง เช่น ด้านวิศวกรรมไฟฟ้า หรือด้านไฟฟ้ากำลังนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องใช้โปรแกรมที่มีการคำนวณ (Algorithm) ที่ค่อนข้างเฉพาะทาง ทำให้ต้องมีการสร้างหรือเขียนโปรแกรมขึ้นมาใหม่โดยผู้ที่มีความรู้ความชำนาญในด้านนั้นๆ เช่น วิศวกร เป็นต้น

โดยปกติรูปแบบการเขียนโปรแกรมมักจะอยู่ในรูปของการป้อนชุดคำสั่งเป็นบรรทัดโดยผ่านทางแป้นพิมพ์ เช่น ระบบปฏิบัติการ DOS ในอดีต อย่างไรก็ตามรูปแบบของการเขียนโปรแกรมโดยป้อนชุดคำสั่งที่ละบรรทัดนั้น มีความยุ่งยากซับซ้อนต่อการทำความเข้าใจ แม้แต่ในกลุ่มของผู้พัฒนาโปรแกรมด้วยตนเองก็ตาม ดังนั้นจึงมีการพัฒนารูปแบบของโปรแกรมแบบส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ (Graphic User Interface: GUI) ขึ้นมา ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ ระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน เช่น Window และ Macintosh เป็นต้น

เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานโปรแกรมที่ไม่ใช่ นักพัฒนาโปรแกรม (หรือโปรแกรมเมอร์) สามารถใช้งานโปรแกรมได้โดยไม่ต้องใช้การป้อนชุดคำสั่งที่ยุ่งยากซับซ้อน ระบบ GUI อำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้คอมพิวเตอร์ให้สามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยผ่านทางรูปภาพ เช่น สัญลักษณ์ (Icons) แทนการพิมพ์คำสั่ง หรือการเลือกคำสั่งตามรายการที่มีผ่านทางเมนู (Menu) เป็นต้น

ดังที่กล่าวไปจะเห็นได้ว่า ประโยชน์ของ GUI คือการที่ผู้ใช้งานโปรแกรมสามารถทำงานกับโปรแกรม หรือป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมได้โดยไม่ต้องอาศัยการพิมพ์คำสั่งที่ละบรรทัดตั้งแต่ก่อน เพียงแค่ผู้ใช้ปฏิบัติตามคำสั่งสำเร็จรูปที่ผู้พัฒนา หรือผู้ออกแบบโปรแกรมได้จัดทำไว้ก็สามารถใช้งานโปรแกรมได้ ทำให้เป็นการง่ายสำหรับผู้ใช้งานทั้งในเชิงเรียนรู้และใช้งานโปรแกรม

## 8.2 โปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้งานด้านระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้งานที่มีการใช้จริงในทางปฏิบัติด้านระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา ทบทวนมาทั้งสิ้นจำนวน 2 โปรแกรมดังจะนำเสนอในส่วนนี้ คือ โปรแกรม PVSYST และโปรแกรม SAM

### 8.2.1 โปรแกรม PVSYST

โปรแกรม PVSYST Photovoltaic software ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Group of Energy, Institute of the science of the Environment, University of Geneva โดยผู้ก่อตั้งหลักสองคน คือ นักฟิสิกส์ชื่อ André Mermoud และ Michel Villoz ในปัจจุบัน (29 มกราคม 2556) ได้มีการพัฒนาจนถึงเวอร์ชันที่ 5.64 โดยได้มีการเริ่มพัฒนา มาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2535 (ค.ศ.1992) [41]

โปรแกรม PVSYST เป็นโปรแกรมเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการใช้งานเชิงออกแบบ วิศวกรรม และศึกษาวิจัย โดยมีฟังก์ชันครอบคลุมใน ด้านต่างๆเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก โดยใช้แบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด อีกทั้งยังมีฐานข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ทางด้านระบบผลิตไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์จากแต่ละผู้ผลิต ข้อมูลพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์จากแต่ละผู้ผลิต หรือแม้กระทั่งข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา (Meteo data) จากองค์การนาซ่า ทำให้โปรแกรม

PVSYST เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในบริษัทเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ และผู้ประกอบการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่างๆ

โดยโปรแกรม PVSYST นั้นจะสามารถแบ่งส่วนของโปรแกรมได้เป็น 3 ส่วนหลักได้แก่

- (1) Preliminary Design
- (2) Project Design
- (3) Tools

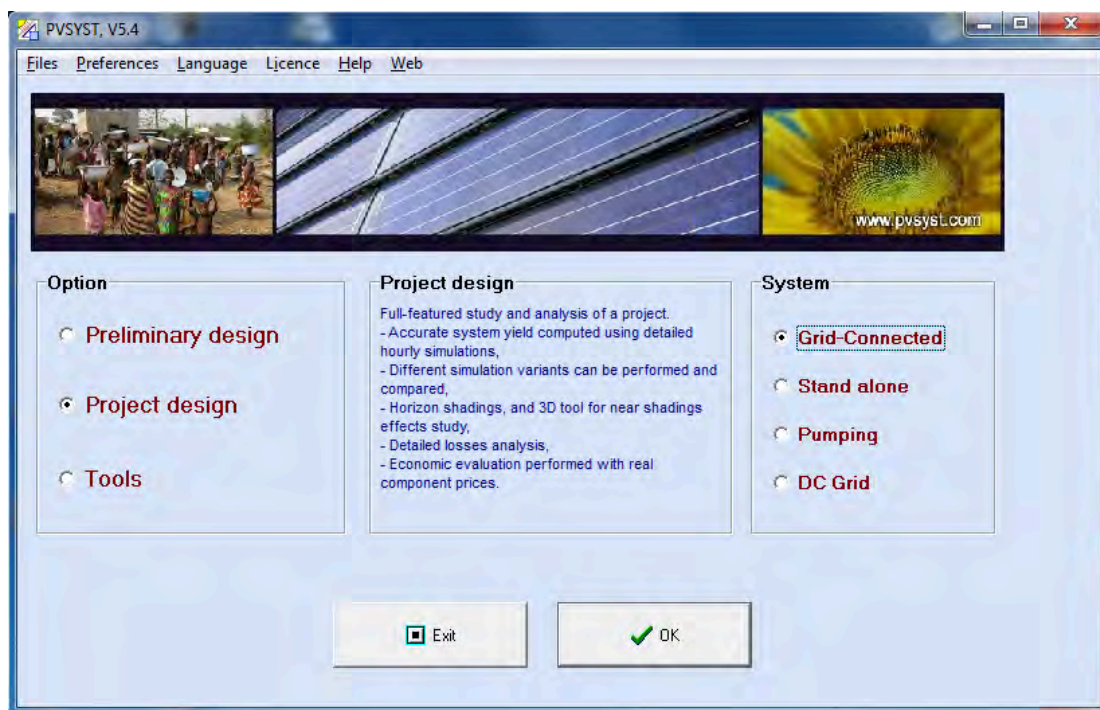
สำหรับรายละเอียดของแต่ละส่วนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ในตารางที่ 8.1



ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม PVSYS

ส่วนการทำงาน	ฟังก์ชันการทำงาน
Preliminary Design	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Per-Sizing</li> <li>2. Grid-connected</li> <li>3. Stand-alone</li> <li>4. Pumping</li> <li>5. Preliminary Design</li> </ol>
Project Design	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plane orientation</li> <li>2. Expert system : Grid-connected system</li> <li>3. Expert system : Stand-alone</li> <li>4. Expert system : Pumping system</li> <li>5. Economic evaluation</li> </ol>
Tools	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Meteo database               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geographic sites</li> <li>- Synthetic hourly data generation</li> <li>- Import meteo data</li> <li>- Import ASCII meteo file</li> <li>- Meteo tables and graphs</li> </ul> </li> <li>2. Solar tool box               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tables/Graphs of solar parameters</li> <li>- Electrical behavior of PV array</li> <li>- Monthly meteo computation</li> <li>- Transposition factor</li> <li>- Operating voltage with optimization</li> </ul> </li> <li>3. Component database               <ul style="list-style-type: none"> <li>- PV modules</li> <li>- Grid inverters</li> <li>- Batteries</li> <li>- Regulators for stand-alone</li> <li>- Generators</li> <li>- Pumps</li> <li>- Regulators for pumping</li> <li>- Manufacturer and Seller</li> </ul> </li> <li>4. Measured data               <ul style="list-style-type: none"> <li>- ImpASCII hourly file</li> <li>- File transformation</li> <li>- Data tables and graphs</li> </ul> </li> </ol>

และส่วนเชื่อมต่อด้านงานผู้ใช้ของโปรแกรม PVSYSY สามารถแสดงได้ในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 ส่วนเชื่อมต่อด้านงานผู้ใช้ของโปรแกรม PVSYSY

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดการบังแสงแดด (Shading) และกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Mismatch) (ซึ่งอยู่ในหัวข้อ Electrical behavior of PV array ของตารางที่ 8.1) ในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อด้านงานผู้ใช้ที่ทำการพัฒนาขึ้น กับผลจากการจำลองโดยโปรแกรม PVSYSY ภายใต้สถานการณ์เดียวกันเพื่อตรวจสอบผลความแม่นยำซึ่งจะมีการนำเสนอในบทที่ 11 ต่อไป

สำหรับกระบวนการคำนวณ (Algorithm) ของโปรแกรม PVSYSY ในกรณีที่เกิดการบังแสงแด่นั้น จะมีรายละเอียดในรูปแบบของสถานที่ตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น อาคารหรือต้นไม้โดยรอบ และทำการพิจารณาเงาของสิ่งกีดขวางดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา และเส้นทางการโคจรของดวงอาทิตย์เพื่อหารูปแบบของการบังแสงแดดที่จะเกิดขึ้นในแต่ละรอบปี นอกจากนี้ในกรณีที่เฉพาะเจาะจง เช่น การพิจารณาผลของการบังแสงแดดต่อสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นั้น จะมีกระบวนการคำนวณด้วยวิธีทางกราฟ (Graphical method) เหมือนกันทั้งในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและโปรแกรม PVSYST ซึ่งก็คือวิธีการที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 นั่นเอง อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ละเอียดผลของแรงดันที่ตกคร่อมสายพาสไดโอดและใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ทำให้ผลการทดลองที่ได้ อาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อย

สำหรับกระบวนการคำนวณของโปรแกรม PVSYST ในกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะใช้การคำนวณโดยพิจารณาจากผลของการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอาเรย์ที่มีการเสื่อมสภาพไม่เท่ากันเป็นหลัก โดยจำพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรเป็นร้อยละ (%) ที่เปลี่ยนไปจากเดิม แล้วจึงทำการคำนวณด้วยวิธีทางกราฟออกมาเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณากรณีที่เกิดผลความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มาจากผู้ผลิตที่แตกต่างกันด้วย กล่าวคือสำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะพิจารณาผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทราบค่าของกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของแต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันเป็นค่าจริง (ในหน่วยแอมแปร์และโวลต์) แล้วจึงทำการคำนวณด้วยวิธีทางกราฟ ดังที่กล่าวไปในบทที่ 7

### 8.2.2 โปรแกรม System Advisor Model (SAM)

โปรแกรม System Advisor Model หรือ SAM เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย National Renewable Energy Laboratory (NREL) เพื่อการคำนวณประสิทธิภาพและงบประมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทน สำหรับผู้เชี่ยวชาญด้านต่างๆ เช่น วิศวกร ผู้ออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน หรือการใช้งานเพื่อประกอบการวิเคราะห์หรืองานวิจัย เป็นต้น

โดยโปรแกรม SAM นี้ สามารถที่จะคาดการณ์ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ และประมาณต้นทุน รวมถึงกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าแบบต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า (Grid-Connected system) ได้อย่างแม่นยำ จากรูปแบบการติดตั้ง ราคาในการดินเครื่องของระบบผลิตไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามแต่ระบุ อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถทำงานได้ทั้งจากมุมมองของผู้ผลิตไฟฟ้า เช่น การพิจารณาเรื่องของสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power Purchase Agreement: PPA) และมุมมองของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น การซื้อขายไฟฟ้าในราคาตามอัตรา

บ้านพักอาศัยได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามฐานข้อมูลต่างๆของโปรแกรม SAM จะค่อนข้างจำกัด คือ จะเน้นข้อมูลต่างๆที่มีในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นหลัก ทำให้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยได้มากเท่าที่ควร [42]

สำหรับโปรแกรม SAM นี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักในการทำงาน คือ

- (1) การเลือกประเภทของระบบผลิตไฟฟ้า (Technology selection)
- (2) การเลือกรูปแบบการประเมินการเงิน (Financing selection)

สำหรับรายละเอียดของแต่ละส่วนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 รายละเอียดของแต่ละส่วนการทำงานของโปรแกรม SAM

Technology selection	Financing selection
<ul style="list-style-type: none"> <li>- PV</li> <li>- Concentrating Solar Power (CSP)</li> <li>- Generic System</li> <li>- Solar Water Heating</li> <li>- Wind Power</li> <li>- Geothermal</li> <li>- Biomass</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Residential</li> <li>- Commercial</li> <li>- Commercial PPA</li> <li>- Utility Independent Power Produced (IPP)</li> <li>- Advanced IPP</li> </ul>

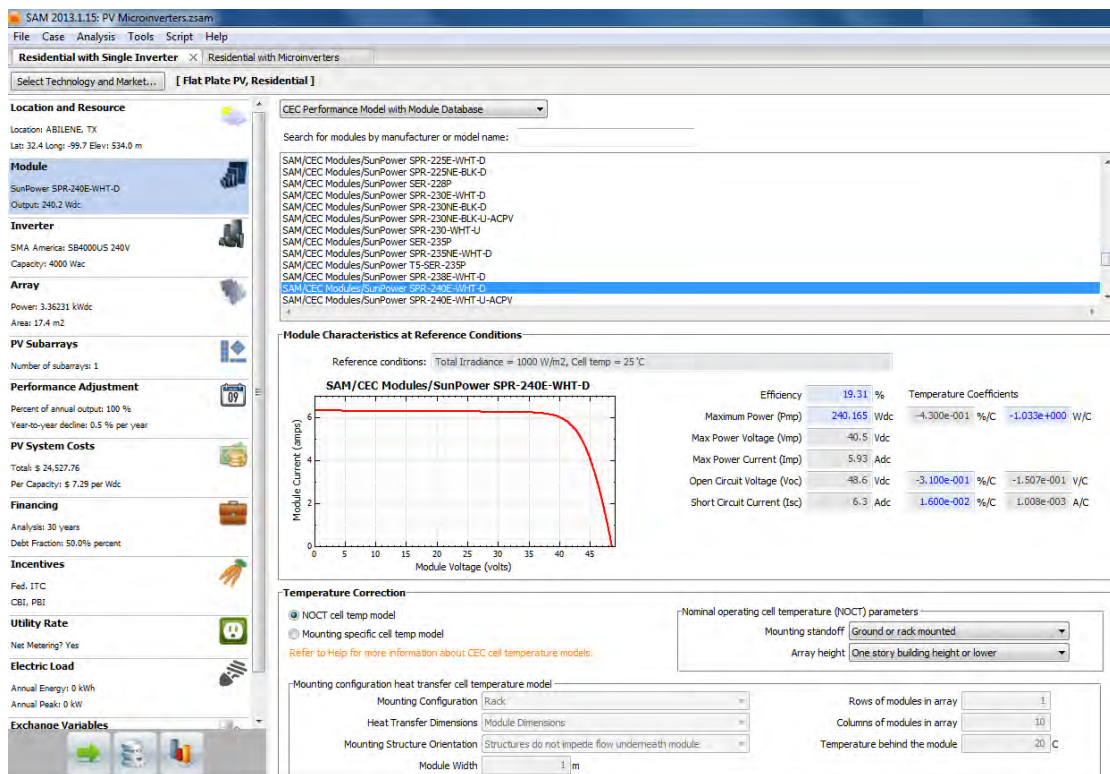
นอกจากนี้โปรแกรม SAM นี้ยังประกอบไปด้วยฟังก์ชันภายใน จำนวน 11 ฟังก์ชัน คือ

- (1) สถานที่ติดตั้งและทรัพยากร (Location and Resource)
- (2) โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์
- (3) อินเวอร์เตอร์
- (4) อาเรย์
- (5) อาเรย์ย่อย (PV subarray)
- (6) การปรับปรุงแก้ไขประสิทธิภาพ (Performance adjustment)
- (7) ราคาของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV system cost)
- (8) การเงิน (Financing)

- (9) ปัจจัยภายนอก (Intensives)  
 (10) อัตราค่าไฟจากการไฟฟ้าฯ (Utility rate)  
 (11) โหลด (Electric load)

และส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้ของโปรแกรม SAM สามารถแสดงได้ในรูปที่

8.2



รูปที่ 8.2 ส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้ของโปรแกรม SAM

### 8.3 การสร้างโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้ด้วยโปรแกรม Matlab

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการจำลองและพัฒนาโปรแกรมด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรม Matlab เป็นหลัก รวมไปถึงการสร้างส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้ด้วยเช่นกัน ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อการสร้างโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้

โปรแกรม Matlab มีฟังก์ชันภายในสำหรับสร้างโปรแกรมแบบเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้โดยสามารถเรียกใช้ผ่านทางคำสั่ง “GUIDE” หรือ Graphical User Interface Development Environment ซึ่งเป็นคำสั่งภายในสำหรับการสร้างส่วนเชื่อมต่อไประบบงานผู้ใช้ได้ง่ายจากโปรแกรม Matlab ทำให้สามารถบันทึกและแก้ไขส่วน

เชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้ได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่ง GUIDE จะสร้างไฟล์ขึ้นมา 2 ไฟล์เพื่อเก็บ และนำส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช่มารแสดงผลโดยจะประกอบไปด้วย Fig-file ที่ทำหน้าที่บรรจุรายละเอียดของวัตถุ (Object) ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในหน้าต่างรูปภาพที่เป็นส่วนแสดงผลของส่วนประสานงานผู้ใช้ และ M-file ที่ทำหน้าที่บรรจุชุดคำสั่งเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้

โดยโปรแกรม Matlab จะสร้างส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้นหน้าต่างรูปภาพ (Figure window) ซึ่งจะเป็นหน้าต่างที่มีส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรม เช่น axes, uicontrol หรือวัตถุอื่นๆ โดยการสร้างส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้นั้นจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ [40]

- (1) การกำหนดและวางส่วนประกอบต่างๆลงบนหน้าต่างส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้
- (2) การเขียนโปรแกรมหรือชุดคำสั่งเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนประกอบต่างๆในส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้

### 8.3.1 การสร้างองค์ประกอบต่างๆในหน้าต่างส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้

สำหรับการกำหนดและวางส่วนประกอบต่างๆ ลงบนหน้าต่างส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้นั้น จะปรากฏหน้าต่าง Layer Editor ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8.3 หลังจากพิมพ์คำสั่ง guide ลงในหน้าจอหลักของโปรแกรม Matlab โดยที่

**ส่วนที่ 1** ในรูป คือ ส่วนเมนูหลักของคำสั่ง guide

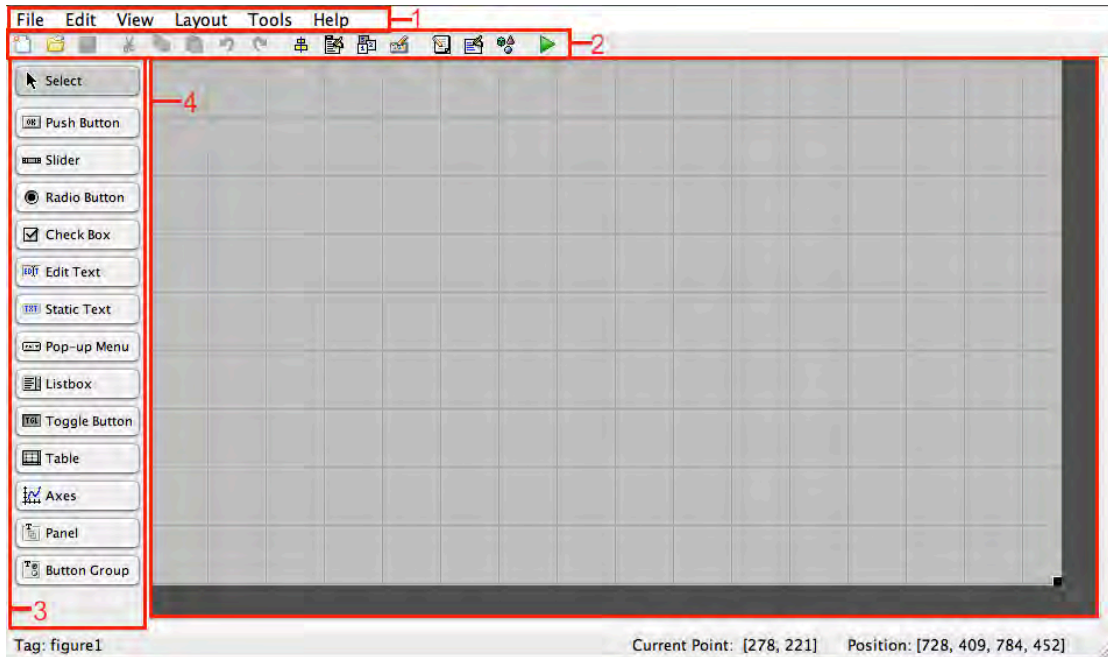
**ส่วนที่ 2** ในรูป คือ ส่วนเมนูย่อยของคำสั่ง guide ซึ่งประกอบไปด้วยคำสั่งสร้างใหม่ เปิดไฟล์เดิม บันทึกไฟล์ ตัด คัดลอก วาง ก่อนหน้า ถัดไป รูปแบบการจัดเรียง รายละเอียดวัตถุ ชุดคำสั่งภายในวัตถุ และเริ่มส่วนประสานงานผู้ใช้

**ส่วนที่ 3** ในรูป คือ แถบเครื่องมือสำหรับสร้างส่วนประกอบต่างๆ ให้กับส่วนประสานงานผู้ใช้ ซึ่งประกอบด้วย ปุ่มคำสั่งชนิดต่างๆ แถบข้อความ ส่วนแสดงรูปภาพ ส่วนแสดงตาราง ฯลฯ

**ส่วนที่ 4** ในรูป คือ หน้าต่างแสดงผลของส่วนประสานงานผู้ใช้

แถบเครื่องมือต่างๆดังแสดงในส่วนที่ 3 ของรูปที่ 8.3 นั้นสามารถเพิ่มเข้าสู่ส่วนที่ 4 หรือหน้าต่างแสดงผลของส่วนเชื่อมต่oprะสานงานผู้ใช้ได้ โดยการกดเมาส์เลือกที่เครื่องมือต่างๆแล้วลากมายังบริเวณหน้าต่างแสดงผล โดยผู้สร้างส่วนเชื่อมต่oprะสานงาน

งานผู้ใช้งานจะสามารถออกแบบรูปแบบ หรือโครงสร้างต่างๆ ของส่วนหน้าต่างแสดงผลได้ง่ายดายมากขึ้น



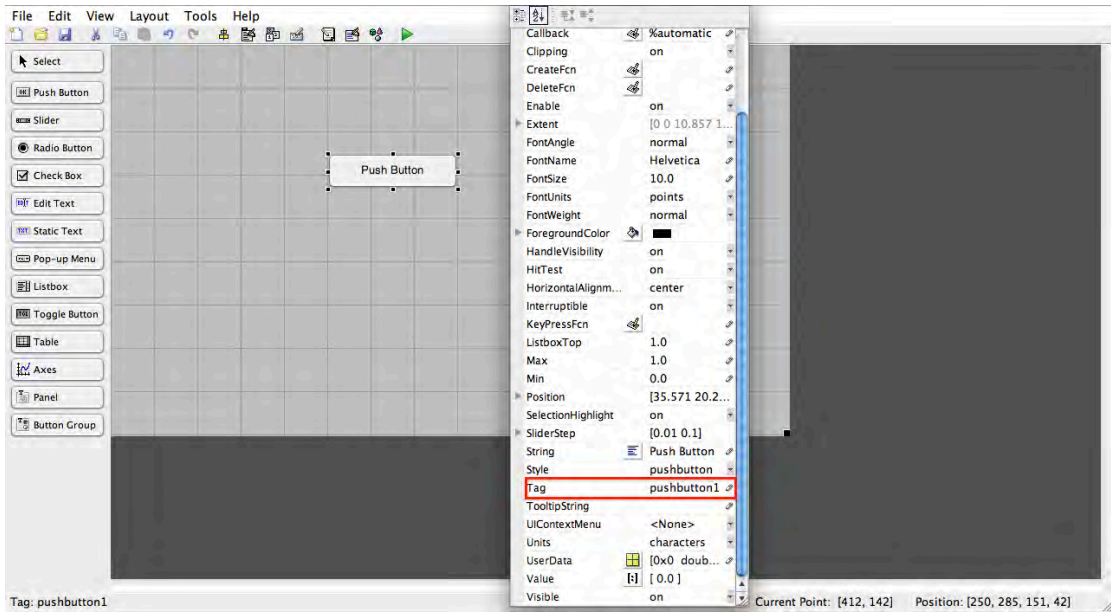
รูปที่ 8.3 หน้าต่าง Layer Editor สำหรับการกำหนดและวางส่วนต่างๆ ของส่วนประสานงานผู้ใช้งาน

### 8.3.2 การป้อนชุดคำสั่งเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้งาน

สำหรับการเขียนโปรแกรมหรือชุดคำสั่งการคำนวณ เพื่อให้มีการแสดงผลของโปรแกรมผ่านทางส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้นั้น จะสามารถทำได้หลังจากกำหนดและวางส่วนประกอบต่างๆ สำหรับแสดงผลในส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้งานเสร็จสิ้นแล้ว โดยจะใช้วิธีการเขียนชุดคำสั่งเป็นบรรทัดๆ ในรูปแบบของ m-file ดังเช่นการเขียนชุดคำสั่งของโปรแกรม Matlab ตามปกติ เพียงแต่ในการเชื่อมส่วนของชุดคำสั่งเข้ากับหน้าต่างแสดงผลส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้นั้น จะต้องมีการเรียกใช้ส่วนแสดงผลต่างๆ ผ่านทางชื่อ Tag หรือป้ายกำกับของวัตถุแต่ละชิ้นภายในหน้าต่างแสดงผล โดยจะสามารถทราบชื่อของป้ายกำกับของวัตถุได้จากการคลิกเมาส์ขวาที่วัตถุนั้นๆ และเลือก Properties inspector ดังแสดงในรูปที่ 8.4

คำสั่งต่างๆ จะถูกเรียกผ่านฟังก์ชันที่เรียกว่า Call back ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ถูกร่างขึ้นใน m-file ของส่วนเชื่อมต่อประสานงาน สำหรับทุกๆ วัตถุที่อยู่ในหน้าต่าง

แสดงผล โดยทุกครั้งที่ว่าวัตถุนั้นๆถูกเรียกใช้โดยคำสั่งใดใด หรือโดยการเรียกใช้โดยผู้ใช้งาน (เช่น การกดปุ่มนั้นๆ) ก็จะเป็นการเรียกใช้ชุดคำสั่งภายใต้ฟังก์ชัน Call back ของวัตถุนั้นๆให้แสดงผล



รูปที่ 8.4 แสดงวัตถุประเภทปุ่มกด (Push button) ซึ่งมีชื่อป้ายกำกับ (Tag) คือ pushbutton1

#### 8.4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอ แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง หรือส่วนของแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์และทฤษฎีต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ถึงบทที่ 7 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ต่างๆจะเน้นที่แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทสองไดโอดเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- (1) แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ
- (2) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดการบังแสงแดด
- (3) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผง



#### 8.4.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ

สำหรับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกตินั้น จะพิจารณาผลของค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะสามารถเลือกประเภทของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้ระหว่าง แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทหนึ่งไดโอด หรือแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทสองไดโอด และสามารถปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปร “แฟกเตอร์อุดมคติ” (Diode ideality factor) ให้เหมาะสมตามแต่ชนิดของผลึกที่ใช้ทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

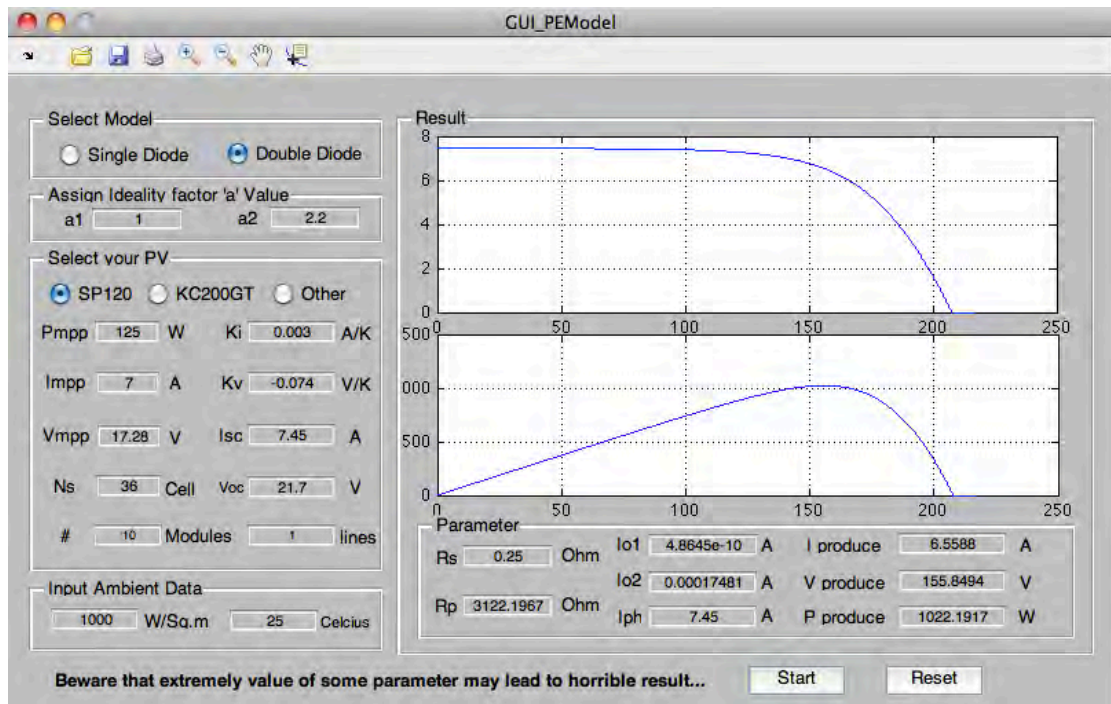
สำหรับข้อมูลรับเข้า (Input) และข้อมูลขาออก (Output) ของแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกตินั้น สามารถแสดงได้ในตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะปกติ

ข้อมูลที่รับเข้า	ข้อมูลขาออก
<ol style="list-style-type: none"> <li>ประเภทของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (แบบจำลองหนึ่งไดโอดหรือแบบจำลองสองไดโอด)</li> <li>ค่าของ “แฟกเตอร์อุดมคติ” ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์</li> <li>ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 ตัว ซึ่งประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> <li>ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>P_{mpp}</math>)</li> <li>ค่าของกระแส ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>I_{mpp}</math>)</li> <li>ค่าของแรงดัน ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>V_{mpp}</math>)</li> <li>จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในแผง (<math>N_s</math>)</li> <li>ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (<math>K_i</math>)</li> <li>ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (<math>K_v</math>)</li> <li>ค่าของกระแสลัดวงจร (<math>I_{sc}</math>)</li> <li>ค่าของแรงดันเปิดวงจร (<math>V_{oc}</math>)</li> </ul> </li> <li>ค่าความเข้มแสง</li> <li>ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้</li> <li>กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้</li> <li>ค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม (<math>R_s</math>)</li> <li>ค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนาน (<math>R_p</math>)</li> <li>ค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอด (<math>I_o</math>)</li> <li>ค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ (<math>I_{ph}</math>)</li> <li>ค่าของกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ จุดทำงานกำลังสูงสุด (<math>I_{produce}</math>)</li> <li>ค่าของแรงดันที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ จุดทำงานกำลังสูงสุด (<math>V_{produce}</math>)</li> <li>ค่าของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ จุดทำงานกำลังสูงสุด (<math>P_{produce}</math>)</li> </ol>

สำหรับข้อมูลค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในเบื้องต้นได้มีการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 รุ่น คือ เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท Solartron และเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท Kyocera อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นอื่นๆ สามารถทำได้โดยใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ทราบจากผู้ผลิตลงไปในช่วงว่างที่มีให้

แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะปกติที่พัฒนาขึ้นโดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติที่พัฒนาขึ้น

#### 8.4.2 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาร์เรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

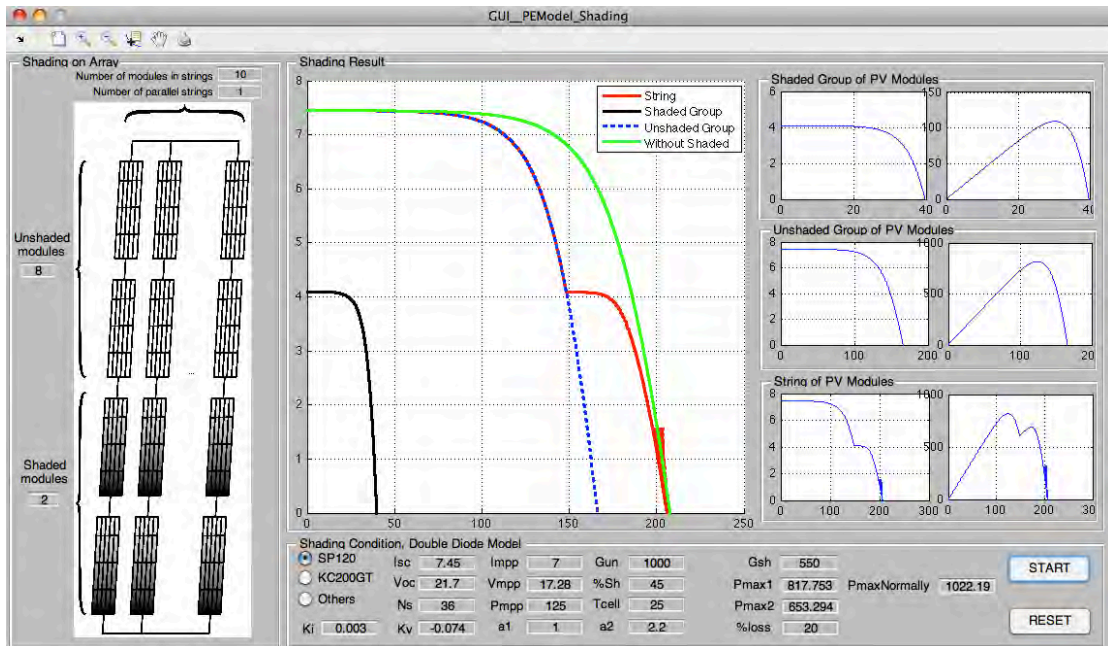
สำหรับแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาร์เรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้น จะทำการพิจารณาอาร์เรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละกลุ่มของการบังแสงแดด โดยที่ในแต่ละกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดนั้นจะมีรูปแบบของการบังแสงแดดเหมือนกัน เช่น จำนวนโมดูลที่ถูกบังแสงแดดในหนึ่งสตริงและอัตราของความเข้มแสงที่ลดลง

สำหรับข้อมูลที่รับเข้า (Input) และข้อมูลขาออก (Output) ของแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาร์เรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้น สามารถแสดงได้ในตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะที่เกิดการบังแสงแดด

ข้อมูลที่รับเข้า	ข้อมูลขาออก
1. จำนวนของโมดูลในหนึ่งสตริง 2. จำนวนสตริงในหนึ่งอาเรย์ 3. จำนวนโมดูลที่ถูกบังแสงแดด 4. จำนวนโมดูลที่ไม่ถูกบังแสงแดด 5. ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 ตัว ซึ่งประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>P_{mpp}</math>)</li> <li>- ค่าของกระแส ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>I_{mpp}</math>)</li> <li>- ค่าของแรงดัน ณ จุดทำงานสูงสุด (<math>V_{mpp}</math>)</li> <li>- จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในแผง (<math>N_s</math>)</li> <li>- ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (<math>K_i</math>)</li> <li>- ค่าคงที่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (<math>K_v</math>)</li> <li>- ค่าของกระแสลัดวงจร (<math>I_{sc}</math>)</li> <li>- ค่าของแรงดันเปิดวงจร (<math>V_{oc}</math>)</li> </ul> 6. ค่าความเข้มแสงของส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดด 7. อัตราการลดลงของพลังงานแสง 8. ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์	1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของส่วนที่โดนบังแสงแดด 2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของส่วนที่โดนบังแสงแดด 3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของส่วนที่ไม่โดนบังแสงแดด 4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของส่วนที่ไม่โดนบังแสงแดด 5. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของอาเรย์ 6. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของอาเรย์ 7. ค่าความเข้มแสงของส่วนที่เกิดการบังแสงแดด 8. จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองจุด 9. เปอร์เซนต์ของอัตราการสูญเสียกำลังไฟฟ้า 10. กำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะที่เกิดการบังแสงแดดที่พัฒนาขึ้นโดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะที่เกิดการบังแสงแดด

#### 8.4.3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดความแตกต่างของแผง

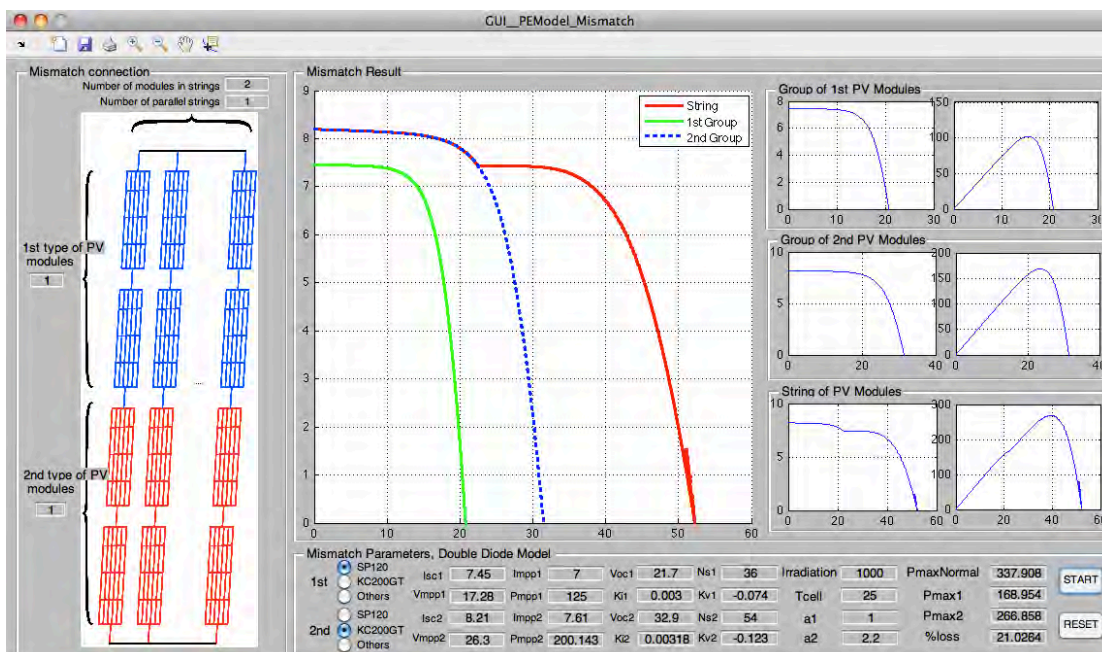
สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงนั้น จะทำการพิจารณาสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของแผง เช่น ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันมาเชื่อมต่อกัน

สำหรับข้อมูลที่รับเข้า (Input) และข้อมูลขาออก (Output) ของแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงนั้น สามารถแสดงได้ในตารางที่ 8.5

ตารางที่ 8.5 ข้อมูลที่รับเข้าและข้อมูลขาออกของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดหนึ่งอาเรียภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผง

ข้อมูลที่รับเข้า	ข้อมูลขาออก
1. จำนวนของโมดูลในหนึ่งสตริง	1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 1
2. จำนวนสตริงในหนึ่งอาเรีย	2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 1
3. จำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 1	3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 2
4. จำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 2	4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 2
5. ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 1	5. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรีย
6. ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตรายที่ 2	6. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรีย
7. ค่าความเข้มแสง	7. จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองจุด
8. ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์	8. เปอร์เซนต์ของอัตราการสูญเสียกำลังไฟฟ้า
9. ค่าของ “แฟกเตอร์อุณหภูมิตัด” ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	9. กำลังไฟฟ้าในสภาวะปกติเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด

แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรียภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงที่พัฒนาขึ้นโดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 8.7



รูปที่ 8.7 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์ภายใต้สภาวะเมื่อเกิดความแตกต่างของแผง

## 8.5 สรุป

ในบทที่ 8 นี้ได้กล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโปรแกรมที่มีลักษณะเป็น “ส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้” และมีการแนะนำโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้จริงในทางปฏิบัติ ทั้งในแง่ของการศึกษาค้นคว้าและการลงทุนด้านพลังงานแสงอาทิตย์ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ยกตัวอย่างโปรแกรมจำนวน 2 โปรแกรม คือ PVSYST และ SAM อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นการเปรียบเทียบผลกับโปรแกรม PVSYST เป็นหลัก เนื่องจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรม PVSYST นั้นสอดคล้องกับฐานข้อมูลของระบบทดสอบจริงบนดาดฟ้าอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากที่ได้กล่าวไปจะพบว่า โปรแกรมตัวอย่างที่ได้นำเสนอทั้งสองโปรแกรมจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปกล่าวคือ โปรแกรม PVSYST นั้นจะเน้นที่ปริมาณของฐานข้อมูลที่มากและครอบคลุมทั่วโลก ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายพื้นที่ เช่น ในประเทศไทย และแบบจำลองของพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกมาในรูปแบบของมุมมองสามมิติ ทำให้สามารถเข้าใจได้ง่าย อย่างไรก็ตามโปรแกรม PVSYST นั้นจะเน้นไปในส่วนของข้อมูลทางเทคนิคและระบบการติดตั้ง แต่ขาดในส่วนของการคำนวณด้านการเงินและการลงทุนและระยะเวลาคุ้มทุน อย่างไร

ก็ตามโปรแกรม SAM จะเน้นในส่วนของคุณข้อมูลทางการเงิน เช่น ราคาของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงข้อมูลของสัญญาซื้อขายไฟฟ้า หรือ PPA และการคำนวณระยะเวลาคืนทุน ทำให้โปรแกรม SAM เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแง่ของการลงทุนติดตั้งมากกว่า อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าโปรแกรม SAM นั้นจะมีแต่ฐานข้อมูลของประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้ฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในประเทศไทยได้

อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมหลักทั้งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองรูปแบบโปรแกรมส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ อีกทั้งยังได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะโปรแกรมแบบส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้อีกด้วย



## บทที่ 9

### ระบบทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอระบบทดสอบที่ใช้ทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะประกอบไปด้วยระบบทดสอบหลักสองแห่ง คือ ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาดเล็ก ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงและทดสอบผลของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเมื่อเกิดการบังแสงแดด และระบบทดสอบท่าทรายซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาดใหญ่ จำนวน 34 บัสใช้ในการทดสอบแบบจำลองที่มีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในบทนี้จะแบ่งการเสน่อออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- (1) ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- (2) ระบบทดสอบท่าทราย
- (3) สรุป

#### 9.1 ระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้นเป็นระบบทดสอบที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น ทั้งแบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอดและสองไดโอดโดยเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดจริงที่ได้จากระบบทดสอบ รวมถึงการทดลองแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด โดยในส่วนของระบบทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อย่อยดังนี้ คือ

- สถานที่
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- รายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- ข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง

### 9.1.1 สถานที่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จาก “โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ” ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา โดยติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆ เช่น อินเวอร์เตอร์ จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการทดสอบร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำผลจากการตรวจวัดจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสถานที่ที่ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวอยู่ที่ ชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 ชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 9.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 และบทที่ 5 ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะอยู่ในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องทำการติดตั้งอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติมเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC current) และสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ที่ชั้น 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักจำนวน 4 ชนิด คือ

- เซลล์แสงอาทิตย์
- อินเวอร์เตอร์
- อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor)
- ตัวเก็บข้อมูล

#### 9.1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ ณ ระบบทดสอบชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly-crystalline จากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120 เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 10 โมดูล กำลังการผลิตสูงสุด 1.2 kW [32] โดยมีข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และนำมาทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120

#### 9.1.2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 โดยการติดตั้งอินเวอร์เตอร์ที่ระบบทดสอบ ชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ใช้อินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL (Sunny Boy 2100TL) จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) โดยอินเวอร์เตอร์ในระบบทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 อินเวอร์เตอร์จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น 2100TL

โดยอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL นั้นเป็นอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีหม้อแปลงซึ่งมีข้อดี คือ มีช่วงแรงดันขาเข้าและช่วงกระแสขาเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่กว้าง และสามารถนำมาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปได้ มีความคงทนและน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร เหมาะสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก โดยข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.1 [39]

ตารางที่ 9.1 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน)

ข้อมูลทางเทคนิค	
ฝั่งขาเข้าอินเวอร์เตอร์ (DC)	
กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด (เมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าเป็น 1)	2200 W
แรงดันสูงสุด	600 V
ช่วงของแรงดัน ณ จุดทำงานกำลังสูงสุด (MPP)	200 V - 480 V
แรงดันปกติ (Norminal voltage)	400 V
แรงดันต่ำสุด/แรงดันขีดเริ่ม	125 V / 150 V
กระแสเข้าสูงสุดต่อสตรึง	11 A / 11 A
จำนวน MPP tracker ต่อสตรึง	1 / 2
ฝั่งขาออกอินเวอร์เตอร์ (AC)	
กำลังไฟฟ้าจริงปกติ (Norminal power at 230 V, 50 Hz)	1950 W
กำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุด	2100 VA
แรงดันปกติ (Norminal voltage); ช่วงของแรงดัน	220, 230, 240 V; 180 V - 260 V
ความถี่ของระบบ; ช่วงความถี่	50 Hz; -4.5 Hz, +2.5 Hz
กระแสออกสูงสุด	11 A
ตัวประกอบกำลัง	1
ประสิทธิภาพ	

ข้อมูลทางเทคนิค	
ประสิทธิภาพสูงสุด	96%
ข้อมูลทั่วไป	
ขนาด (กว้างxยาวxสูง) (mm)	440x339x214
ข้อมูลทั่วไป	
น้ำหนัก	16 kg
ช่วงของอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้	-25 °C ... +60 °C
เสียงรบกวน	< 33 dB
โครงสร้าง	ไม่มีหม้อแปลง
การระบายความร้อน	การพาความร้อน
Electronics degree of protection / connection area (IEC 60529)	IP65 / IP65
Climatic category (per IEC 60721-3-4)	4K4H
รุ่น	2100TL

### 9.1.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดหรือเซ็นเซอร์จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny ภายในจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้สองค่า คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิทั้งสองค่านี้จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในระบบทดสอบนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 9.4 (ส่วนตรวจวัดความเข้มแสง) และรูปที่ 9.5 (ส่วนตรวจวัดอุณหภูมิ)



รูปที่ 9.4 อุปกรณ์ส่วนตรวจวัดความเข้มแสงจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny

สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงดังรูปที่ 9.4 นั้นจะต้องมีเงื่อนไขการติดตั้งเพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าความเข้มแสงได้ใกล้เคียงกับความเข้มแสงจริงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับมากที่สุดดังนี้ คือ

- สถานที่ที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงควรติดตั้งไว้ภายนอกอาคารและให้ใกล้เคียงกับสถานที่ที่ทำการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากที่สุด
- อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงจะอยู่ในช่วง  $-25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+70^{\circ}\text{C}$
- การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงนั้นควรมีทิศทาง และมุมเทียบกับพื้นระดับเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้การวัดความเข้มแสงได้ผลที่แม่นยำที่สุด



รูปที่ 9.5 อุปกรณ์สำรวจวัดอุณหภูมิจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny

สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 9.5 นั้นโดยทั่วไปจะนิยมติดตั้งไว้ด้านหลังของอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

#### 9.1.2.4 ตัวเก็บข้อมูล

สำหรับตัวเก็บข้อมูล (Data recorder) จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny webbox นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ โดยปกติจะใช้เก็บข้อมูลทุกรูปแบบ ซึ่งมีที่มาแตกต่างกันไป เช่น ข้อมูลจากอินเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วย สถานะโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะนั้น หรือข้อมูลของกำลังไฟฟ้าจริงที่เข้าสู่ระบบ เป็นต้น หรือข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดก็จะประกอบไปด้วยความเข้มแสงขณะนั้น อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะนั้น เป็นต้น และตัวเก็บข้อมูลยังสามารถทำการส่งสัญญาณเตือนเมื่อระบบเกิดความผิดปกติ โดยตัวเก็บข้อมูลจะทำการส่งข้อความที่แสดงว่ามีการทำงานผิดพลาดไปยังจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (E-mail) ที่ตั้งค่าไว้ และแม้ว่าบริเวณที่ทำการติดตั้งตัวเก็บข้อมูลจะไม่มี การเชื่อมต่อสายโทรศัพท์ แต่ตัวเก็บข้อมูลก็สามารถส่งข้อมูลผ่านพอร์ทัลสื่อสาร (Global System for Mobile communications modem: GSM modem) โดยตัวเก็บข้อมูลที่ใช้ในระบบทดสอบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.6

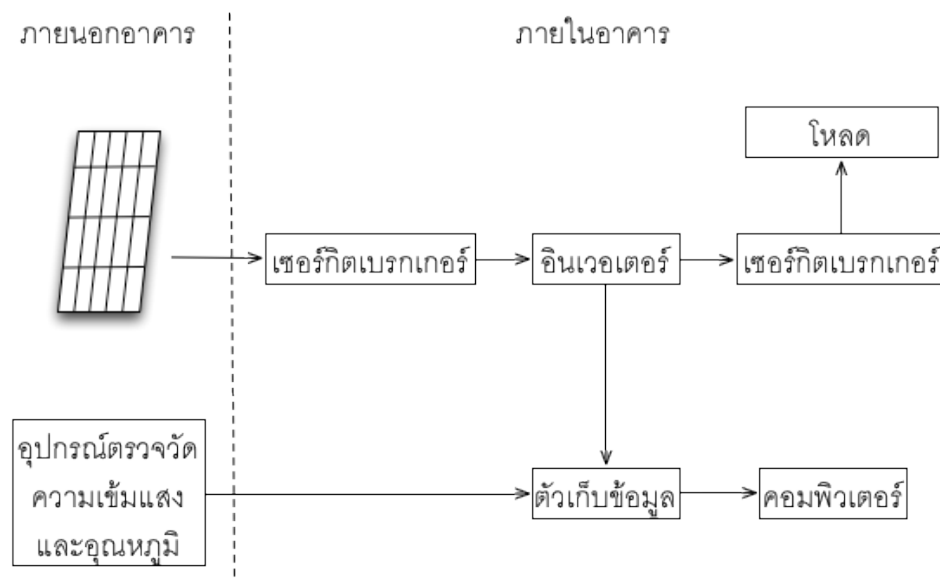




รูปที่ 9.6 ตัวเก็บข้อมูลจากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny webbox

### 9.1.3 รายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับรายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบทดสอบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.7



รูปที่ 9.7 รายละเอียดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 9.7 จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิจะถูกติดตั้งไว้บริเวณภายนอกอาคาร โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบ ที่ทำการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 10 โมดูลจะเชื่อมต่อเข้าสู่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันเซลล์แสงอาทิตย์จากความเสียหายใดๆจากระบบไฟฟ้า แล้วจึงผ่านเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แล้วจึงต่อผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันอินเวอร์เตอร์จากความเสียหายก่อนเข้าสู่โหลด โดยอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิและอินเวอร์เตอร์จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับตัวเก็บข้อมูลเพื่อส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดและอินเวอร์เตอร์มาเก็บไว้ซึ่งตัวเก็บข้อมูลจะมีการเชื่อมต่อเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถเรียกดูข้อมูลต่างๆของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากคอมพิวเตอร์ได้

#### 9.1.4 ข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง

สำหรับข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริงนี้ คือ ข้อมูลที่สามารถตรวจสอบได้จากตัวเก็บข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ดังปรากฏในรูปที่ 9.7 โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญสามารถแสดงได้ในตารางที่ 9.2 ซึ่งมีแถวที่หนึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และแถวที่สองแสดงหน่วยของพารามิเตอร์นั้น [39]

ตารางที่ 9.2 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง

Time	IntSolIrr	TmpAmb	TmpMdul	WindVel m/s	dl	E-Total	Fac	h-On
hh:mm	W/m <sup>2</sup>	°C	°C	m/s	mA	kWh	Hz	h
9:05	216.67	30.56	35.9	0	4	1317.3	50	3516

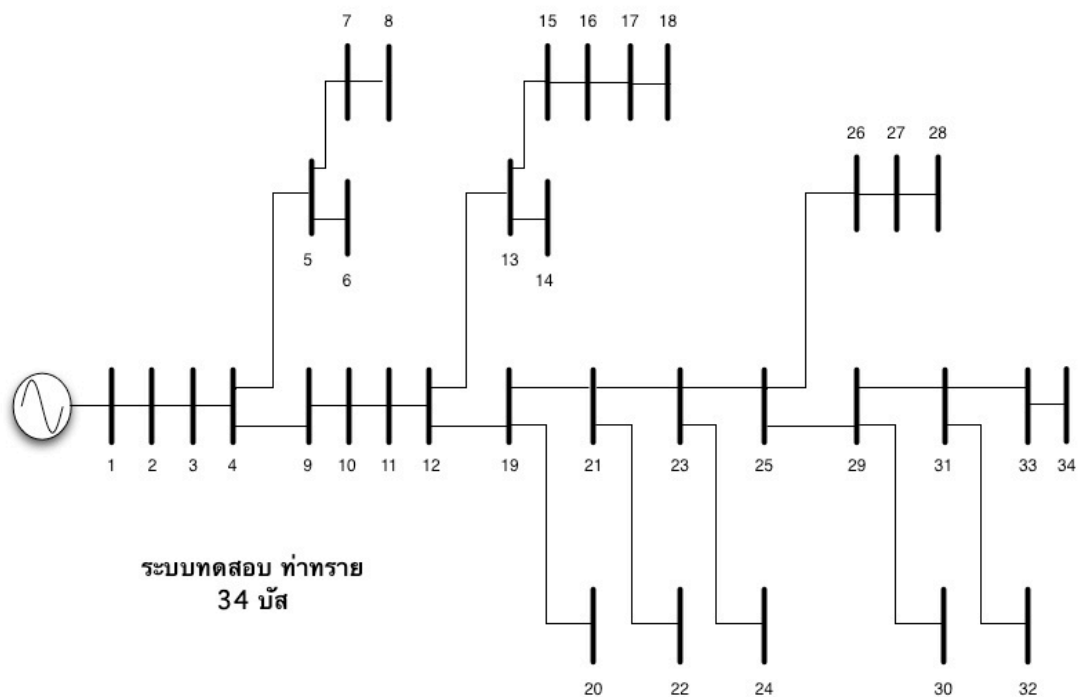
h-Total	Iac-Ist	Ipv	Pac	Status	Uac	Upv-Soll	Zac
h	mA	mA	W	-	V	V	Ohm
3162.23	708.6	1166.05	161.28	7: Mpp	228.02	158.47	0.46

โดย

- Time คือ เวลาขณะที่ทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งจะทำการบันทึกทุก 5 นาที (Hr/min)
- IntSollrr คือ ความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น ( $W/m^2$ )
- TmpAmb คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น ( $^{\circ}C$ )
- TmpMdul คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น ( $^{\circ}C$ )
- dl คือ กระแสรั่ว (Leakage current) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น (mA)
- E-Total คือ พลังงานสุทธิที่จ่ายเข้าสู่ระบบ (kWh)
- Fac คือ ความถี่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Hz)
- h-On คือ จำนวนชั่วโมงทั้งหมดที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (Hr)
- h-Total คือ จำนวนชั่วโมงทั้งหมดที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด (Hr)
- Iac-Ist คือ กระแสไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับระบบในอาคารเจริญวิศวกรรม (mA)
- Ipv คือ กระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (DC) เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น (mA)
- Pac คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น (W)
- Status คือ โหมดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะนั้น
- Uac คือ แรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของอาคารเจริญวิศวกรรม (V)
- Upv-Soll คือ แรงดันที่ออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (DC) เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น (V)
- Zac คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของกริด ( $\Omega$ )

## 9.2 ระบบทดสอบท่าทราย

สำหรับระบบทดสอบท่าทรายนั้นประกอบไปด้วยบัสจำนวน 34 บัส สายจำหน่ายจำนวน 33 เส้น มีปริมาณความต้องการไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นประมาณ 9.1 MW และ 5.5 VAr โดยระบบจะรับกำลังไฟฟ้าจากสถานีต้นทางที่บัสที่ 1 โดยระบบท่าทรายสามารถแสดงได้ในรูปที่ 9.8



รูปที่ 9.8 ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส

## 9.3 สรุป

ในบทที่ 9 นี้ได้แสดงรายละเอียดต่างๆของระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วยระบบทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประกอบด้วยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ลักษณะการเชื่อมต่อของระบบ และตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกได้จากการตรวจวัดจริง และลักษณะของระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส

## บทที่ 10

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการใช้ทฤษฎีและหลักการต่างๆ ดังที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 ถึงบทที่ 7 และนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีต่างๆ สำหรับในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 6 หัวข้อ คือ

- (1) ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด
- (2) ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด
- (3) ผลการทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (4) ผลการทดลองผลกระทบของความแตกต่างของแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (5) ผลการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- (6) สรุป

#### 10.1 ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมของข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากแต่ละผู้ผลิต โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ด้วยขั้นตอนการคำนวณดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 และบทที่ 4 โดยจะทำการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตจำนวน 2 รายที่แตกต่างกัน คือ

- เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด
- เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด

อย่างไรก็ตาม ผลจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมในหัวข้อนี้ จะถูกกล่าวถึงอีกครั้งในบทที่ 11 เมื่อมีการนำค่าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม PVSYSY

##### 10.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด

จากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 นั้น เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางมาผ่านการคำนวณด้วยวิธี

การสร้างแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด จะสามารถหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ ( $R_p, R_s, I_o, I_{ph}$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 10.1

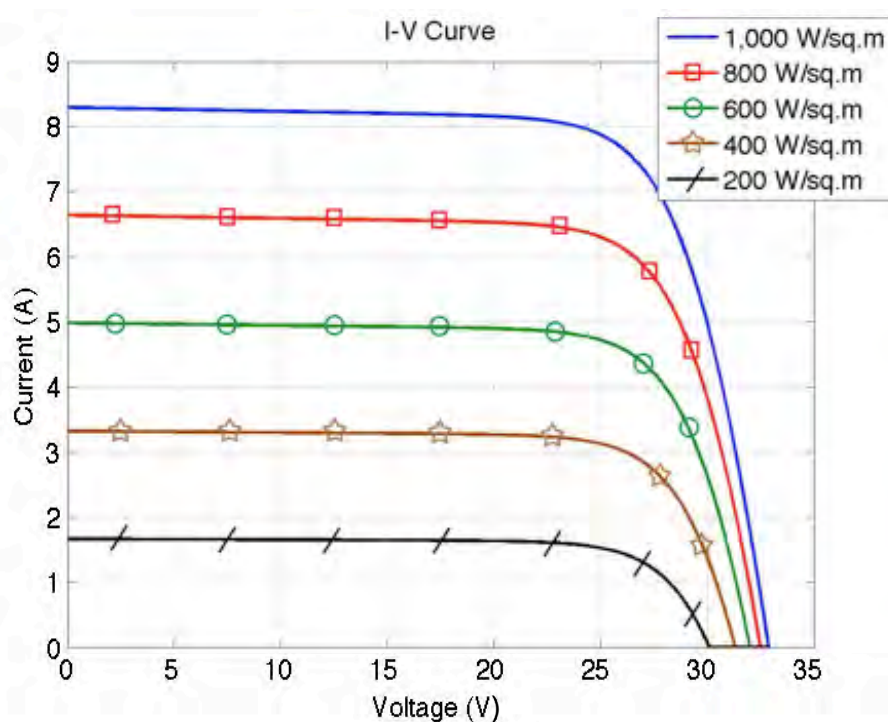
ตารางที่ 10.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT จากบริษัทเคียวเซร่าจำกัด

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	200.143 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	26.3 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.61 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.21 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.00318 (A/K)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.123 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	54
ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ )	158.66 ( $\Omega$ )
ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ )	0.342 ( $\Omega$ )
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอด ( $I_o$ )	0.416 (nA)
ค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ )	8.22 (A)

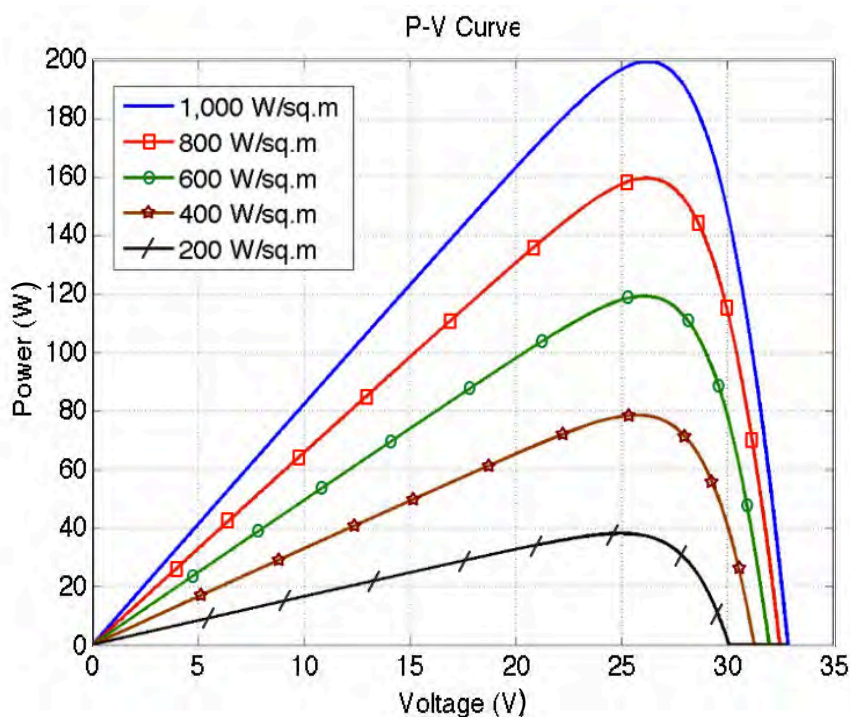
ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.2 ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักจำนวน 2 ปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยในส่วนถัดไปจะนำเสนอผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT

### 10.1.1.1 ผลของความเข้มแสง

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.1 นั้น เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.1 และ 10.2 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของความเข้มแสงจำนวน 5 ระดับ คือ 1,000, 800, 600, 400 และ 200 W/m<sup>2</sup> ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ที่ 25 °C



รูปที่ 10.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

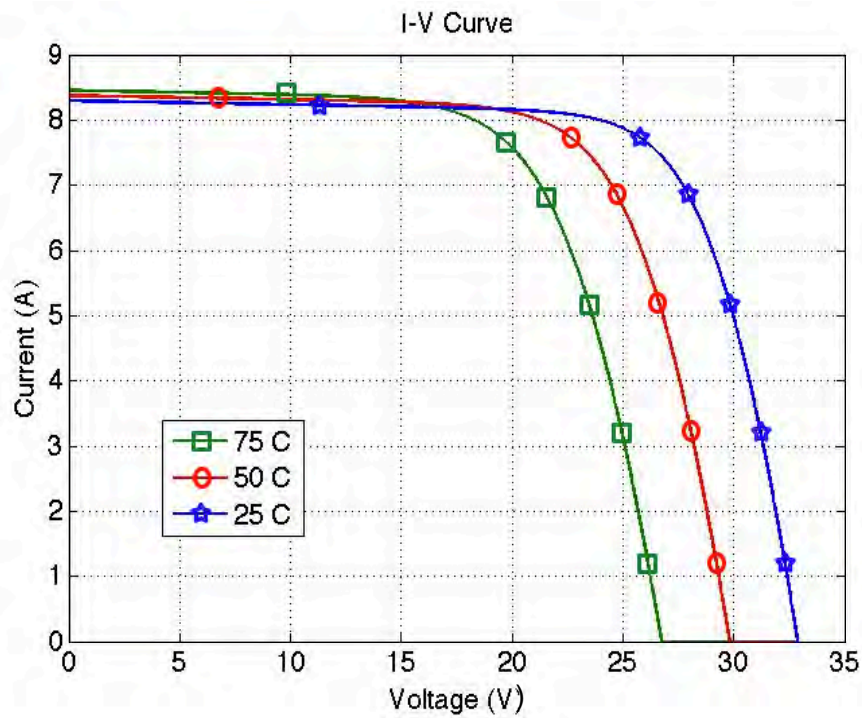


รูปที่ 10.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

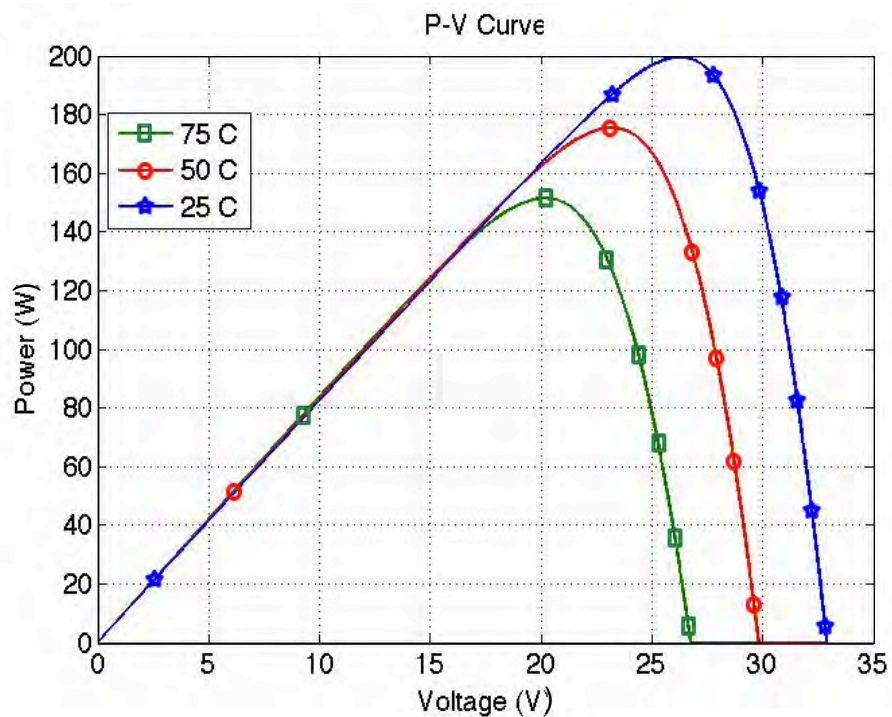
#### 10.1.1.2 ผลของอุณหภูมิ

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.1 นั้นเมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.3 และ 10.4 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 ค่า คือ  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะความเข้มแสงคงที่  $1,000\text{ W/m}^2$





รูปที่ 10.3 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด



รูปที่ 10.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

### 10.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด

จากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 นั้น เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางมาผ่านการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด จะสามารถหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ ( $R_p$ ,  $R_s$ ,  $I_o$ ,  $I_{ph}$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 10.2

ตารางที่ 10.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 จากบริษัทโซลาร์ตรอนจำกัด

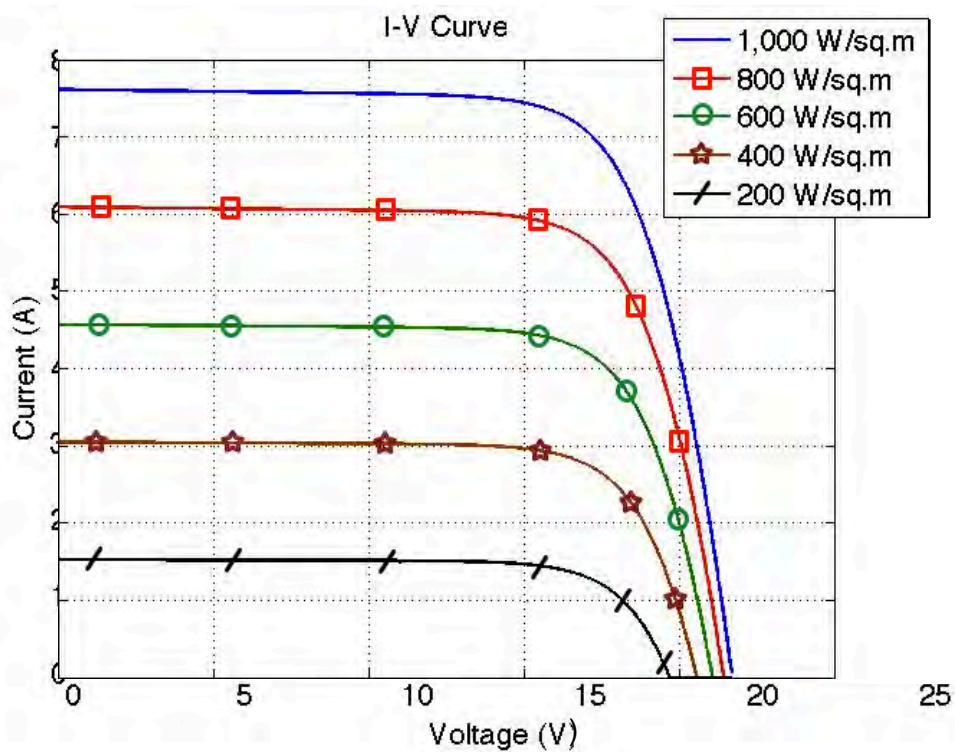
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	130.13 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	16.9 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.70 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	22.0 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.20 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.0005 (A/K)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.0036 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	36
ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ )	198.09 ( $\Omega$ )
ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ )	0.168 ( $\Omega$ )
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอด ( $I_o$ )	212.63 (nA)
ค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ )	7.61 (A)

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.2 ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักจำนวน 2 ปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยในส่วนถัดไปจะนำเสนอผล

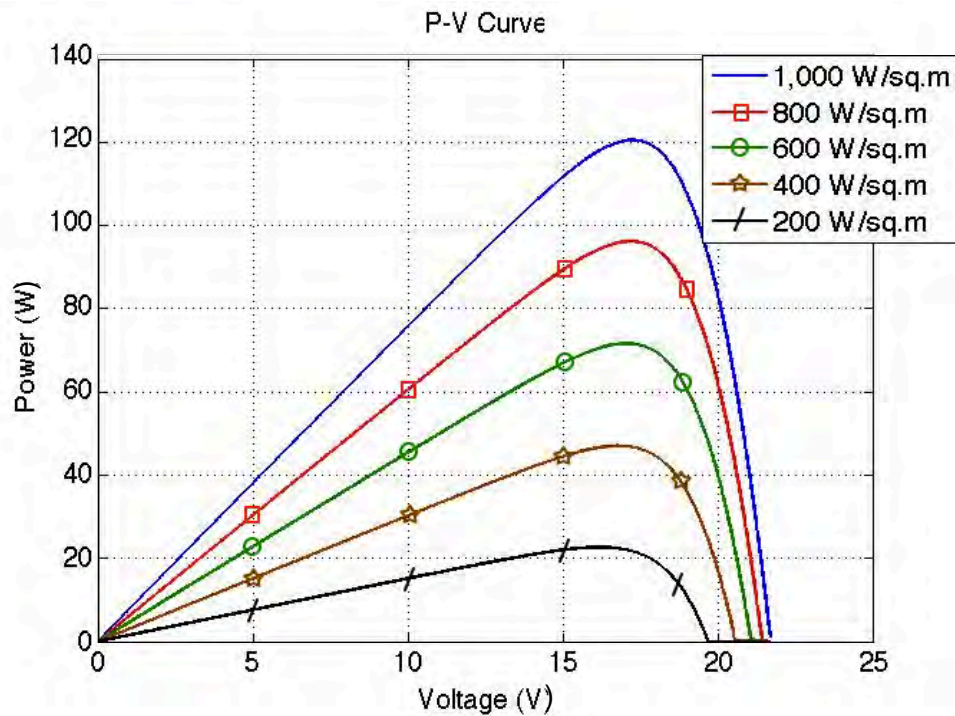
ของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120

### 10.1.2.1 ผลของความเข้มแสง

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.2 นั้น เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.5 และ 10.6 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของความเข้มแสงจำนวน 5 ระดับ คือ 1,000, 800, 600, 400 และ 200 W/m<sup>2</sup> ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 25 °C



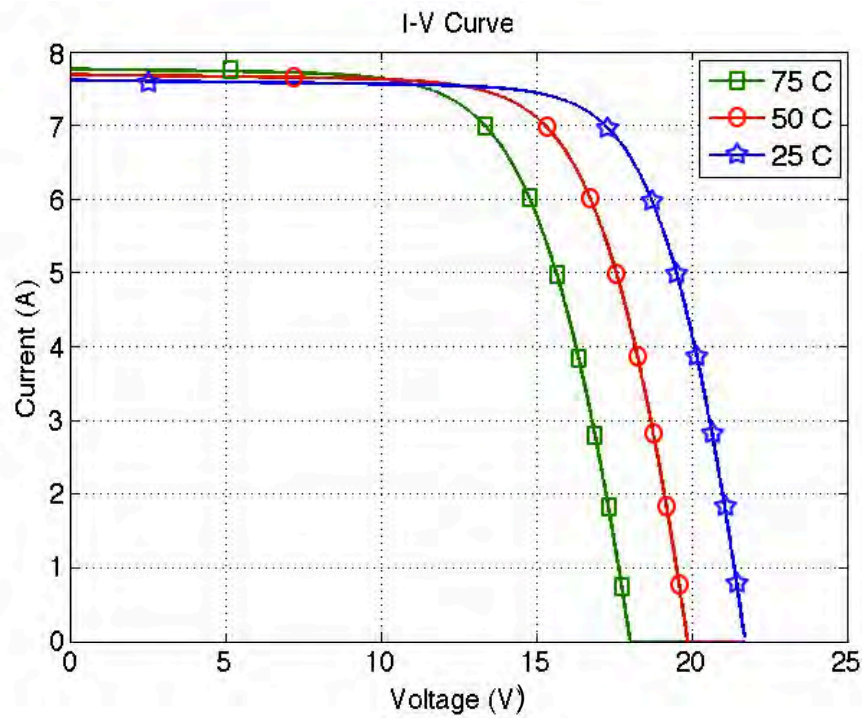
รูปที่ 10.5 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด



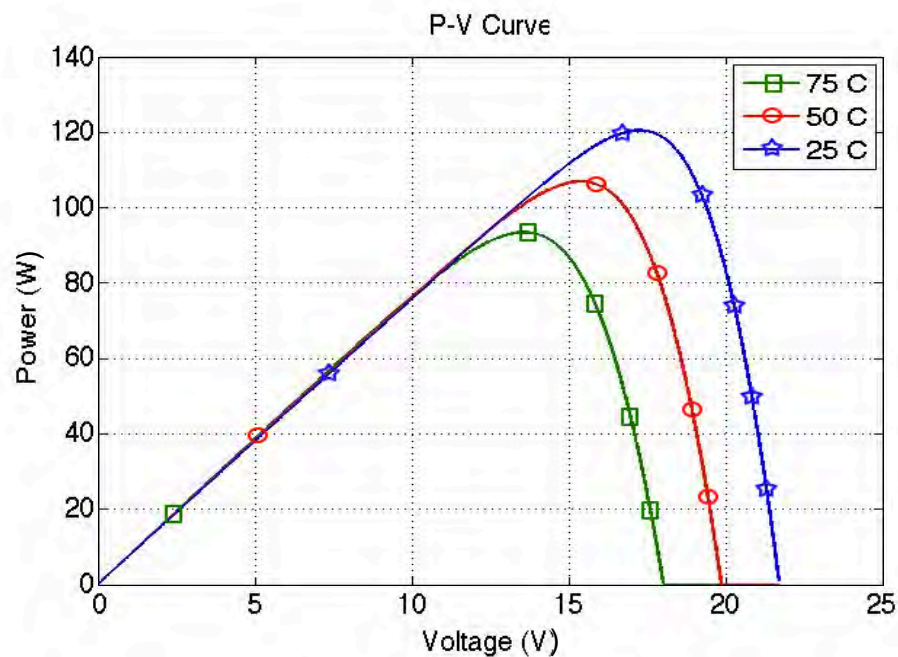
รูปที่ 10.6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลรุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

#### 10.1.2.2 ผลของอุณหภูมิ

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.2 นั้นเมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.7 และ 10.8 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 ค่า คือ  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะความเข้มแสงคงที่  $1,000 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 10.7 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด



รูปที่ 10.8 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

## 10.2 ผลการทดลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมของข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากแต่ละผู้ผลิต โดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ด้วยขั้นตอนการคำนวณดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 และบทที่ 4 โดยจะทำการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตจำนวน 2 รายที่แตกต่างกัน คือ เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด และเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด

อย่างไรก็ตาม ผลจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมในหัวข้อนี้ จะถูกกล่าวถึงอีกครั้งในบทที่ 11 เมื่อมีการนำค่าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม PVSYST

### 10.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด

จากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 นั้น เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางมาผ่านการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด จะสามารถหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ  $(R_p, R_s, I_o, I_{ph})$  ได้ดังแสดงในตารางที่ 10.3

ตารางที่ 10.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT จากบริษัทเคียวเซร่า จำกัด

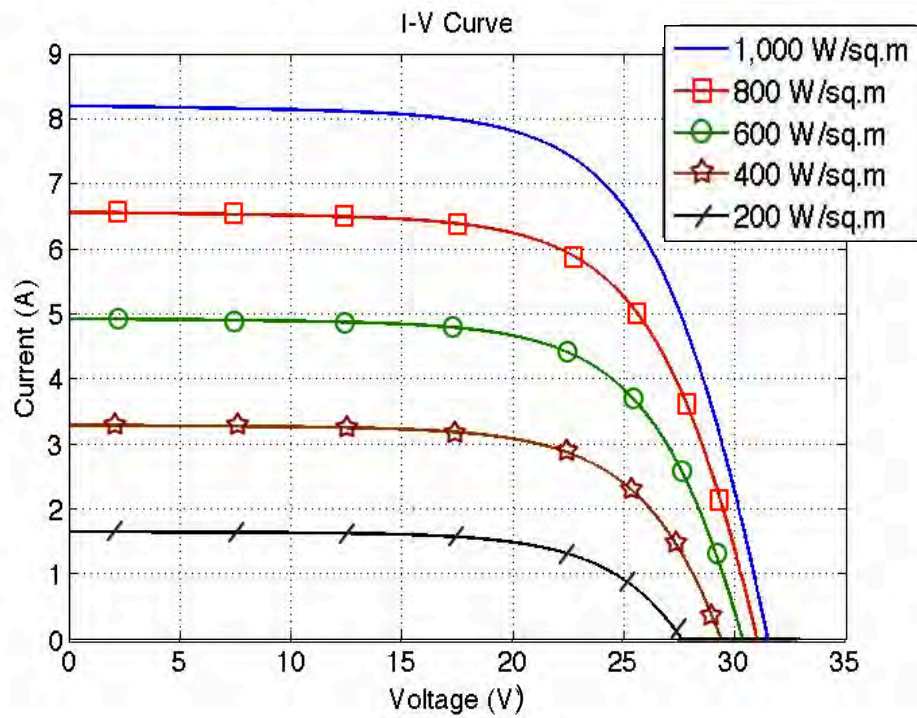
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	200.143 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	26.3 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.61 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.21 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.00318 (A/K)

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.123 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	54
ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ )	205.98 ( $\Omega$ )
ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ )	0.34 ( $\Omega$ )
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอดตัวที่ 1 ( $I_{o1}$ )	0.416 (nA)
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอดตัวที่ 2 ( $I_{o2}$ )	0.172 (mA)
ค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ )	8.21 (A)

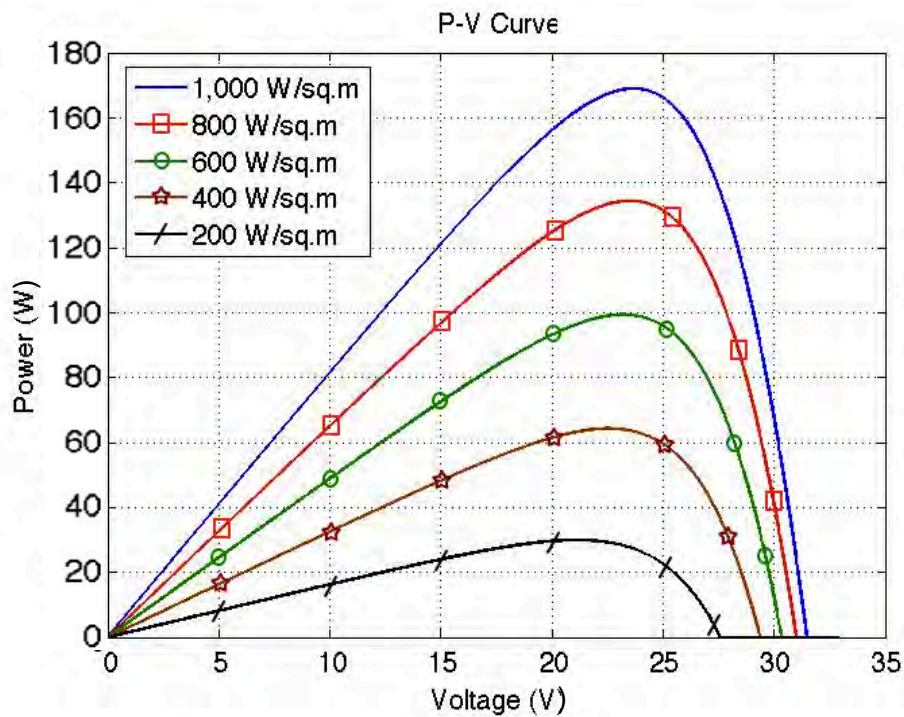
ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.2 ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักจำนวน 2 ปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยในส่วนถัดไปจะนำเสนอผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT

#### 10.2.1.1 ผลของความเข้มแสง

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.3 นั้น เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.9 และ 10.10 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของความเข้มแสงจำนวน 5 ระดับ คือ 1,000, 800, 600, 400 และ 200  $W/m^2$  ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่  $25^\circ C$



รูปที่ 10.9 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

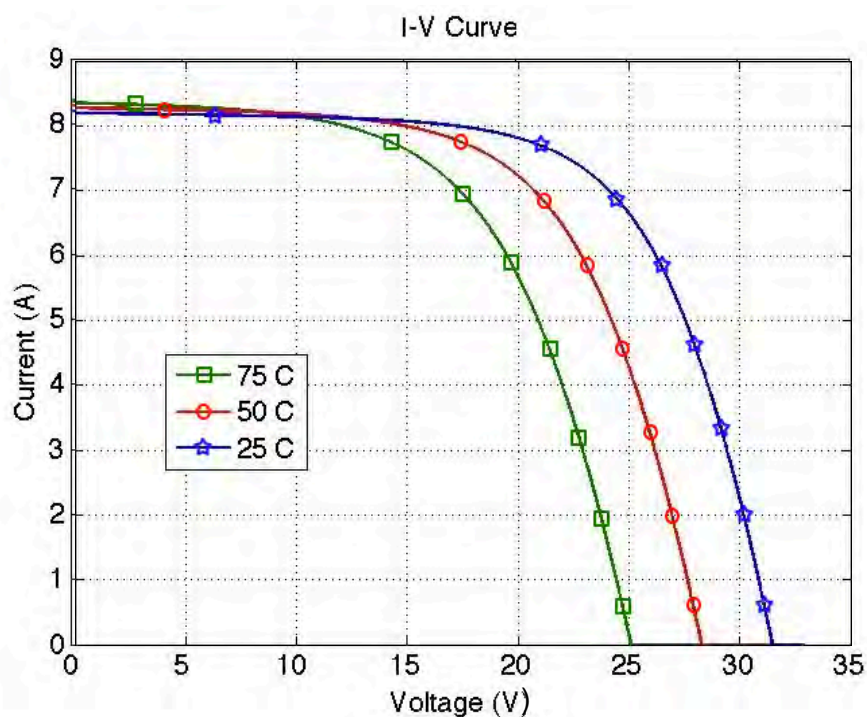


รูปที่ 10.10 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

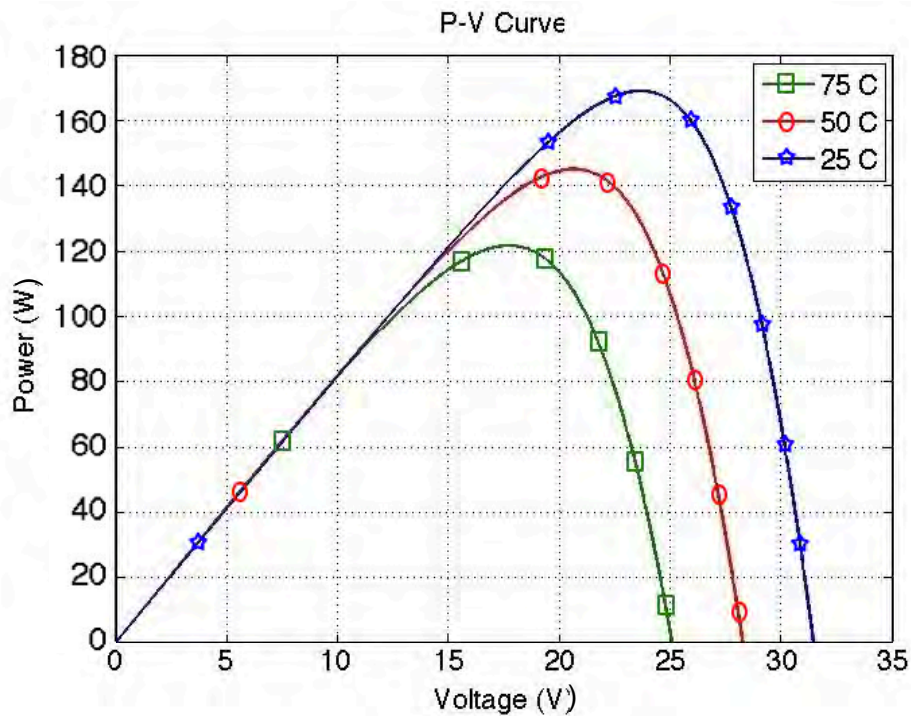


### 10.2.1.2 ผลของอุณหภูมิ

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.3 นั้นเมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.11 และ 10.12 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 ค่า คือ  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะความเข้มแสงคงที่  $1,000\text{ W/m}^2$



รูปที่ 10.11 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด



รูปที่ 10.12 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลรุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

### 10.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด

จากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 นั้น เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางมาผ่านการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด จะสามารถหาค่าของพารามิเตอร์เพิ่มเติม คือ ( $R_p$ ,  $R_s$ ,  $I_o$ ,  $I_{ph}$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 10.4

ตารางที่ 10.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 จากบริษัทโซลาร์ตรอนจำกัด

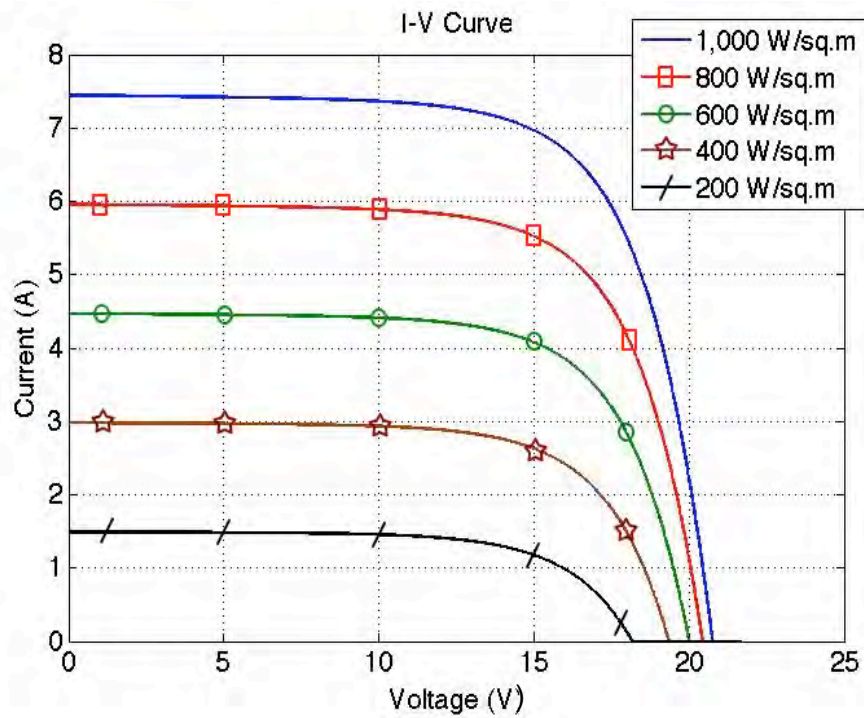
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
กำลังสูงสุดที่สามารถผลิตได้ ( $P_{MPP}$ )	130.13 (W)
แรงดันที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $V_{MPP}$ )	16.9 (V)
กระแสที่ผลิตได้เมื่อเกิดกำลังสูงสุด ( $I_{MPP}$ )	5.70 (A)
แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )	22.0 (V)

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	8.20 (A)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_i$ )	0.003 (A/K)
ค่าคงตัวของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน ( $K_v$ )	-0.074 (V/K)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล ( $N_s$ )	36
ค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ )	203.82 ( $\Omega$ )
ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ )	0.168 ( $\Omega$ )
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอดตัวที่ 1 ( $I_{o1}$ )	0.486 (nA)
ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอดตัวที่ 2 ( $I_{o2}$ )	0.175 (mA)
ค่ากระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ )	7.45 (A)

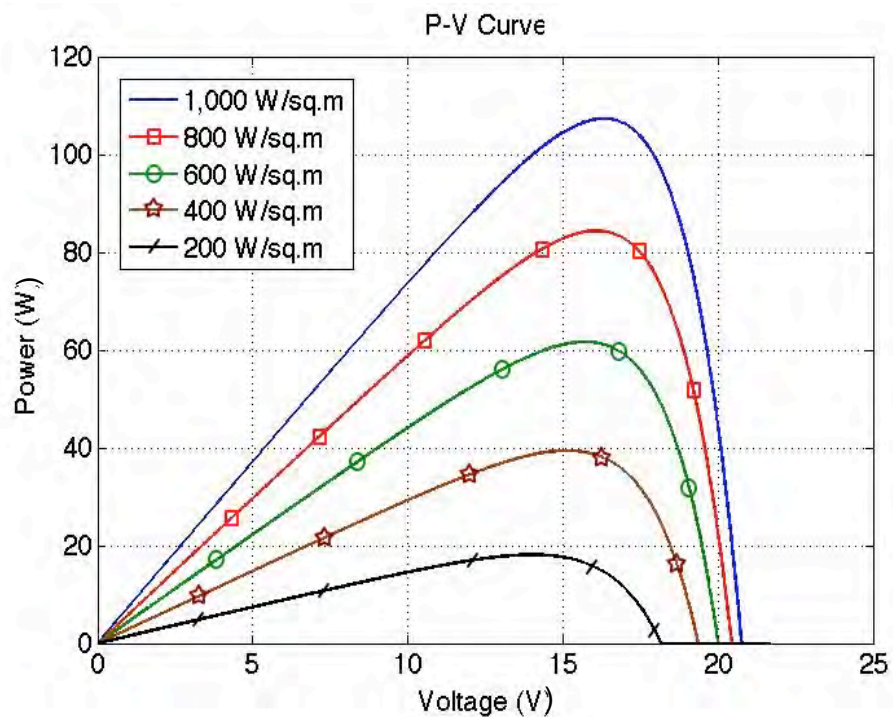
ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.2 ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักจำนวน 2 ปัจจัย คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยในส่วนถัดไปจะนำเสนอผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120

#### 10.2.2.1 ผลของความเข้มแสง

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.4 นั้น เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.13 และ 10.14 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของความเข้มแสงจำนวน 5 ระดับ คือ 1,000, 800, 600, 400 และ 200  $W/m^2$  ภายใต้สภาวะอุณหภูมิกึ่งที่  $25^\circ C$



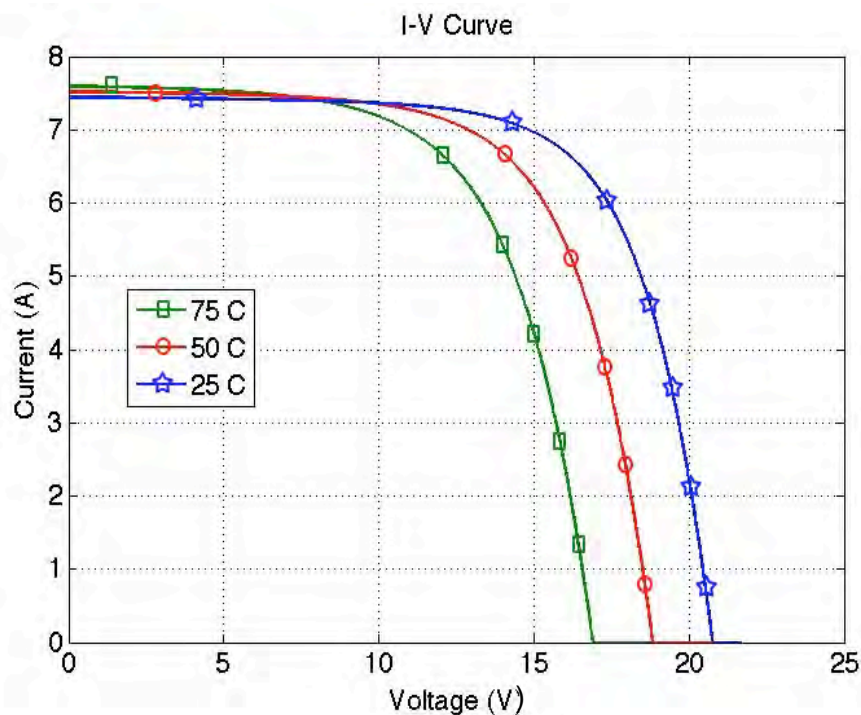
รูปที่ 10.13 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด



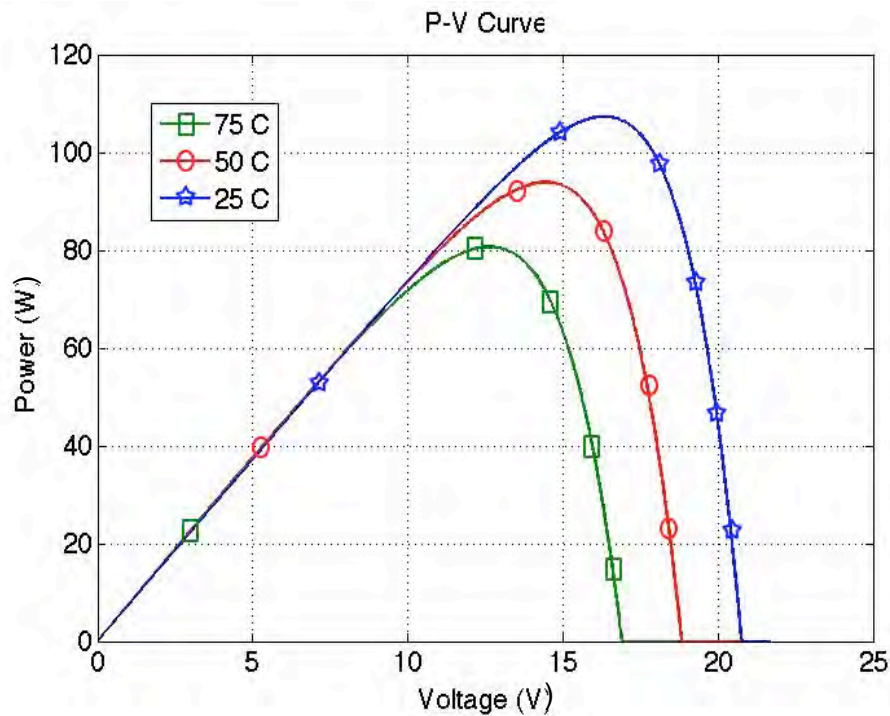
รูปที่ 10.14 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

### 10.2.2.2 ผลของอุณหภูมิ

จากค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดดังแสดงในตารางที่ 10.4 นั้นเมื่อนำมาคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.27) และ (4.28) จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันได้ ดังแสดงในรูปที่ 10.15 และ 10.16 ตามลำดับ โดยมีการแปรค่าของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 ค่า คือ  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะความเข้มแสงคงที่ที่  $1,000\text{ W/m}^2$



รูปที่ 10.15 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด



รูปที่ 10.16 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น SP120 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 10.1 ถึงรูปที่ 10.16 นั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้จุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อค่าของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันลดลง ซึ่งหมายถึงค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลง ทำให้จุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2

### 10.3 ผลการทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับในส่วนนี้ จะนำเสนอผลการทดลองแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดโดยใช้การจำลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120 เชื่อมต่อเป็นสตริงที่ประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 โมดูลที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม เมื่อเกิดการบังแสงแดดรูปแบบต่างๆกันภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition :STC) ดังนี้ คือ

- ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด
- ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยนิยามให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละสตริงที่มีลักษณะการบังแสงแดดเหมือนกัน เช่น จำนวนโมดูลที่ถูกบังแสงแดดมีจำนวนและร้อยละของการโดนบังแสงแดดเท่ากัน จัดเป็นการบังแสงแดดในกลุ่มเดียวกันดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1 และตำแหน่งของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดในสตริงไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลของการบังแสงแดด ดังนั้นสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดจึงหมายถึงเกิดกลุ่มของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดเพียงหนึ่งกลุ่ม

### 10.3.1 ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดด

สำหรับผลการทดลอง ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้น จะทำการแบ่งย่อยออกเป็น 6 กรณีศึกษาดังนี้ คือ

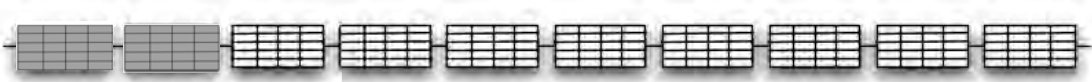
- **กรณีศึกษาที่ 1** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%
- **กรณีศึกษาที่ 2** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%
- **กรณีศึกษาที่ 3** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%
- **กรณีศึกษาที่ 4** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 35%
- **กรณีศึกษาที่ 5** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 50%
- **กรณีศึกษาที่ 6** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 70%

โดยกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 3 จะเป็นกรณีศึกษาจำนวนของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดต่อผลของการทำงานของสตริงเซลล์แสงอาทิตย์และในกรณีศึกษาที่ 4

ถึงกรณีศึกษาที่ 6 จะเป็นกรณีศึกษาปริมาณร้อยละของการโดนบังแสงแดดต่อผลการ  
ทำงานของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์

**กรณีศึกษาที่ 1 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2  
โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%

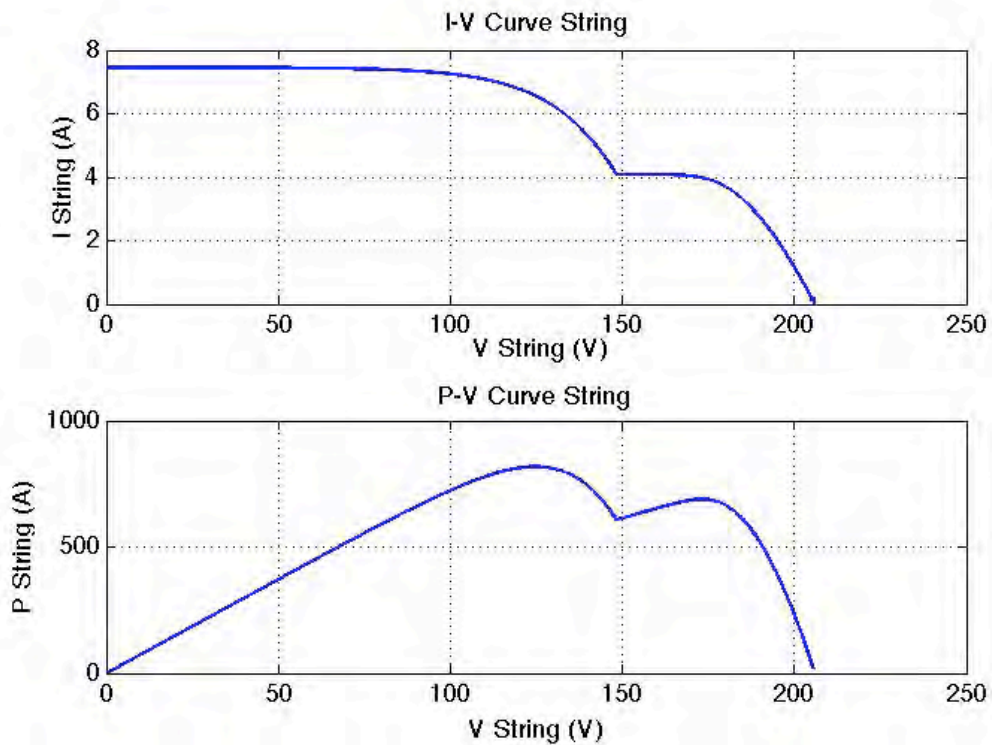
สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 โมดูลนี้ จะมี  
ลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.17



รูปที่ 10.17 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน  
2 โมดูล

จากรูปที่ 10.17 จะพบว่าจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{shaded}$ ) มีจำนวน  
2 โมดูล และจำนวนโมดูลที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{unshaded}$ ) มีจำนวน 8 โมดูล จาก  
นั้นทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำ  
เสนอนิบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมา  
ดังรูปที่ 10.18





รูปที่ 10.18 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 โมดูล

จากรูปที่ 10.18 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 817.75 W และ 652.58 W โดยจุดยอดจุดแรกจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด และจุดยอดจุดที่สองจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด และดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 6 จะเห็นได้ว่าจุดยอดด้านซ้ายมือจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าจุดยอดด้านขวามือ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงควรมีกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่เกิดการบังแสงแดดได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้จุดทำงานที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างแท้จริง

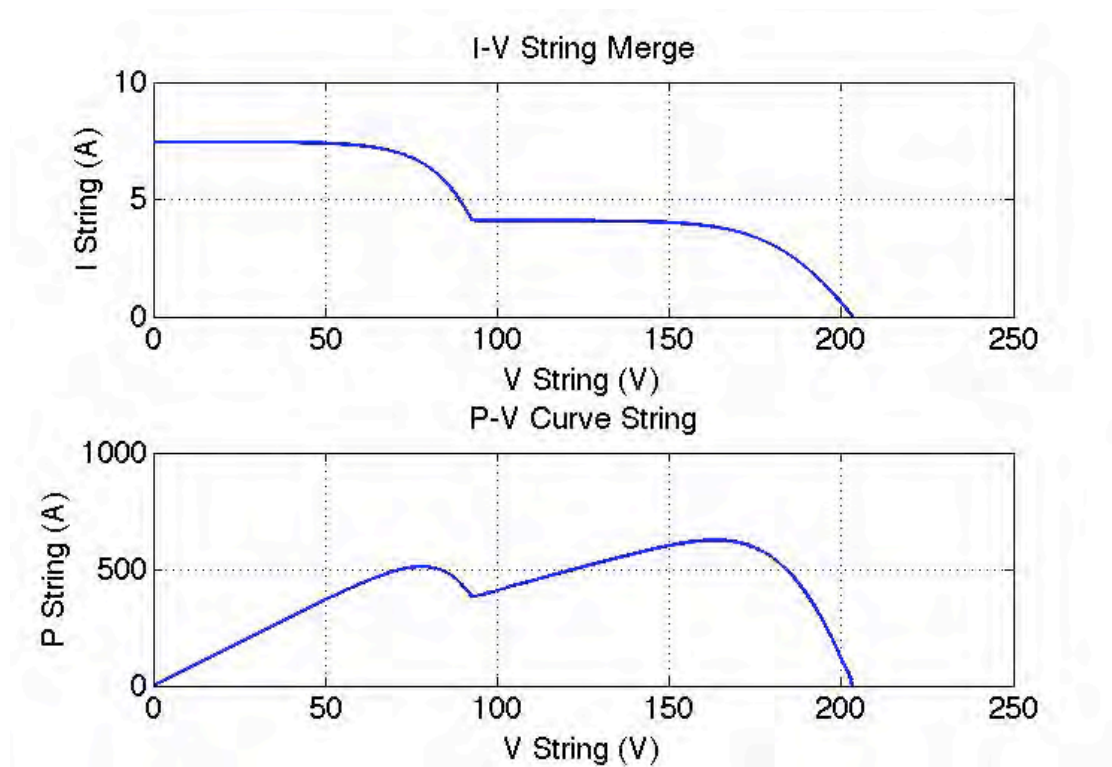
**กรณีศึกษาที่ 2 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูลนี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.19



รูปที่ 10.19 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล

จากรูปที่ 10.19 จะพบว่าจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{shaded}$ ) มีจำนวน 5 โมดูล และจำนวนโมดูลที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{unshaded}$ ) มีจำนวน 5 โมดูล จากนั้นทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมา ดังรูปที่ 10.20



รูปที่ 10.20 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล

จากรูปที่ 10.20 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 511.09 W และ 612.29 W โดยจุดยอด

จุดแรกจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด และจุดยอดจุดที่สองจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด จะเห็นได้ว่าจุดยอดด้านซ้ายมือจะมีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำกว่าจุดยอดด้านขวามือ ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีศึกษาที่ 1 ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงควรมีกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่เกิดการบังแสงแดดได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้จุดทำงานที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างแท้จริง ไม่ว่าจะจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเป็นจุดยอดใดก็ตาม

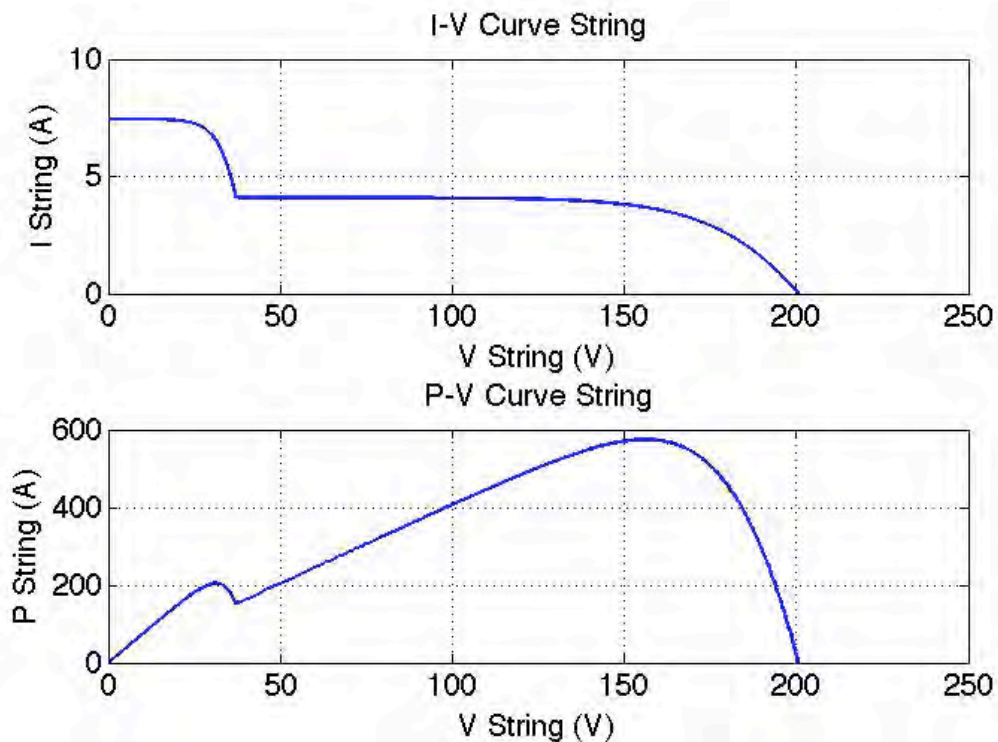
**กรณีศึกษาที่ 3 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 โมดูลนี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.21



รูปที่ 10.21 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 โมดูล

จากรูปที่ 10.21 จะพบว่าจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{shaded}$ ) มีจำนวน 8 โมดูล และจำนวนโมดูลที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{unshaded}$ ) มีจำนวน 2 โมดูล จากนั้นทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาดังรูปที่ 10.22



รูปที่ 10.22 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 โมดูล

จากรูปที่ 10.20 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 204.43 W และ 571.53 W โดยจุดยอดจุดแรกจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เกิดการบังแสงแดด และจุดยอดจุดที่สองจะเกิดจากกลุ่มของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด จะเห็นได้ว่าจุดยอดด้านซ้ายมือจะมีค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าจุดยอดด้านขวามือ ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีศึกษาที่ 1 และมีลักษณะเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงควรมีกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่เกิดการบังแสงแดดได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้จุดทำงานที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอย่างแท้จริง ไม่ว่าจะจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเป็นจุดยอดใดก็ตาม

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าในขณะที่เกิดการบังแสงแดดว่า จุดทำงานกำลังสูงสุดหรือจุดยอดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะมีจุดยอดมากกว่าหนึ่งจุด เนื่องมาจากโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่โดนบังแสงแดดจะมีกำลังในการผลิตลดลง โดยส่วนใหญ่แล้วจุดยอดหรือจุดทำงานกำลังสูงสุดแต่ละจุดนี้ จะเป็นจุดทำงานที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน จากกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 3 จะพบว่าเมื่อจำนวน

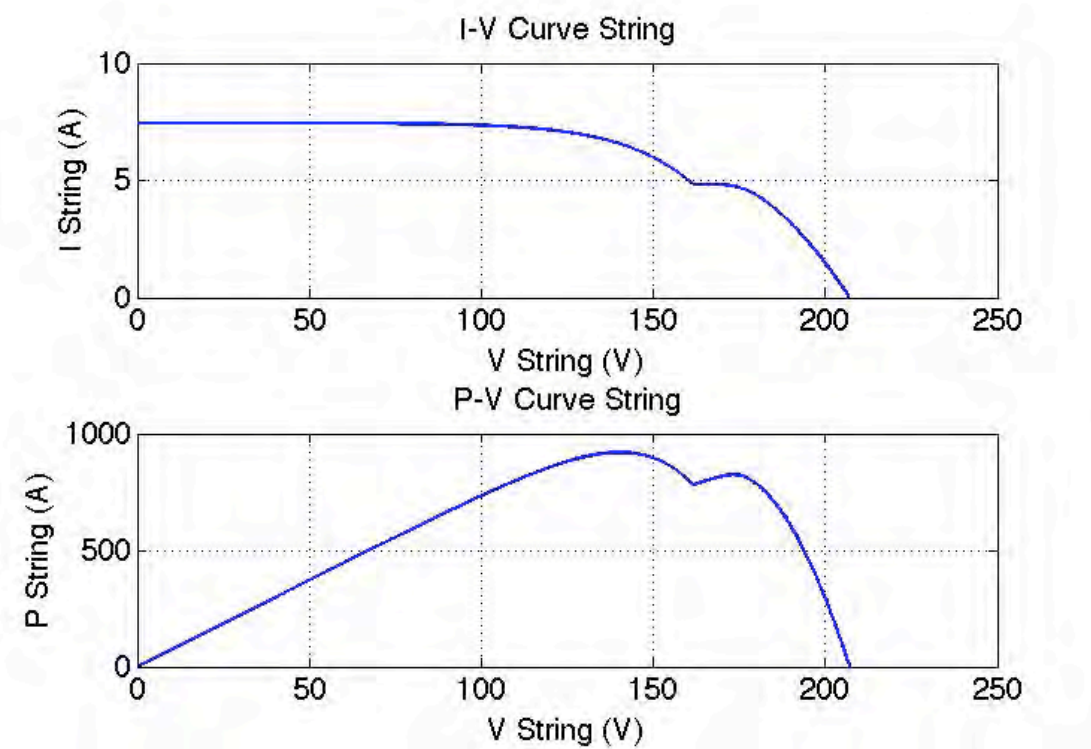
โมดูลที่ถูกบังแสงแดดในหนึ่งสตริงเพิ่มขึ้น จะทำให้จุดทำงานกำลังสูงสุดที่มีค่าน้อยกว่าจะเป็นจุดทำงานที่มีค่าแรงดันลดลง กล่าวคือเมื่อจำนวนของโมดูลที่ถูกบังแสงแดดมีมากขึ้น จุดยอดกำลังสูงสุดที่มีค่าต่ำกว่าจะเลื่อนไปทางด้านซ้าย เนื่องจากพื้นที่ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโมดูลที่ถูกบังแสงแดดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะแรงดันของโมดูลที่ถูกบังแสงแดดมีค่ามากขึ้น

อย่างไรก็ตาม อินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้วิธีการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) ด้วยกระบวนการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบจุดทำงานในปัจจุบันกับจุดทำงานถัดไปว่าจุดทำงานใดให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากกว่ากันและเลื่อนจุดทำงานไปยังจุดนั้น แต่หากเกิดการบังแสงแดดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งผลให้เกิดจุดยอดของกำลังสูงสุดมีมากกว่าหนึ่งจุด กระบวนการรบกวนและสังเกตนี้จะทำได้เพียงแค่ปรับจุดทำงานไปยังจุดทำงานกำลังสูงสุดที่ใกล้กับจุดทำงานเดิมมากที่สุด ไม่ว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดที่อยู่ใกล้ที่สุดนั้นจะเป็นจุดทำงานที่ให้ค่ากำลังสูงกว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดอีกจุดหนึ่งหรือไม่ก็ตาม ทำให้ภายใต้สภาวะการบังแสงแดดนั้นมีโอกาสที่สตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำงาน ณ จุดทำงานกำลังสูงสุดอย่างแท้จริง ส่งผลให้กำลังการผลิตลดลงกว่าที่ควร จึงต้องมีการพัฒนาหาค่าของการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดที่เหมาะสมต่อไป

กำหนดให้กรณีศึกษาที่ 4 ถึงกรณีศึกษาที่ 6 มีร้อยละของการโดนบังแสงแดดที่แตกต่างกันตามแต่ละกรณี แต่มีจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดเท่ากัน คือ 5 โมดูล กล่าวคือมีจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{shaded}$ ) มีจำนวน 5 โมดูลและจำนวนโมดูลที่ไม่เกิดการบังแสงแดด ( $N_{unshaded}$ ) มีจำนวน 5 โมดูล

**กรณีศึกษาที่ 4 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 35%

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 35% นี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.19 เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 และทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาดังรูปที่ 10.23

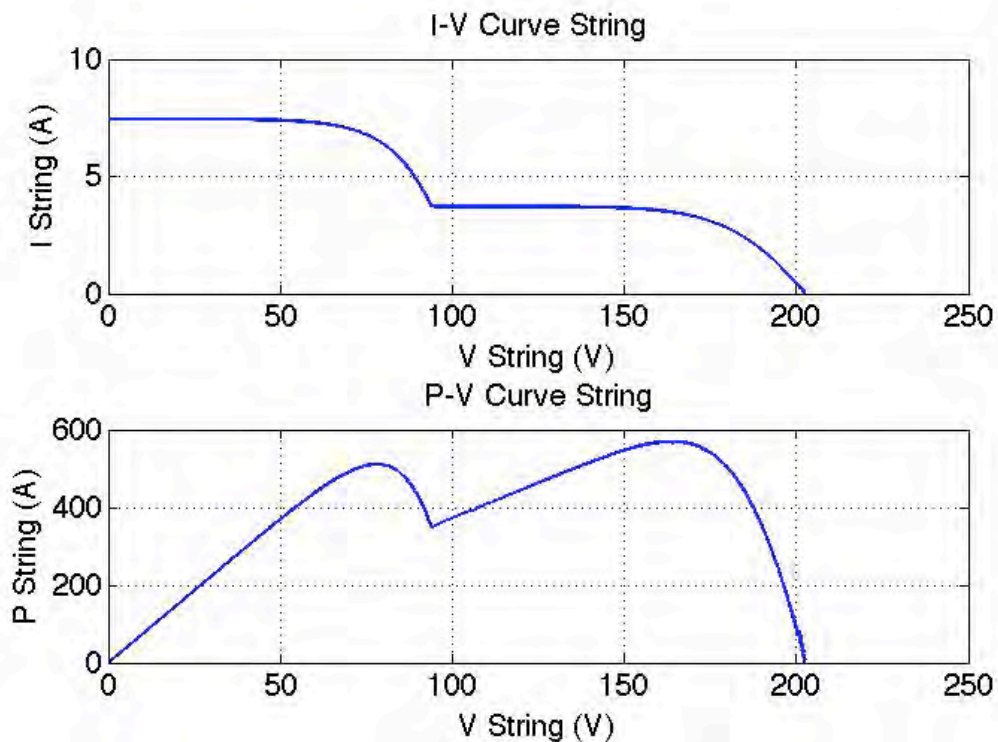


รูปที่ 10.23 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 35%

จากรูปที่ 10.23 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 919.97 W และ 770.79 W ซึ่งมีค่าแตกต่างจากกรณีที่ไม่เกิดการบังแสงแดดเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5 และกรณีศึกษาที่ 6 ดังจะนำเสนอในลำดับถัดไป

**กรณีศึกษาที่ 5 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 50%

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 50% นี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.19 เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 4 และทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาดังรูปที่ 10.24

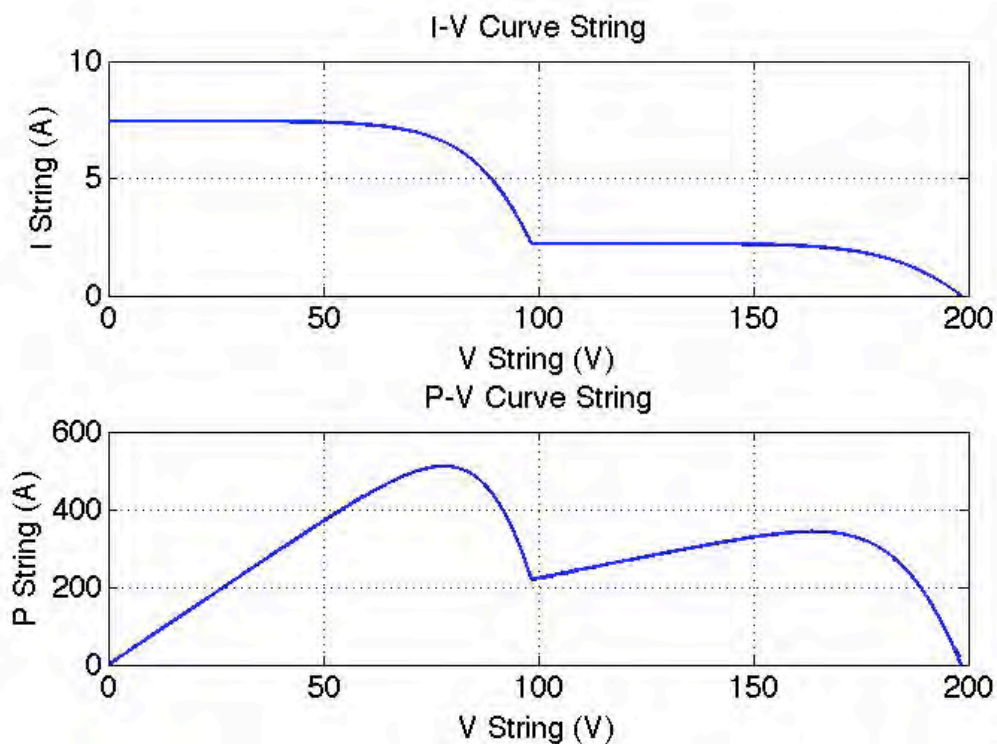


รูปที่ 10.24 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 50%

จากรูปที่ 10.24 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 511.09 W และ 558.11 W ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 4 มากถึงประมาณ 28% และมีค่าต่ำกว่ากรณีปกติที่ไม่เกิดการบังแสงแดดถึงประมาณ 50%

**กรณีศึกษาที่ 6 :** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล ร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 70%

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 70% นี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.19 เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 กรณีศึกษาที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 5 เมื่อทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาดังรูปที่ 10.25



รูปที่ 10.25 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของสตริงที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 5 โมดูล และร้อยละของการโดนบังแสงแดดเป็น 70%

จากรูปที่ 10.25 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 511.09 W และ 333.89 W ซึ่งมีค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดใกล้เคียงกับในกรณีศึกษาที่ 5 คือ 511.09 W

อย่างไรก็ตาม จากกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 6 จะสามารถสรุปผลของการทดลองการบังแสงแดดในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 10.5



ตารางที่ 10.5 ผลการทดลองการบังแสงแดดในกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 6 ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC)

กรณีศึกษา	ร้อยละของการบังแสงแดด	จำนวนโมดูลที่ถูกบังแสงแดด	จุดยอดกำลังสูงสุด		ร้อยละของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เกิดการบังแสงแดด
			จุดยอดที่ 1	จุดยอดที่ 2	
1	45%	2	817.75 W	652.58 W	19.998%
2	45%	5	511.09 W	612.29 W	40.122%
3	45%	8	204.43 W	571.53 W	44.078%
4	35%	5	511.09 W	717.72 W	29.811%
5	50%	5	511.09 W	558.11 W	45.401%
6	70%	5	511.09 W	333.89 W	49.995%

จากตารางที่ 10.5 จะพบว่า ในกรณีศึกษาที่ 1 ถึงกรณีศึกษาที่ 3 เมื่อจำนวนโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดมีจำนวนเพิ่มขึ้น ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าลดลง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองจุดมีค่าลดลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่าร้อยละของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เกิดการบังแสงแดดมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 ถึงกรณีศึกษาที่ 6 จะพบว่าเมื่อจำนวนของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดมีจำนวนคงที่ และร้อยละของการโดนบังแสงแดดมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าลดลง โดยค่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองจุดจะมีค่าลดลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่าร้อยละของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เกิดการบังแสงแดดมีค่าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 5 จะพบว่าในกรณีศึกษาที่ 5 นั้นมีร้อยละของการบังแสงแดดมากกว่ากรณีศึกษาที่ 3 เพียง 5% ซึ่งถ้าพิจารณาในแง่ของความเข้มแสงรวมทั้งที่ตรงได้รับจะพบว่าสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 จะได้รับค่าความเข้มแสงรวมทั้งที่ตรงเป็น  $6,400 \text{ W/m}^2$  และสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 จะได้รับค่าความเข้มแสงรวมทั้งที่ตรงเป็น  $7,500 \text{ W/m}^2$  แต่จุดทำงานกำลังสูงสุดซึ่งคือจุดยอดที่ 2 ในทั้งสองกรณีศึกษานั้น จะพบว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดของกรณีศึกษาที่ 3

กลับมีค่ามากกว่าจุดทำงานกำลังสูงสุดของกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในการพิจารณาผลของการบังแสงแดดโดยแบ่งโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งสตริง ออกเป็นส่วนที่โดนบังแสงแดดและไม่โดนบังแสงแดดนั้น เนื่องจากทุกโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในสตริงเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นเมื่อค่าความเข้มแสงลดลงเนื่องจากเกิดการบังแสงแดดในอัตราส่วนที่มากขึ้นนั้น จะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรของทุกๆ โมดูลในกลุ่มของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการเพิ่มจำนวนของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดนั้น จะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรแค่เพียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดเพิ่มขึ้นมีค่าน้อยลงเท่านั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการลดลงของความเข้มแสงเนื่องจากการบังแสงแดดจะส่งผลต่อกำลังการผลิตของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าจำนวนของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดนั่นเอง

### 10.3.2 ผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

สำหรับผลการทดลองผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดนั้น จะทำการแบ่งย่อยออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ

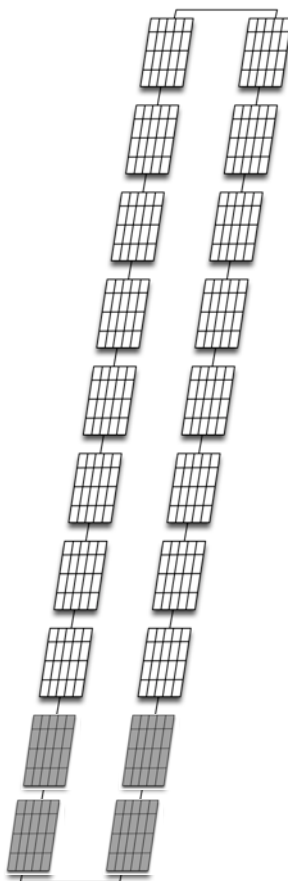
- **กรณีศึกษาที่ 7** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 กลุ่ม
- **กรณีศึกษาที่ 8** กรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 กลุ่ม

โดยจะเป็นกรณีศึกษาที่พิจารณาจำนวนของกลุ่มของโมดูลที่เกิดการบังแสงแดดต่อผลของการทำงานของอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ กรณีที่เกิดผลการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 กลุ่มและกรณีที่เกิดผลการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 กลุ่ม

**กรณีศึกษาที่ 7** : กรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 กลุ่ม

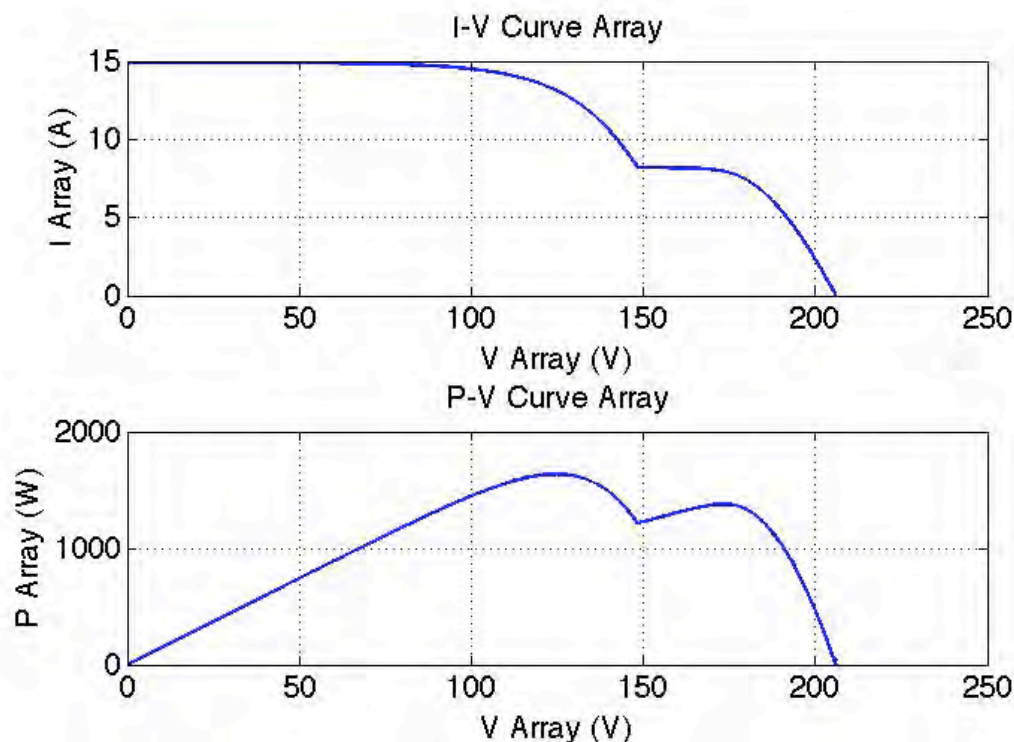
สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 กลุ่มนี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.26 โดยจะมีลักษณะเป็นอาเรย์ที่ประกอบด้วยสตริงจำนวน 2 สตริงเชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยในแต่ละสตริงประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 โมดูล และเกิดการบังแสงแดดจำนวน 2 โมดูลในแต่ละสตริง

ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC) และกำหนดให้โมดูลที่เกิดการบังแสงแดดมีค่าร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45%



รูปที่ 10.26 ลักษณะของอาเรย์ในกรณีศึกษาที่ 7

จากลักษณะของอาเรย์ของกรณีศึกษาที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 10.26 นั้น เมื่อทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาดังรูปที่ 10.27

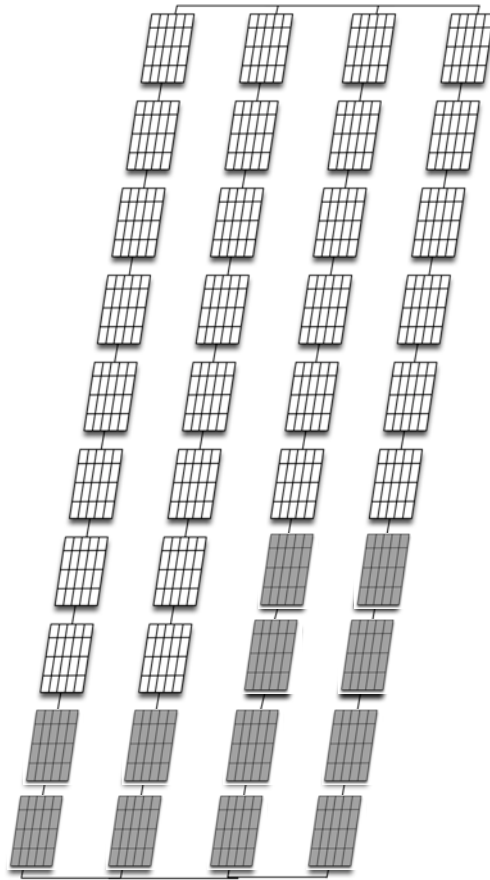


รูปที่ 10.27 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของอาเรย์ที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 กลุ่ม

จากรูปที่ 10.27 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสองยอด คือ 1,635.5 W และ 1,416.79 W

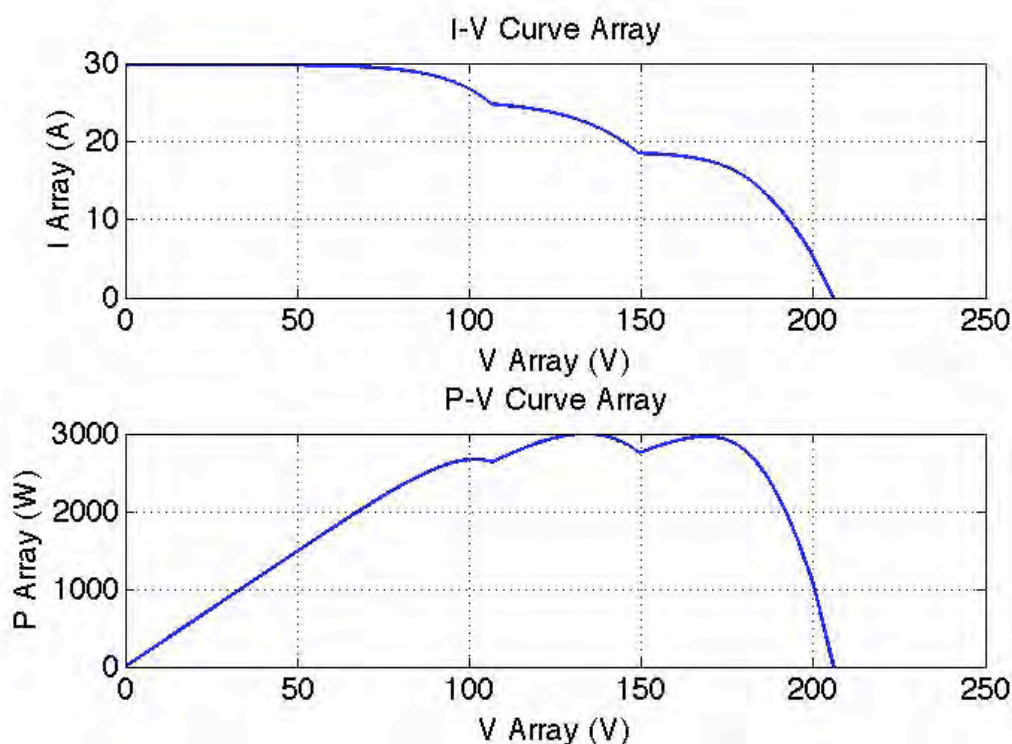
**กรณีศึกษาที่ 8** : กรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 กลุ่ม

สำหรับกรณีที่เกิดการบังแสงแดดในอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 กลุ่มนี้ จะมีลักษณะของสตริงดังแสดงในรูปที่ 10.28 โดยจะมีลักษณะเป็นอาเรย์ที่ประกอบด้วยสตริงจำนวน 4 สตริงเชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยในแต่ละสตริงประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 โมดูล โดยเกิดการบังแสงแดดจำนวน 2 โมดูลในสตริงเส้นที่ 1 และ 2 (กลุ่มที่หนึ่งของการบังแสงแดด) ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC) และเกิดการบังแสงแดดจำนวน 4 โมดูลในสตริงเส้นที่ 3 และ 4 (กลุ่มที่สองของการบังแสงแดด) กำหนดให้โมดูลที่เกิดการบังแสงแดดมีค่าร้อยละของการบังแสงแดดเป็น 45% และ 30% ตามลำดับ



รูปที่ 10.28 ลักษณะของอาเรย์ในกรณีศึกษาที่ 8

จากลักษณะของอาเรย์ของกรณีศึกษาที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 10.28 นั้น เมื่อทำการคำนวณหาค่าของจุดทำงานของอาเรย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 6 จะทำให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะของสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมา ดังรูปที่ 10.29



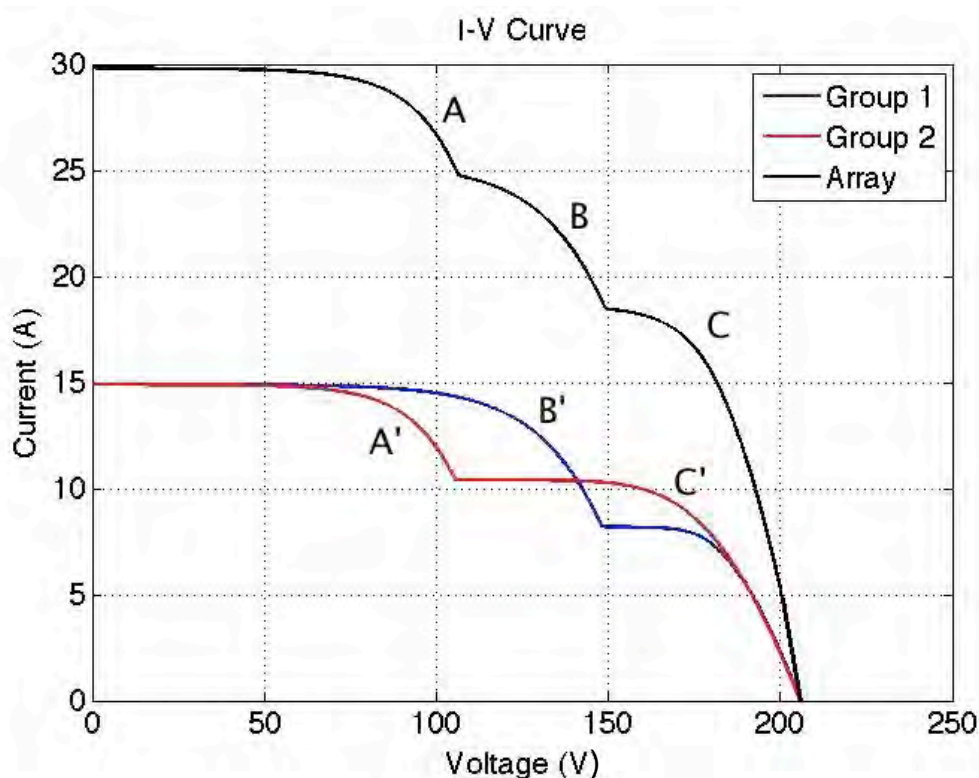
รูปที่ 10.29 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) ของอาเรียที่เกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 กลุ่ม

จากรูปที่ 10.29 จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงดันจะเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวนสามยอด คือ 2,667 W 2,998 W และ 2,958 W ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีกลุ่มของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดจำนวนจำนวน 2 กลุ่มมาทำการเชื่อมต่อกันแบบขนาน ทำให้เกิดการซ้อนทับกันของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มของโมดูลแสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดทั้งสองกลุ่ม

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดทั้งสองกลุ่มนั้น มีรูปแบบของการบังแสงแดดที่แตกต่างกัน ทั้งจำนวนของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด และร้อยละของการบังแสงแดด ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของทั้งสองกลุ่มนั้นจะมีลักษณะและจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาเชื่อมต่อกันแบบขนานจะทำให้กระแสรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งอาเรียเกิดจากผลรวมของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดทั้งสองกลุ่มรวมกันดังแสดงในรูปที่ 10.30

หากพิจารณาในแง่ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะพบว่าค่าของกระแสที่จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองจุดของกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิด

การบังแสงแดดกลุ่มหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเกิดเป็นค่ากระแสที่จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ดังเช่นจุด A ซึ่งเกิดจากค่าของกระแสบริเวณ A' ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดกลุ่มที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดกลุ่มที่ 1 และจุด C ซึ่งเกิดจากค่าของกระแสบริเวณ C' ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดกลุ่มที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดกลุ่มที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 10.30 และค่าของกระแสที่จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดอีกกลุ่มหนึ่งที่มีค่าแรงดันอยู่ระหว่างค่าของแรงดัน ณ จุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสองของกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดดกลุ่มแรก ดังเช่นจุด B ในรูปที่ 10.30 จะกลายเป็นจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจุดที่สามของทั้งอาเรย์



รูปที่ 10.30 การเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสามจุด เมื่อเกิดการบังแสงแดดในกรณีศึกษาที่ 8

#### 10.4 ผลการทดลองผลกระทบของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับในส่วนนี้จะนำเสนอผลการทดลองผลกระทบของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรูปแบบการทดลองประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่ง

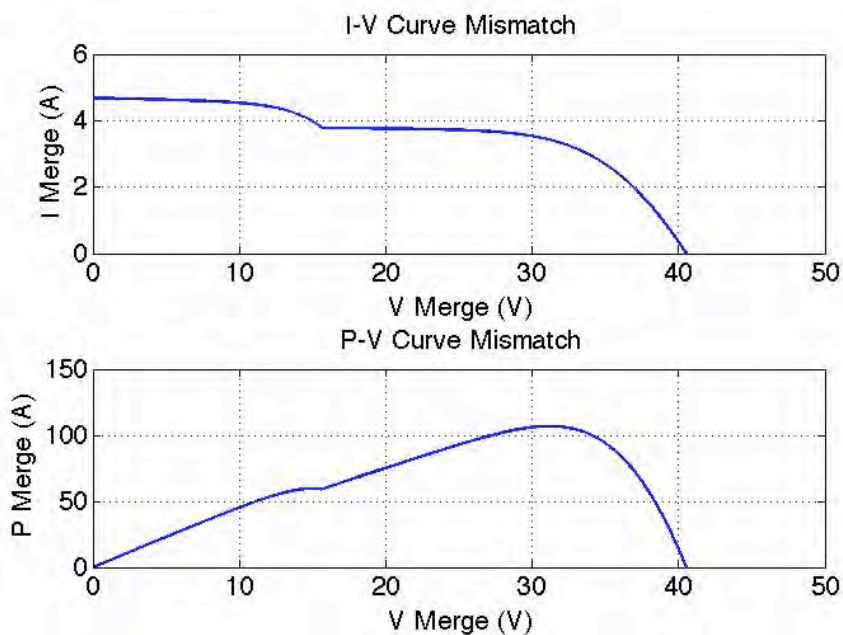
โมดูลต่อเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งรุ่นทำการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและเชื่อมต่อแบบขนาน และแบ่งเป็นกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกัน คือ มีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุด ( $P_{mpp}$ ) มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 20% และกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกัน คือ มีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุด ( $P_{mpp}$ ) มีค่าแตกต่างกันเกิน 20%

สำหรับกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกันนั้น จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เซลล์ จำกัด รุ่น SP70 ซึ่งมี มีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุดเป็น 70 W และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท บีพี โซลาร์ จำกัดรุ่น BP-MSX60 ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุดเป็น 60 W และสำหรับกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกันนั้น จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัดรุ่น SP120 ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุดเป็น 120 W และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัดรุ่น KC200GT ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุดเป็น 200 W

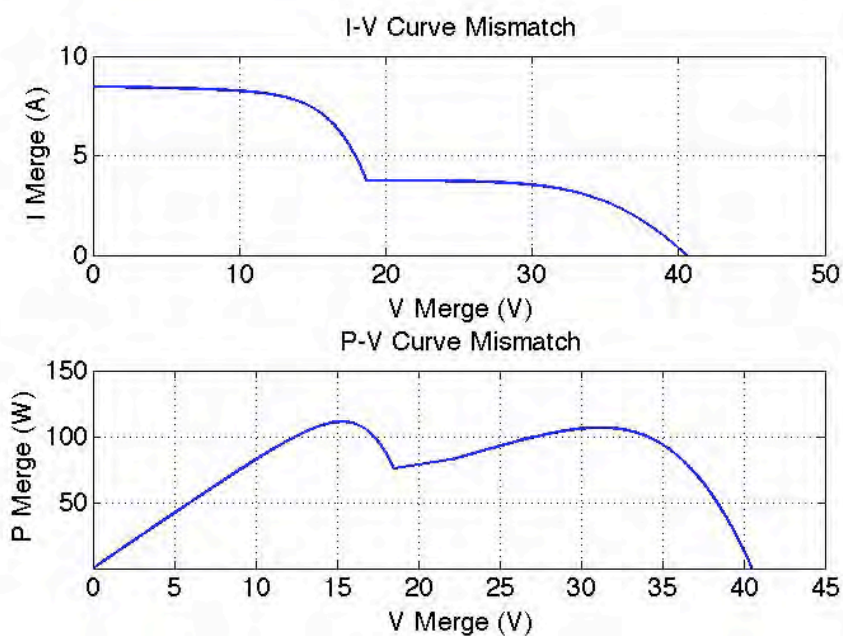
#### 10.4.1 กรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกัน

สำหรับกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกันนี้ สามารถแสดงผลของกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของกรณีที่โมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมได้ในรูปที่ 10.31 และสามารถแสดงผลของกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของกรณีที่โมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนานได้ในรูปที่ 10.32





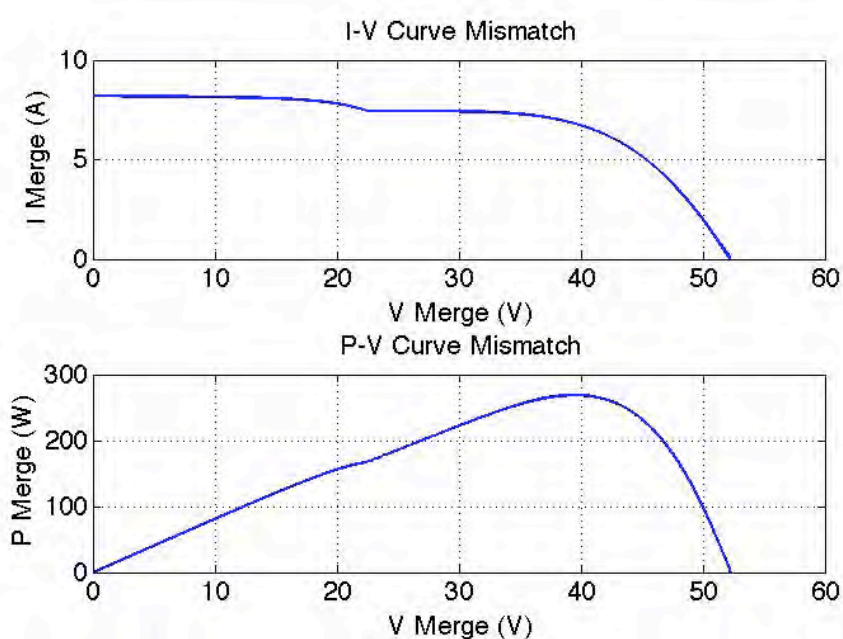
รูปที่ 10.31 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีการเชื่อมต่ออนุกรม



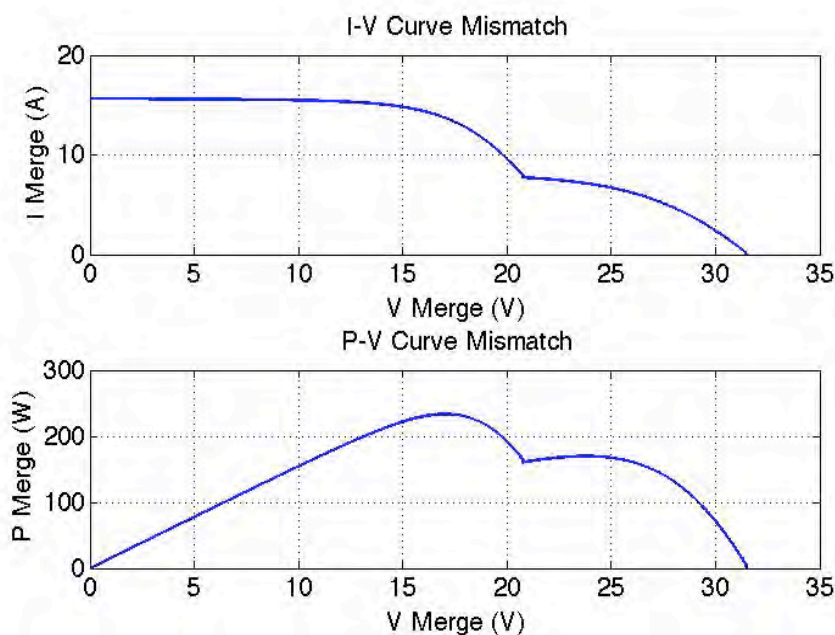
รูปที่ 10.32 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีการเชื่อมต่อขนาน

#### 10.4.2 กรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกัน

สำหรับกรณีที่เกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกันนี้ สามารถแสดงผลของกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของกรณีที่โมดูลมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมได้ในรูปที่ 10.33 และสามารถแสดงผลของกราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กำลังไฟฟ้าและแรงดัน ของกรณีที่โมดูลมีการเชื่อมต่อแบบขนานได้ในรูปที่ 10.34



รูปที่ 10.33 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันโดยมีการเชื่อมต่ออนุกรม



รูปที่ 10.34 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน (บน) และกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (ล่าง) เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันโดยมีการเชื่อมต่อขนาน

จากรูปที่ 10.29 ถึงรูปที่ 10.33 จะสามารถสรุปรายละเอียดของผลการทดลองเรื่องผลของความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังตารางที่ 10.6

ตารางที่ 10.6 ผลการทดลองเรื่องความแตกต่างของแผงต่อเซลล์แสงอาทิตย์

รูปแบบการเชื่อมต่อ	กรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใกล้เคียงกัน		กรณีแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดแตกต่างกัน	
	กำลังไฟฟ้านจุดทำงานกำลังสูงสุด	ร้อยละของการสูญเสียกำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้านจุดทำงานกำลังสูงสุด	ร้อยละของการสูญเสียกำลังไฟฟ้า
กรณีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม	106.69 W	24.84%	268.68 W	32.83%
กรณีการเชื่อมต่อแบบขนาน	111.14 W	20.61%	233.20 W	30.97%

จากตารางที่ 10.6 จะพบว่าเมื่อเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้น ผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าลดลง หรือมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณลักษณะเหมือนกันมาเชื่อมต่อกัน โดยผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์หรือค่าของกระแสลัดวงจรเป็นหลัก หากค่าของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกันมาก จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่ากรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ากำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานกำลังสูงสุดใกล้เคียงกัน และทำให้จุดยอดกำลังสูงสุดในแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันมากด้วย นอกจากนี้รูปแบบการเชื่อมต่อแบบอนุกรมก็จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากกว่าการเชื่อมต่อแบบขนาน

### 10.5 ผลการทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 5 โดยใช้แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งแบ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนอินเวอร์เตอร์ และส่วนไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับแบบจำลองส่วนไฟฟ้ากระแสตรงของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในที่นี้จะใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด เป็นแบบจำลองส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120 พิจารณาภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) ซึ่งมีพารามิเตอร์พื้นฐานดังแสดงไว้ในตารางที่ 10.4 และมีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรายละเอียดของอาร์เรย์ดังนี้ คือ จำนวนของโมดูลในแต่ละสตริงมีการต่ออนุกรมกันจำนวน 50 โมดูลและมีการเชื่อมต่อแต่ละสตริงในรูปแบบขนานจำนวน 150 สตริง รวมทั้งสิ้น 7,500 โมดูลในหนึ่งอาร์เรย์ เพื่อให้เกิดกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 0.76 MW ซึ่งมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการใช้พลังงานของกำลังไฟฟ้าในระบบทดสอบ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้มีประสิทธิภาพการทำงานเป็น 96 % และมีพิกัด 1 MVA

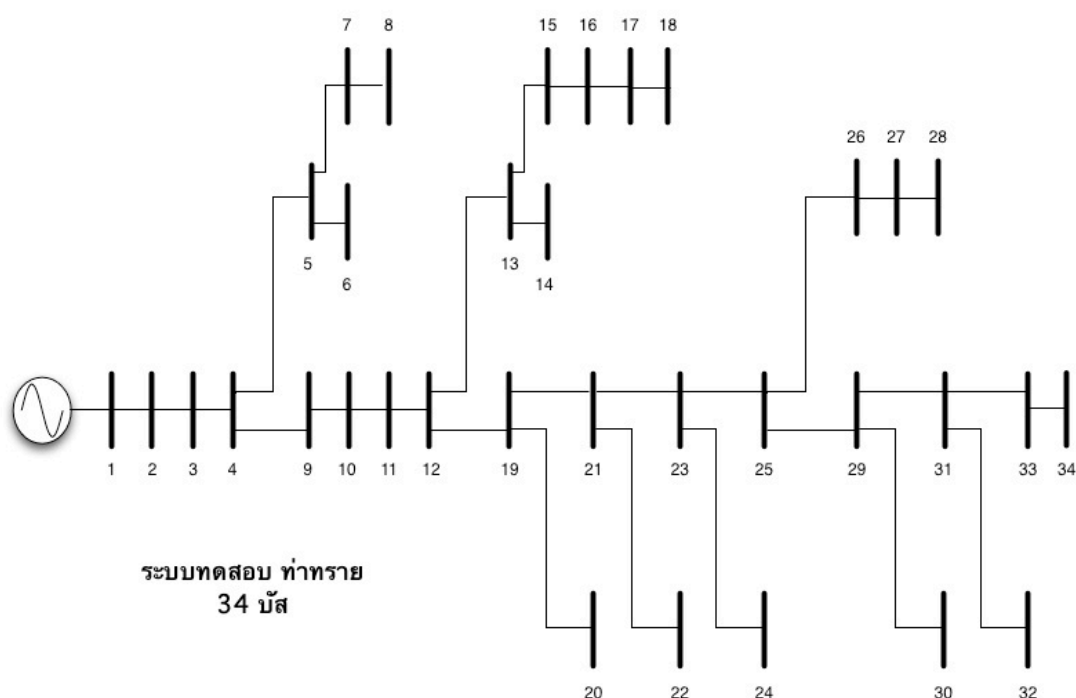
วงจรกรอง (ฟิลเตอร์) ที่ใช้มีรายละเอียดของพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลหนึ่งเฟสดังนี้ คือ

- ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $L_f$ ) มีค่าความเหนี่ยวนำ 250  $\mu\text{H}$
- ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $C_f$ ) มีค่าตัวเก็บประจุ 450  $\mu\text{F}$

หม้อแปลงไฟฟ้ามีพิกัด 1 MVA มีรายละเอียดของพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลหนึ่งเฟสดังนี้ คือ [26]

- ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลง ( $R_T$ ) มีค่า 0.00321  $\Omega$
- รีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลง ( $X_T$ ) มีค่า 0.01023  $\Omega$
- ความนำไฟฟ้าสมมูลของหม้อแปลง ( $G_T$ ) มีค่า 0.01524 S
- ซัสเซปแตนซ์สมมูลของหม้อแปลง ( $B_T$ ) มีค่า 0.05194 S

โดยแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้ จะเชื่อมต่อกับระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส ซึ่งประกอบด้วยสายจำหน่ายไฟฟ้าจำนวน 33 เส้น และความต้องการไฟฟ้ารวมประมาณ 9.1 MW, 5.5 MVAr โดยมีสถานีไฟฟ้าต้นทางติดตั้งอยู่ ณ บัสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 10.35



รูปที่ 10.35 ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส

โดยการวิเคราะห์โหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 โหมดดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 และแบ่งกรณีศึกษาและการวิเคราะห์ออกเป็น 14 กรณี

ศึกษา ตามแต่บัสที่ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 10.7

สำหรับส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรงกำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC) และในแต่ละกรณีมีพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ตลอดการทดลองเหมือนกันดังนี้ คือ

$$P_{pv} = 757,751.688 \text{ W และ } V_{pv} = 777.83 \text{ V}$$

ตารางที่ 10.7 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส ณ ตำแหน่งต่างๆ

บัส ที่ทำการ ติดตั้ง PV Array	ค่าของพารามิเตอร์									
	$P_{inv}$ (W)	$Q_{inv}$ (VAr)	$V_{inv}$ (V)	$\theta$ (Degree)	$M$	$P_{grid}$ (W)	$Q_{grid}$ (VAr)	$V_{grid}$ (V)	$\theta_{grid}$ (Degree)	
4	PV	757,955	699,861.7	224.49	0.027936	0.8163	757,757	652,977	217.7	-0.3634
	PQ	757,759	26,988.29	217.7	0.02936	0.7916	727,144	0	217.6	-0.34242
12	PV	757,749	700,306.8	220.72	0.017807	0.8026	758,080	651,411	213.8	-1.0139
	PQ	757,756	28,728.92	213.44	0.020329	0.7762	727,210	0	213.3	-0.94458
19	PV	757,750	700,235.6	220.7	0.017699	0.8025	757,021	651,582	213.8	-1.0176
	PQ	757,758	27,480.09	213.41	0.020236	0.776	727,268	0	213.3	-0.94788
31	PV	757,754	701,810.7	220.35	0.01634	0.8013	757,032	653,430	213.4	-1.1024
	PQ	757,758	28,365.5	212.79	0.019521	0.7738	756,612	0	212.6	-0.99944

จากตารางที่ 10.7 จะพบว่าเมื่อพิจารณาจุดเชื่อมต่ออาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งบัสต่างๆนั้นจะพบว่า สำหรับกรณีของโหมดการทำงานแบบ PV นั้นหากจุดที่ทำการเชื่อมต่ออาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากสถานีไฟฟ้าต้นทางที่บัสที่ 1 มากจะส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ( $V_{grid}$ ) ไว้ที่ 1 p.u. หรือ 220 โวลต์ได้เนื่องจากผลของโหลดในบัสต่างๆระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่อยู่ปลายทางทำให้เกิดแรงดันตกในระบบ รวมถึงผลจากการ

จำกัดค่าของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยในกรณีของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ( $Q_{grid}$ ) ที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบนั้นไม่ได้ถูกกำหนดด้วยโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดนี้ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟดังกล่าวยังคงถูกจำกัดไว้ภายใต้กฎของสามเหลี่ยมกำลัง หรือสมการ  $S^2_{grid} = P^2_{grid} + Q^2_{grid}$  นั้นเอง ซึ่งเมื่อทำการแทนค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ถูกระบุโดยพิกัดของระบบ คือ 1 MVA และค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ ( $P_{grid}$ ) ในแต่ละกรณีจะได้ค่าของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่สามารถจ่ายให้แก่ระบบโดยที่อินเวอร์เตอร์ยังคงรักษาโหมดการทำงานของ PV และมุมของแรงดันที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ( $\theta_{grid}$ ) ก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ณ บั๊ตที่ห่างจากสถานีไฟฟ้าต้นทางมากขึ้นด้วย

สำหรับกรณีของโหมดการทำงานแบบ PQ นั้นจะพบว่าเนื่องจากการทำงานที่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อพยายามจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าให้มากที่สุด ซึ่งเป็นโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ ( $Q_{inv}$ ) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีโหมดการทำงานแบบ PV เนื่องจากอินเวอร์เตอร์จะพยายามปรับให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้าน้อยที่สุดนั่นเอง

โดยปกติแล้วค่าของพารามิเตอร์ต่างๆในตารางที่ 10.7 นั้นจะถูกจำกัดด้วยค่าพิกัดของระบบไฟฟ้า เช่น ค่าพิกัดของหม้อแปลงและค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น กล่าวคือ ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆจะอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเกินจากค่าของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่หม้อแปลงและอินเวอร์เตอร์รับได้ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ณ จุดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ (หรือจุดที่มีโหลดน้อย) นั้นค่าของพารามิเตอร์ต่างๆในตารางที่ 10.7 จะถูกจำกัดด้วยร้อยละของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามข้อกำหนดการเชื่อมต่ออีกด้วย กล่าวคือ การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้านั้นจะต้องไม่ทำให้แรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามากเกินไปกว่าข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า

## 10.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลจากแบบจำลองที่ได้ทำการพัฒนาตามหลักการและทฤษฎีจากบทที่ 2 ถึงบทที่ 7 ซึ่งได้แบ่งการนำเสนอออกเป็นส่วนย่อย 4 ส่วน คือ

ส่วนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งชนิดหนึ่งและสองไดโอด (หัวข้อที่ 10.1 และ 10.2) ซึ่งแสดงถึงผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์และการหาค่าพารามิเตอร์

เพิ่มเติมและการเปรียบเทียบผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มจะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น แต่สำหรับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

ส่วนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด ซึ่งได้มีการสมมติสถานการณ์การบังแสงแดดรูปแบบต่างๆ รวมถึงผลของการบังแสงแดดจากจำนวนของโมดูลที่ถูกบังแสงแดด และผลของการบังแสงแดดจากร้อยละของพลังงานแสงที่ลดลงเนื่องจากการบังแสงแดด ซึ่งจะพบว่าร้อยละของพลังงานแสงที่ลดลงเนื่องจากการบังแสงแดดจะส่งผลต่อค่าของกำลังการผลิตมากกว่าจำนวนโมดูลที่เกิดการบังแสงแดด

ส่วนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดผลความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีการสมมติการเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 2 ระดับ คือ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันไม่เกิน 20% มาเชื่อมต่อกันและเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันเกิน 20% มาเชื่อมต่อกันในรูปแบบอนุกรมและขนาน ซึ่งจากแบบจำลองจะพบว่าหากเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันเกิน 20% ขึ้นไปมาเชื่อมต่อกันจะทำให้กำลังการผลิตมีค่าลดลงเกินกว่า 25% ดังนั้นหากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดแตกต่างกันเกิน 20% จึงไม่ควรนำมาเชื่อมต่อกันในอาเรย์เดียวกัน เพื่อป้องกันผลของความแตกต่างของแผงนั่นเอง

ส่วนของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าและพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะพบว่าโหมดทำงานรูปแบบของ PQ ที่ไม่มีการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ ( $Q_{grid} = 0$ ) จะให้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้แก่ระบบของการไฟฟ้ามากที่สุด อย่างไรก็ตามโหมดการทำงานรูปแบบของ PV จะพบว่าระดับแรงดัน ณ จุด ที่เชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และระบบของการไฟฟ้าจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้อิสระ แต่จะถูกจำกัดด้วยขนาดของหม้อแปลงและขนาดของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบของกำลังไฟฟ้าปรากฏนั่นเอง



## บทที่ 11

### การเปรียบเทียบผลการทดลองของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการใช้ทฤษฎีและหลักการต่างๆที่ได้ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 ถึงบทที่ 7 โดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบทดสอบที่ได้กล่าวไปในบทที่ 9 ภายใต้การควบคุมเงื่อนไขของการทดลองที่เหมือนกัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของระบบทดสอบ ทำให้การทดสอบเปรียบเทียบผลการทดลองกับการตรวจวัดจริงนั้นไม่สามารถทำได้ในทุกกรณีศึกษาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 10 ในส่วนของการบังแสงแดดได้มีการทดสอบเปรียบเทียบได้เพียงกรณีศึกษาที่ 1 และในส่วนของกาเกิดผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่มีระบบทดสอบที่ใช้ทำการตรวจวัดได้ เนื่องจากผลของการเกิดความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมักจะถูกออกแบบให้มีค่าน้อยที่สุดจากขั้นตอนการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ดังนั้นสำหรับในบทนี้จะแบ่งการเสนอออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

- (1) การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- (2) การเปรียบเทียบผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์
- (3) สรุป

#### 11.1 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติเป็นหลัก โดยจะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 หัวข้อย่อยดังนี้ คือ

- การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง
- การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองและข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์
- การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองและค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบทดสอบ

### 11.1.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และบทที่ 4 ถึงค่าของพารามิเตอร์พื้นฐานซึ่งเป็นข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 8 พารามิเตอร์นั้น เมื่อทำการพิจารณาร่วมกับสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะพบว่าไม่เพียงพอต่อการคำนวณหาจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องคำนวณหาเพิ่มเติมอยู่ 4 พารามิเตอร์ คือ

- กระแสอิ่มตัวของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Saturation current:  $I_o$ )
- กระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Photoelectric current:  $I_{ph}$ )
- ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Series resistance:  $R_s$ )
- ความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Shunt resistance:  $R_p$ )

และสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 ไดโอดจะมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องคำนวณหาเพิ่มเติมอยู่จำนวน 3 พารามิเตอร์ คือ

- กระแสอิ่มตัวของไดโอดทั้งสองตัวของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Diodes saturation current:  $I_{o,j}|_{j=1,2}$ )
- ความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Series resistance:  $R_s$ )
- ความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (Shunt resistance:  $R_p$ )

โดยค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทำการหาเพิ่มเติมดังกล่าวนี้ จะสามารถหาได้จากวิธีการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และค่าความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2$

สำหรับค่าของกระแสอิ่มตัวของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลและค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลนั้น จะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ประเภทของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ว่าเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดหรือแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด และเนื่องจากโปรแกรม PVSYST ใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดดังนั้นในการเปรียบ

เทียบค่าของกระแสอิมิตัวของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลและค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลของแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดนั้น จึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบเทียบกับโปรแกรม PVSYST หรือเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองแบบสองไดโอดได้ ในที่นี้จึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลและความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล

โดยค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลและความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่นำมาทำการเปรียบเทียบจากโปรแกรม PVSYST นี้ จะเป็นค่าพารามิเตอร์ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC) เช่นกัน โดยจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้มาจากฐานข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตต่างๆในแต่ละรุ่นโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดซึ่งเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หลักของโปรแกรม PVSYST อย่างไรก็ตามสำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและสองไดโอดนั้นจะมีค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลและความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลเท่ากัน จึงสามารถทำการเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของพารามิเตอร์ทั้งสองตัวที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใดได้ โดยกระบวนการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดในที่นี้จะใช้วิธีการคำนวณแบบวนซ้ำ (iteration) ด้วยวิธีการ Derivative free method ส่วนกระบวนการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดในที่นี้จะใช้วิธีการอย่างง่าย (Simplify method) ดังที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 4 นั้นเอง

สำหรับค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ( $R_s$ ) และความต้านทานสมมูลต่อขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล ( $R_p$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120 จากโปรแกรม PVSYST เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นสามารถแสดงได้ในตารางที่ 11.1

ตารางที่ 11.1 เปรียบเทียบค่าความต้านทานสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น SP120 ระหว่างโปรแกรม PVSYST และการคำนวณ

ความต้านทาน	ค่าจากโปรแกรม PVSYST	ค่าจากแบบจำลองหนึ่งไดโอด ( $\Omega$ )	ความคลาดเคลื่อน (%)	ค่าจากแบบจำลองสองไดโอด ( $\Omega$ )	ความคลาดเคลื่อน (%)
$R_s$	0.105	0.158	50.47	0.168	60.00
$R_p$	190	198.01	4.22	203.82	7.27

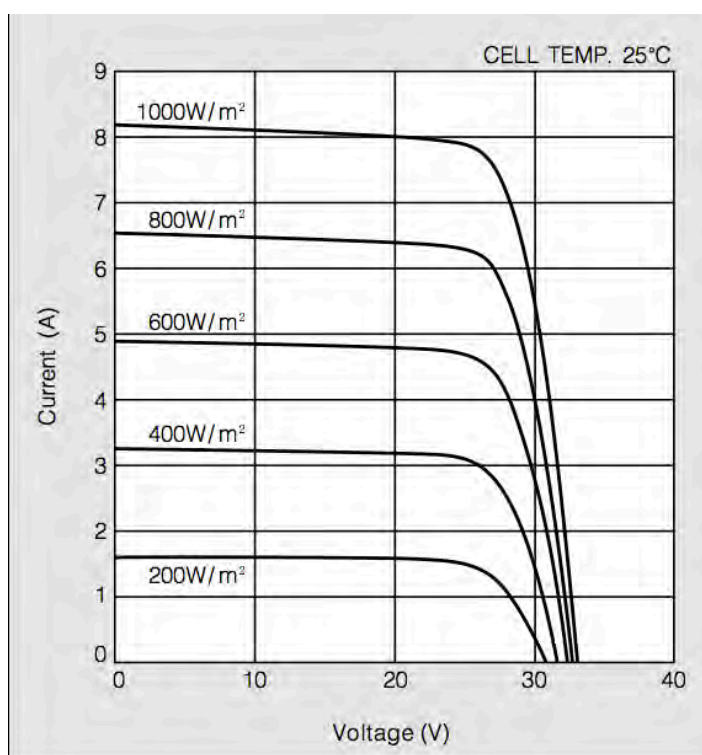
จากตารางที่ 11.1 จะพบว่าค่าของความต้านทานสมมูลทั้งสองที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากฐานข้อมูลของโปรแกรม PVSYST มากกว่าค่าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด เนื่องจากในแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าน้อยกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ทำให้การแก้สมการของวงจรสมมูลไม่จำเป็นต้องใช้การประมาณค่าของกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์แต่สามารถคำนวณออกมาได้จากกระบวนการทางคณิตศาสตร์โดยตรง ส่งผลให้ในแต่ละรอบของการคำนวณค่าของความต้านทานสมมูลทั้งสองนี้ได้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ซึ่งใช้วิธีการอย่างง่ายและการประมาณค่าเริ่มต้นของการคำนวณร่วมกับการปรับกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน (Fit-curve) ในทุกรอบของการคำนวณ

### 11.1.2 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ คือ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกราฟดังกล่าวเป็นข้อมูลหนึ่งที่ปรากฏในเอกสารแสดงข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบในลักษณะของการประมาณ เนื่องจากต้องใช้สายตาในการประมาณจุดตัดแกนของกราฟจากข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิตเทียบกับกราฟที่เป็นข้อมูลจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น จึงเป็นเพียงการประมาณแนวโน้มน้ำความถูกต้องในเบื้องต้นของแบบจำลองเท่านั้น อย่างไรก็ตามการ

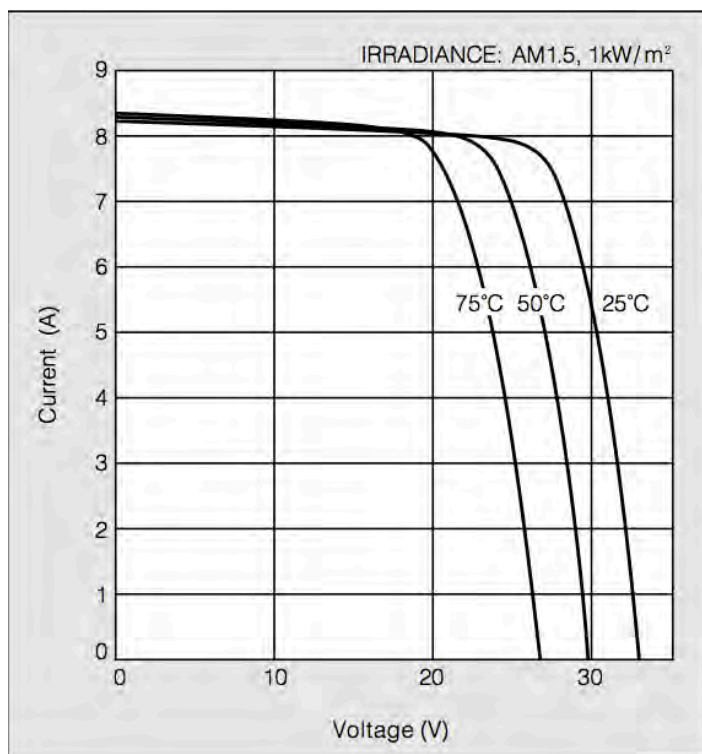
เปรียบเทียบผลการทดลองอย่างละเอียดจะได้มีการแสดงในลำดับถัดไปในส่วนของการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองและค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบทดสอบ

สำหรับการเปรียบเทียบจะใช้ข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด มหาชน รุ่น KC200GT [31] ดังแสดงในรูปที่ 11.1 และรูปที่ 11.2 (สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน รุ่น SP120 นั้นจะไม่ทำการเปรียบเทียบในหัวข้อย่อนี้ เนื่องจากไม่มีกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันในข้อมูลทางเทคนิค)



รูปที่ 11.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง

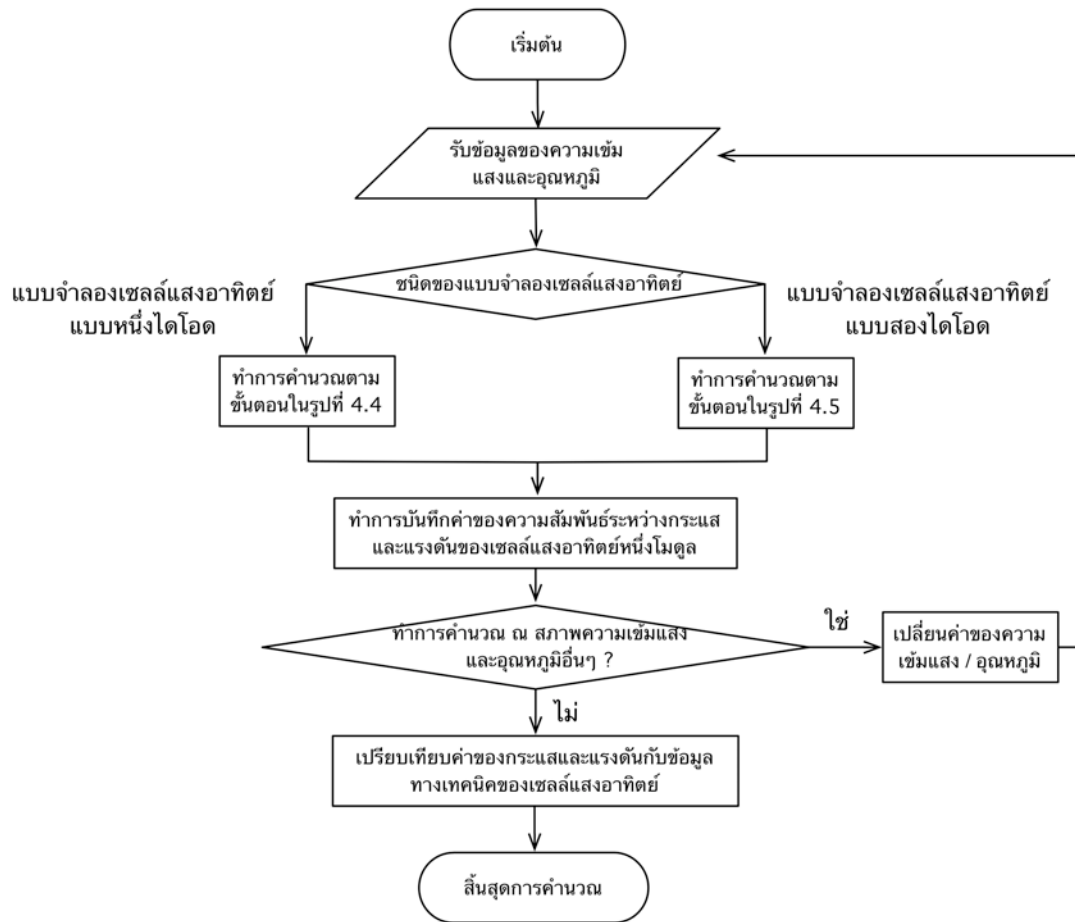
จากรูปที่ 11.1 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ  $1,000 W/m^2$   $800 W/m^2$   $600 W/m^2$   $400 W/m^2$  และ  $200 W/m^2$  โดยมีอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ที่  $25^\circ C$



รูปที่ 11.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัท เคียวเซระ จำกัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากรูปที่ 11.2 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 75°C 50°C และ 25°C โดยมีความเข้มแสงคงที่ที่ 1,000 W/m<sup>2</sup>

สำหรับข้อมูลจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นนั้น จะทำการเปรียบเทียบทั้งแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองแบบสองไดโอด กับข้อมูลจากผู้ผลิตในรูปที่ 11.1 และ 11.2 เพื่อพิจารณาความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบขณะที่สภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยขั้นตอนการคำนวณข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น จะทำการคำนวณโดยใช้หลักการที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดได้ดังรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.3 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

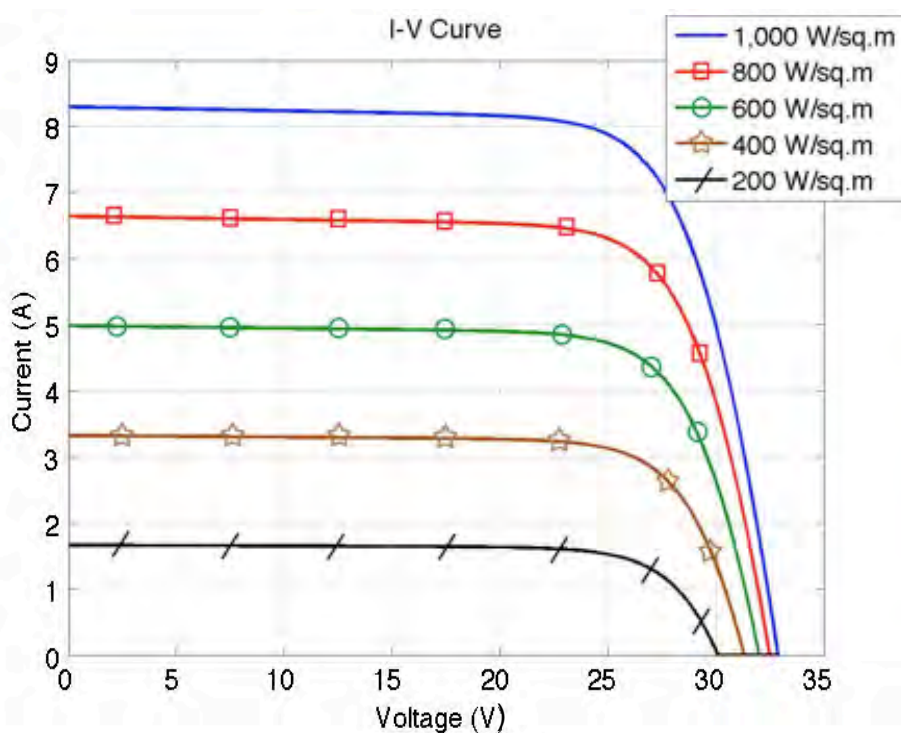
ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลของสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ต้องการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 2 : เลือกชนิดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้

- หากเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดให้ทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 4.4
- หากเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดให้ทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 4.5

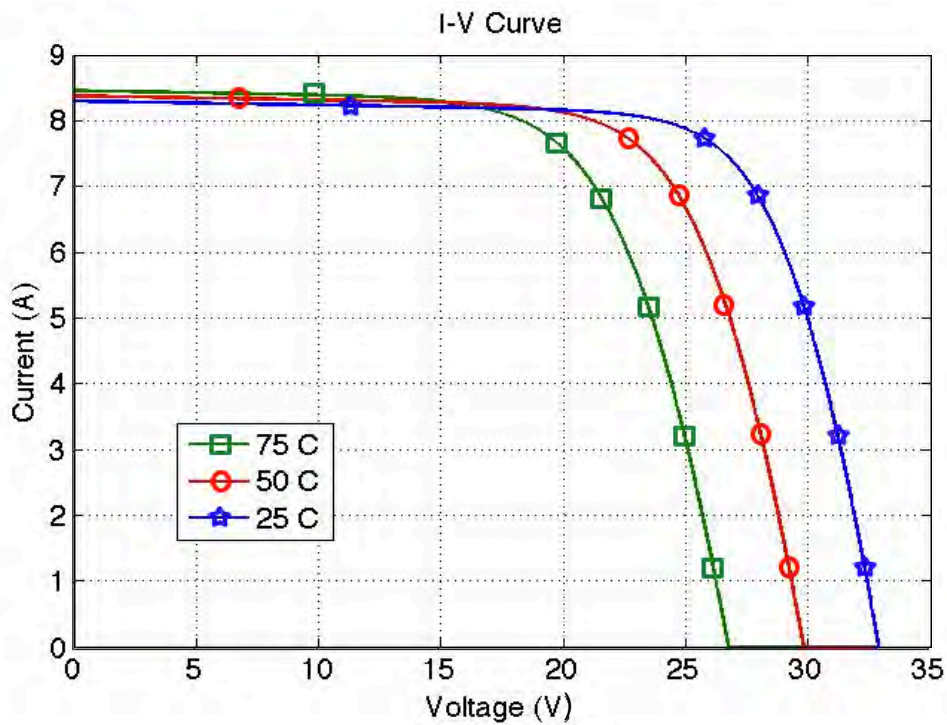
- ขั้นตอนที่ 3 : - หากต้องการทำการคำนวณอีกครั้ง ณ สภาพความเข้มแสงและ  
 อุณหภูมิค่าใหม่ ให้รับค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิค่าใหม่  
 แล้วกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1  
 - หากไม่ต้องการคำนวณเพิ่มเติม ให้เข้าสู่ขั้นตอนที่ 4
- ขั้นตอนที่ 4 : ทำการเปรียบเทียบค่าของกระแสและแรงดันที่คำนวณได้กับข้อมูล  
 ทางเทคนิค

เมื่อทำการคำนวณดังขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 11.3 จะได้ผลของความสัมพันธ์  
 ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท เคียวเซร่า จำกัด (มหาชน)  
 รุ่น KC200GT จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง  
 ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 11.4 และรูปที่ 11.5 ตามลำดับและผลของ  
 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองได  
 โอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 11.6 และ 11.7  
 ตามลำดับ

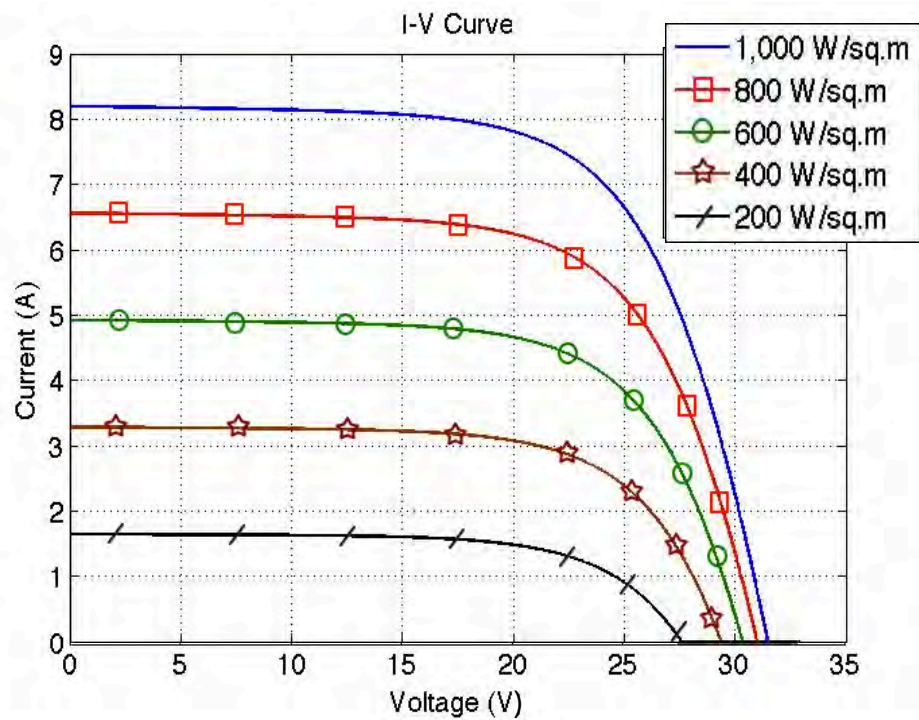


รูปที่ 11.4 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น  
 KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด

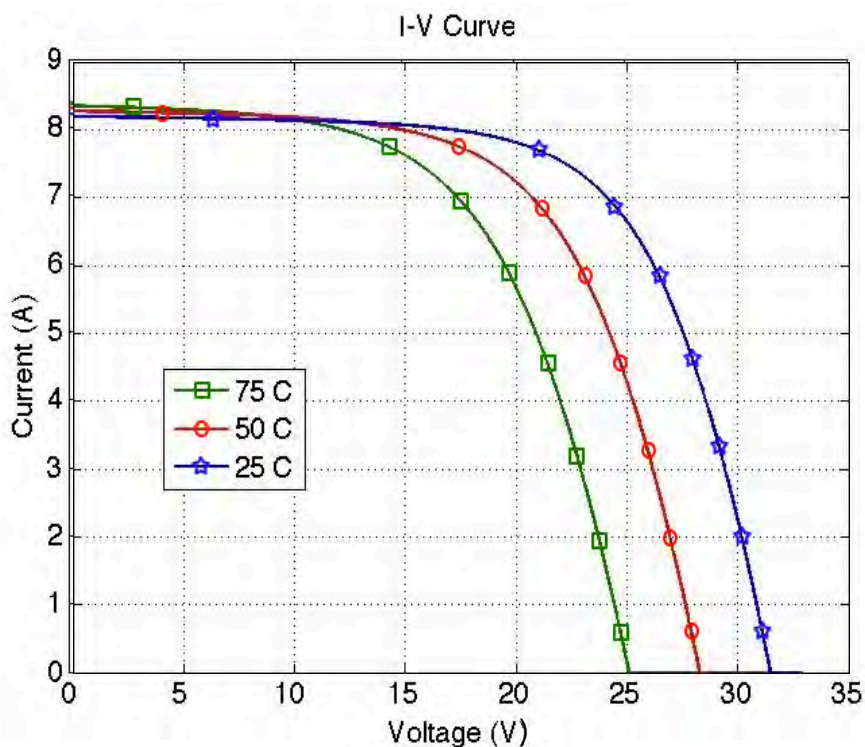




รูปที่ 11.5 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด



รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด



รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล รุ่น KC200GT เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองแบบสองไดโอด

ในการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดกับข้อมูลทางเทคนิคนั้น จะเริ่มจากการวิเคราะห์ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกราฟคุณลักษณะของความสัมพันธ์แล้วจึงวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ผลของความเข้มแสงที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ของข้อมูลทางเทคนิคและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 11.1 รูปที่ 11.4 และรูปที่ 11.6 ซึ่งจะเป็นรูปของความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของข้อมูลทางเทคนิค แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งไดโอด และแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดตามลำดับ หากพิจารณาจุดตัดแกน Y นั้นจะพบว่าจุดตัดแกน Y ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับจุดตัดแกน Y จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคมากกว่าจุดตัดแกน Y ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด เนื่องจากค่าของจุดตัดแกน Y จะแสดงถึงค่าของกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จะพบว่ากระแสที่ไหลในวงจรเมื่อทำการลัดวงจร ณ ฝั่งขาออกจะมีกระแสที่ไหล คือ กระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ ( $I_{ph}$ ) จึงทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟโตอิเล็กทริกส์นั่นเอง อย่างไรก็ตามจะพบว่าตามค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมและความต้านทานสมมูลต่อขนาน กล่าวคือหากค่าของความต้านทานทั้งสองที่หาได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากก็จะทำให้ค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์หรือจุดตัดแกน Y ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันมีค่าแม่นยำตรงกับค่าของข้อมูลทางเทคนิคนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าของความต้านทานสมมูลต่ออนุกรมและความต้านทานสมมูลต่อขนานที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ จึงส่งผลให้ค่าของจุดตัดแกน Y ที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่สำหรับค่าของจุดตัดแกน Y ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น เนื่องจากการนำวิธีการอย่างง่าย (Simplify method) มาช่วยในการคำนวณ ทำให้มีการประมาณค่าของกระแสลัดวงจรและค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์เท่ากันจึงส่งผลให้จุดตัดแกน Y ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมีค่าใกล้เคียงกับจุดตัดแกน Y ที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อพิจารณาจุดตัดแกน X จะพบว่าจุดตัดแกน X ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับจุดตัดแกน X จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคมากกว่าจุดตัดแกน X ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด เนื่องจากจุดตัดแกน X ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันนั้นคือค่าของแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ซึ่งขึ้นกับค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะเห็นได้ว่าค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานสมมูลจริง (ที่ทราบได้จากฐานข้อมูลของโปรแกรม PVSYS) มากกว่าค่าของความต้านทานสมมูลต่อขนานของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่คำนวณได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 11.1.1 แล้วนั่นเอง

สำหรับการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ของข้อมูลทางเทคนิคและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะเริ่มจากการพิจารณารูปที่ 11.2 รูปที่ 11.5 และรูปที่ 11.7 ซึ่งจะเป็นรูปของความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของข้อมูลทางเทคนิค แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง

ไดโอด และแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดตามลำดับ หากพิจารณาจุดตัดแกน Y ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในรูปที่ 11.2 รูปที่ 11.5 และรูปที่ 11.7 นั้นจะพบว่ามีความใกล้เคียงกันในทุกกรณี เนื่องจากค่าของจุดตัดแกน Y จะแสดงถึงค่าของกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ดังที่ได้กล่าวไป ซึ่งค่าของกระแสลัดวงจรมันจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่น้อยมากหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย ดังนั้นในสถานะที่อุณหภูมิที่  $25^{\circ}\text{C}$   $50^{\circ}\text{C}$  และ  $75^{\circ}\text{C}$  นั้นจุดตัดแกน Y ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรูปที่ 11.2 รูปที่ 11.5 และรูปที่ 11.7 จึงมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 8.21 A ซึ่งเป็นค่าของกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต และเมื่อพิจารณาจุดตัดแกน X จะพบว่าจุดตัดแกน X ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับจุดตัดแกน X จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคมากกว่าจุดตัดแกน X ของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ด้วยเหตุผลจากค่าของพารามิเตอร์ความต้านทานสมมูลเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปในส่วนการวิเคราะห์ความเข้มแสงแล้วนั่นเอง

### 11.1.3 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลจากการตรวจวัดจริง

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ คือ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบทดสอบ ชั้นที่ 20 อาคารเจริญวิศวกรรม (อาคาร 4) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) รุ่น SP120 จำนวน 10 โมดูลทำการเชื่อมต่อแบบอนุกรมดังที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 9

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงของระบบทดสอบนั้น จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 16 ตัวซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ Excel ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11.8 และมีรายละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัวดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.2 อย่างไรก็ตามสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเพียงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ คือ เวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล (Time) ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วง 5 นาทีที่ทำการบันทึกข้อมูลนั้น (IntSollrr) อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีที่ทำการบันทึกข้อมูลนั้น (TmpMdul) เพื่อใช้เป็นข้อมูลขาเข้า (Input) สำหรับใช้ในการคำนวณของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (ในส่วนไฟฟ้ากระแสตรง) เฉลี่ยในช่วง 5 นาที

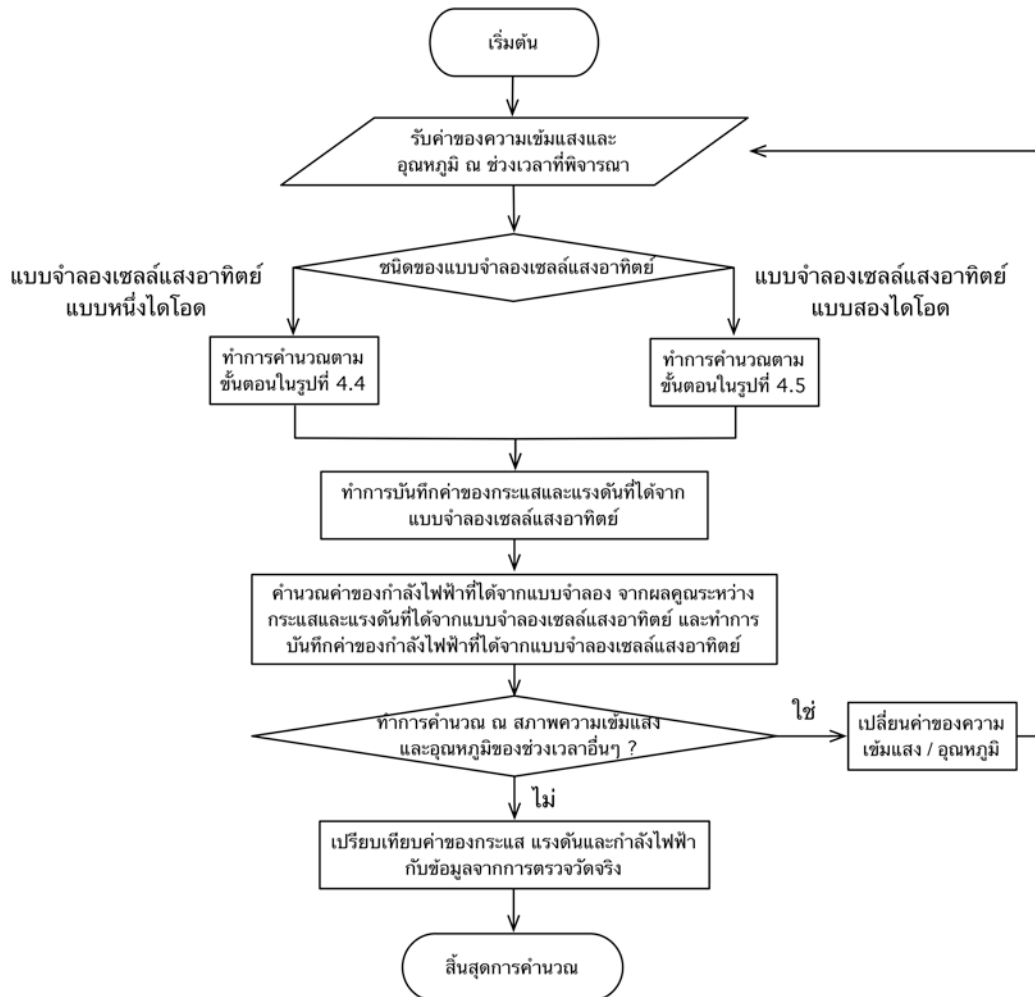
นั้น (Ipv) และค่าของแรงดันที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (DC) เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้น (Upv-soll) และเมื่อนำค่าของกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (ในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง) เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้นคูณกับค่าของแรงดันที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (DC) เฉลี่ยในช่วง 5 นาทีนั้นก็จะได้เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงของส่วนไฟฟ้ากระแสตรง (Pdc) สำหรับใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a grid of data. The columns are labeled with various parameters such as 'TimeStamp', 'Irradiance', 'Temperature', and 'Power'. The data is organized in a structured manner, likely representing time-series measurements from a solar panel system. The interface includes standard Excel toolbars and a search bar at the top.

รูปที่ 11.8 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบของไฟล์ Excel

สำหรับการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลของค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ที่ได้จากการตรวจวัดจากระบบทดสอบกับค่าของ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและสองไดโอด ในช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ และทำงานในโหมด MPP ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าในทุกๆ 5 นาที แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยของความแม่นยำของแบบจำลองในแต่ละวันออกมา โดยขั้นตอนการคำนวณค่าของกระแส ค่าแรงดัน และค่ากำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น จะทำการคำนวณโดยใช้หลักการที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรง

ต้นจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดได้ดังรูปที่ 11.9

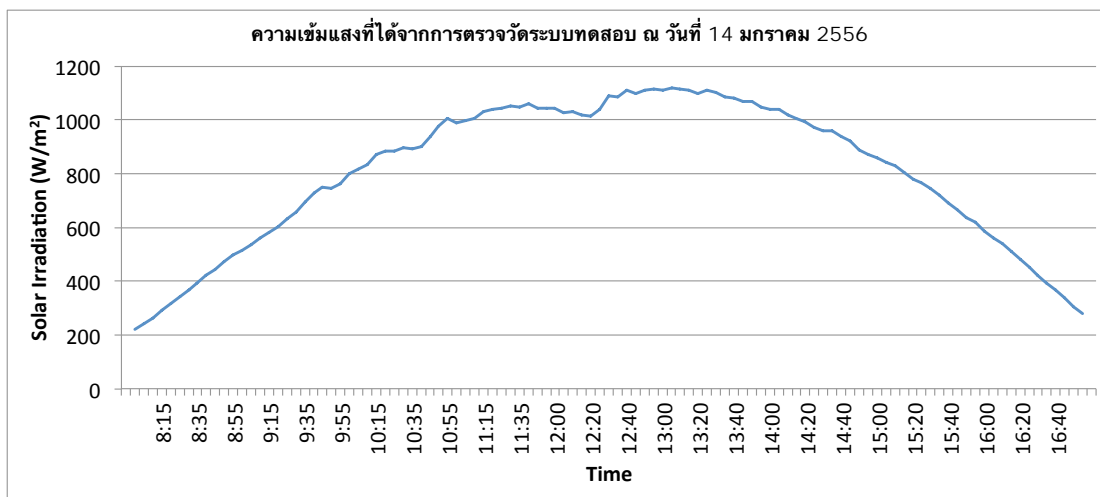


รูปที่ 11.9 ขั้นตอนการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัด

- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลของสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาที่ต้องการ  
คำนวณ
- ขั้นตอนที่ 2 : เลือกชนิดของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้  
- หากเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดให้ทำการ  
คำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 4.4  
- หากเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดให้ทำการ  
คำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 4.5
- ขั้นตอนที่ 3 : ทำการบันทึกค่าของกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสง  
อาทิตย์ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา
- ขั้นตอนที่ 4 : ทำการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสง  
อาทิตย์ จากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลอง  
เซลล์แสงอาทิตย์ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา และบันทึกค่าของกำลัง  
ไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- ขั้นตอนที่ 5 : - หากต้องการทำการคำนวณอีกครั้ง ณ สภาพความเข้มแสงและ  
อุณหภูมิค่าใหม่ ที่ช่วงเวลาอื่นๆ ให้รับค่าของความเข้มแสงและ  
อุณหภูมิค่าใหม่ ณ ช่วงเวลาที่ต้องการแล้วกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1  
- หากไม่ต้องการคำนวณเพิ่มเติม ให้เข้าสู่ขั้นตอนที่ 6
- ขั้นตอนที่ 6 : ทำการเปรียบเทียบค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้  
กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง
- ขั้นตอนที่ 7 : สิ้นสุดการคำนวณ

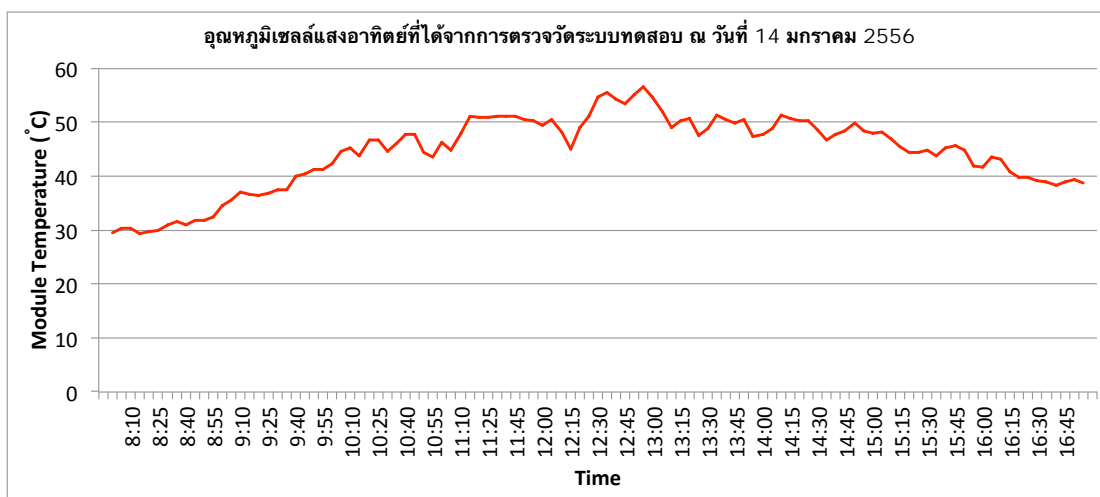
สำหรับการเปรียบเทียบผลของข้อมูล กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เป็น  
ข้อมูลขาออกนั้น จะเริ่มจากการพิจารณาข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์  
คือ ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิในหนึ่งวันก่อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเปรียบเทียบ  
เทียบผลของการตรวจวัดจริงกับผลจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะมีขั้นตอนใน  
รายละเอียดเหมือนกันในแต่ละวันที่ทำการเปรียบเทียบ ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างการ  
เปรียบเทียบอย่างละเอียดเพียงหนึ่งวัน และจะมีการแสดงผลของการเปรียบเทียบของ  
แต่ละวันในลำดับถัดไป โดยจะยกตัวอย่างข้อมูลของวันที่ 14 มกราคม 2556 โดยรูปที่

11.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และรูปที่ 11.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์กับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 11.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและเวลาที่บันทึกได้จาก การตรวจวัดระบบทดสอบ

ณ วันที่ 14 มกราคม 2556



รูปที่ 11.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่บันทึกได้จาก การตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

จากรูปที่ 11.10 และรูปที่ 11.11 แสดงให้เห็นว่าค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ

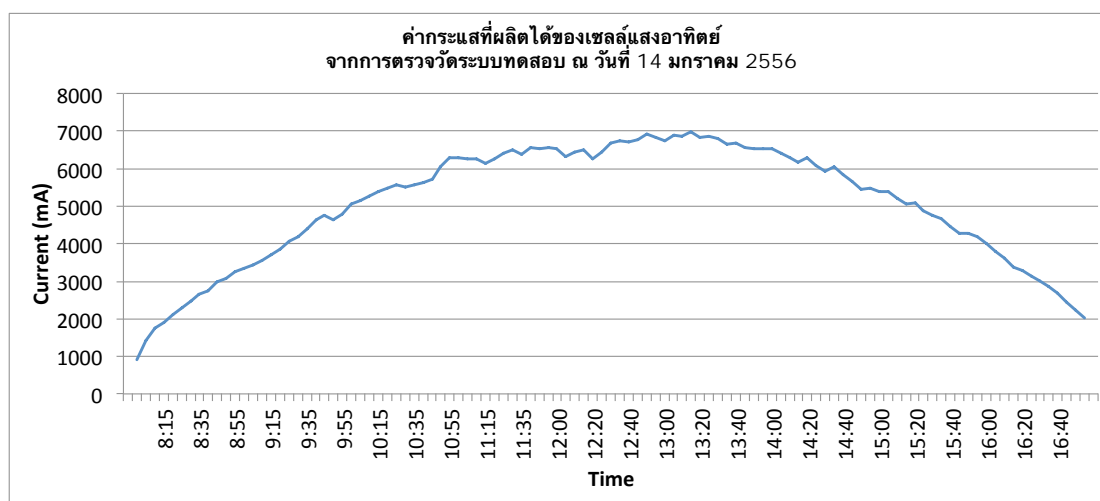


เมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้คุณสมบัติของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงก็จะทำให้คุณสมบัติของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

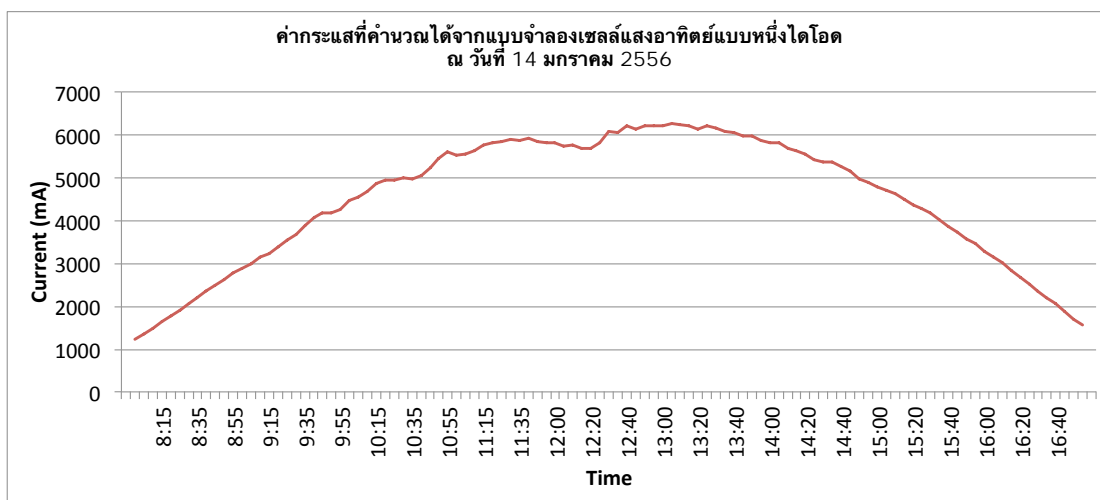
ในส่วนของ การเปรียบเทียบผลของข้อมูลของขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ กับ ข้อมูลจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 ส่วนย่อยตามข้อมูลที่พิจารณา คือ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

- การเปรียบเทียบค่าของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

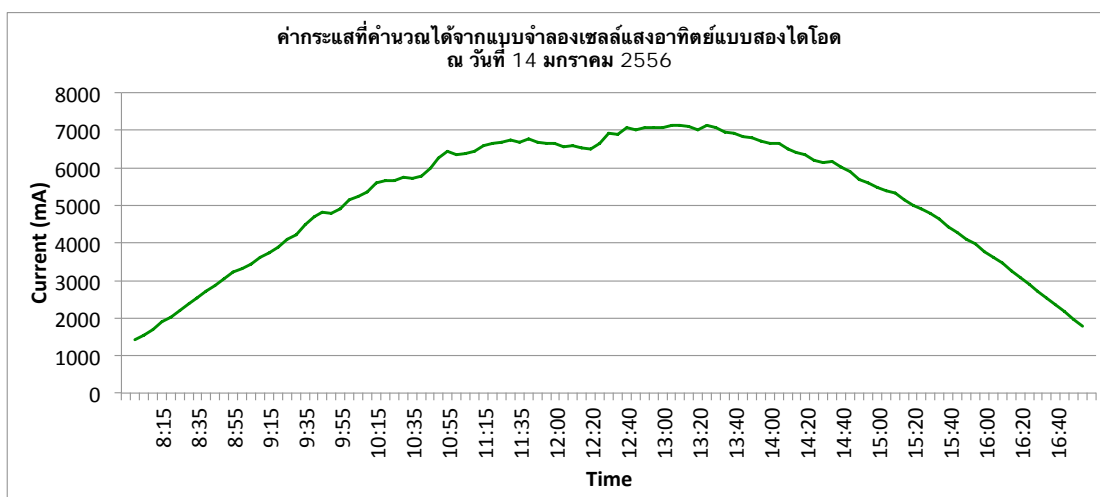
เมื่อนำข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบทดสอบที่บันทึกได้ในทุก 5 นาที ของวันที่ 14 มกราคม 2556 มาแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของกระแสกับเวลาที่บันทึกได้ จะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 11.12 และจากการนำข้อมูลของความเข้มแสงและคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.10 และรูปที่ 11.11 มาทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 11.9 จะแสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ได้จากแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดกับเวลาที่บันทึก และความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ได้จากแบบจำลองแบบสองไดโอดกับเวลาที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.13 และรูปที่ 11.14 ตามลำดับ



รูปที่ 11.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

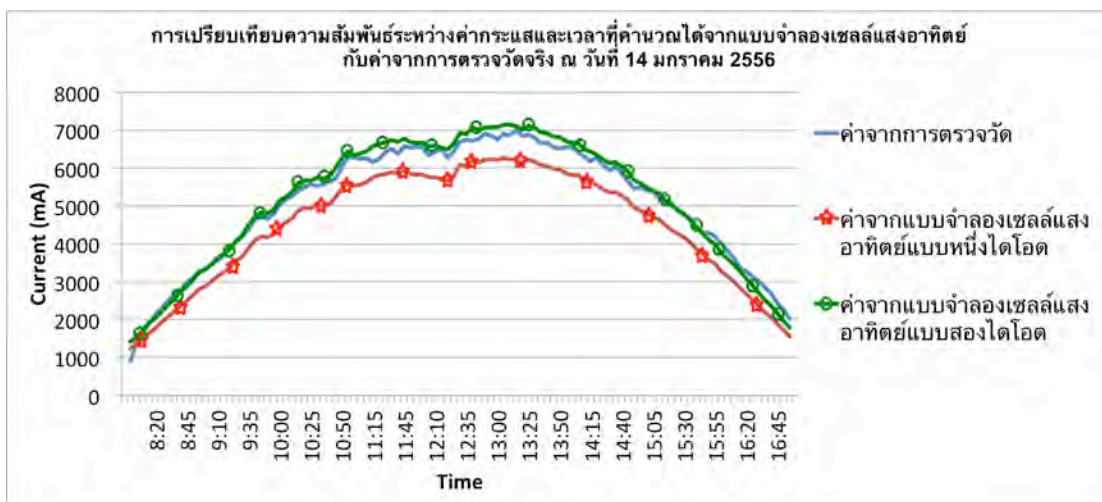


รูปที่ 11.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556



รูปที่ 11.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบจึงขอแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริง กระแสจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด และกระแสไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดในรูปที่ 11.5



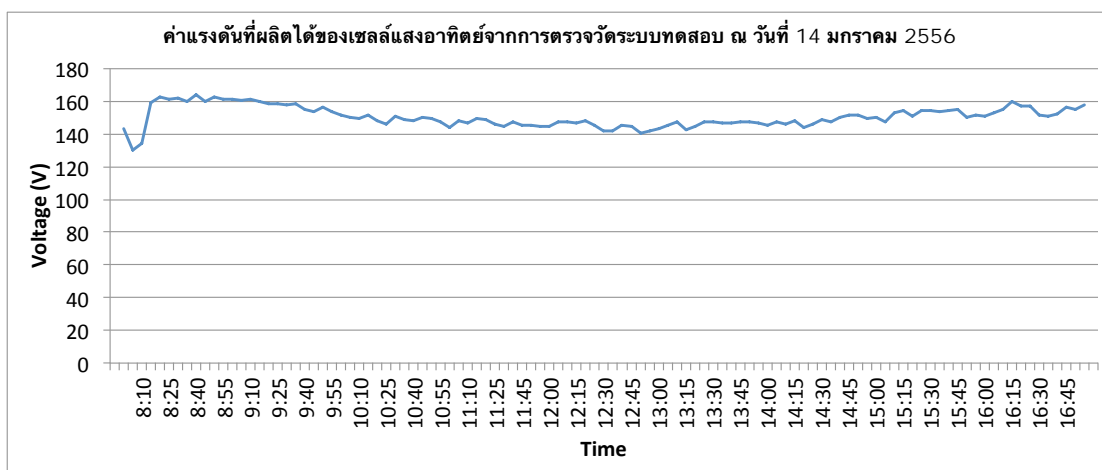
รูปที่ 11.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจวัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

จากรูปที่ 11.15 จะพบว่าค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่าค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยเช่น ช่วงเวลาเช้าและเย็น แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากเนื่องจากผลของไดโอดตัวที่สองที่ชดเชยผลของ Shockley Read Hall recombination ดังที่ได้กล่าวไป และจะพบว่าค่าของกระแสจากการตรวจวัดจริงและจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่ามากที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 12.40 - 13.00 น. ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 11.10 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ความเข้มแสงมีค่าสูงที่สุดของวัน

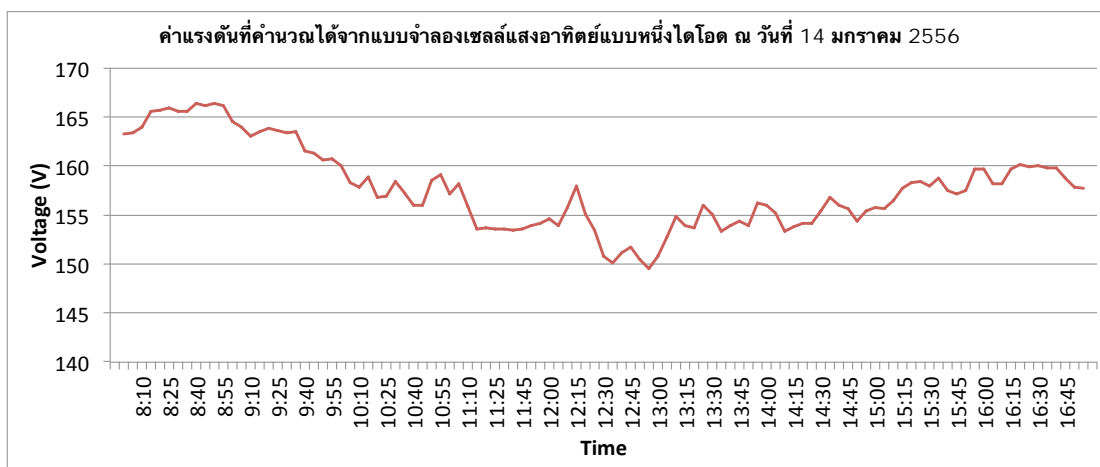
สำหรับค่าของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดนั้น จะทำการบันทึกทุกๆช่วงเวลา 5 นาที ซึ่งค่าที่บันทึกไว้จะเป็นค่าของกระแสเฉลี่ยในช่วงเวลา 5 นาทีที่ผ่านมา ดังนั้นในการคำนวณค่าของกระแสโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำการคำนวณค่าของกระแสในทุกๆช่วงเวลา 5 นาทีแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ของวันที่ 14 มกราคม 2556 ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดมีค่าเป็น 12.373% และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมีค่าเป็น 3.873%

• การเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

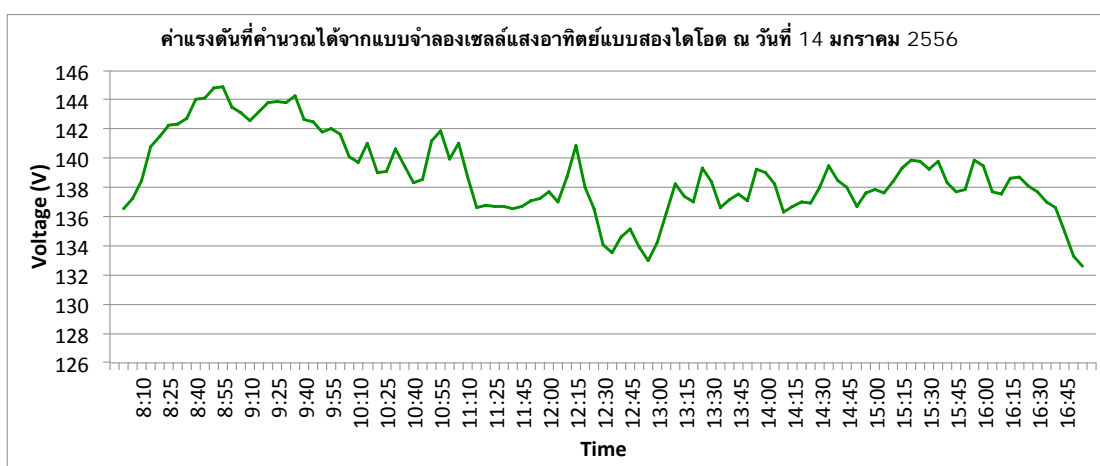
เมื่อนำข้อมูลแรงดันที่ผลิตได้จากระบบทดสอบที่บันทึกได้ในทุก 5 นาทีของวันที่ 14 มกราคม 2556 มาแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลาที่บันทึกได้ จะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 11.16 และจากการนำข้อมูลของความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.10 และรูปที่ 11.11 มาทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 11.9 จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันที่ได้จากแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดกับเวลาที่บันทึก และความสัมพันธ์ของค่าแรงดันที่ได้จากแบบจำลองแบบสองไดโอดกับเวลาที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.17 และรูปที่ 11.18 ตามลำดับ



รูปที่ 11.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

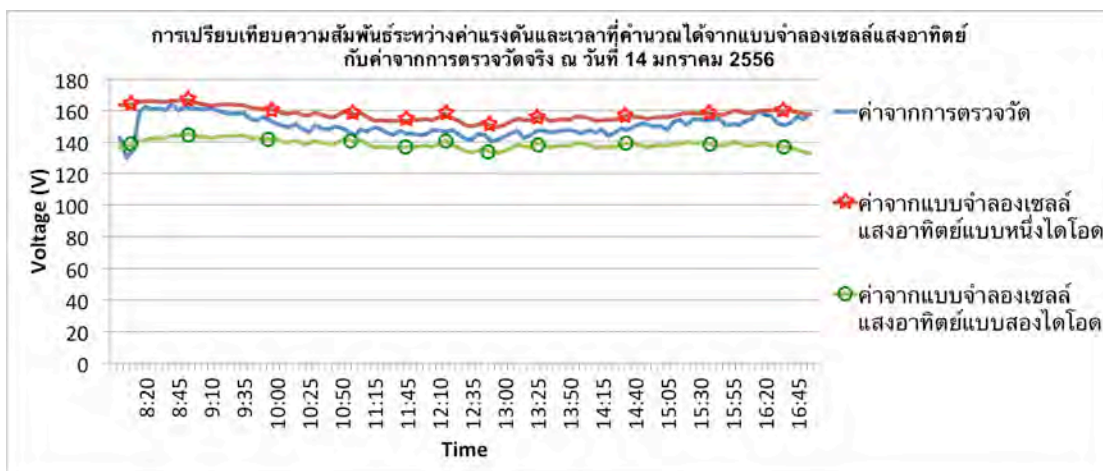


รูปที่ 11.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556



รูปที่ 11.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบจึงขอแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากการตรวจวัดจริง แรงดันจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด และแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดในรูปที่ 11.19



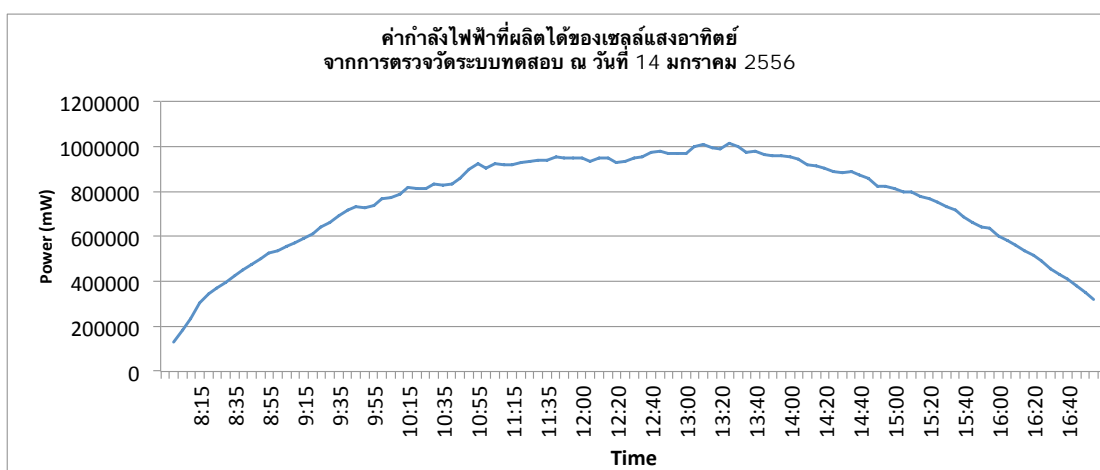
รูปที่ 11.19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจวัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

จากรูปที่ 11.19 จะพบว่าค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่าค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปที่ 11.11 จะพบว่าในช่วงเวลาเช้าและเย็นที่ความเข้มแสงมีค่าน้อยค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าน้อย และในช่วงเวลากลางวันที่ความเข้มแสงมีค่ามาก ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าสูงด้วย โดยค่าของอุณหภูมินั้นจะส่งผลกระทบต่อค่าของแรงดันขีดเริ่ม แรงดันเปิดวงจร และค่าความต้านทานสมมูลต่อขนานดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 และบทที่ 4 และแสดงไว้ในสมการที่ (2.4) สมการที่ (2.10) และสมการที่ (4.9) ตามลำดับ ดังนั้นในช่วงกลางวันที่เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงนั้น ค่าของแรงดันที่ผลิตได้ควรจะมีค่าลดลงซึ่งค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นก็จะมีค่าลดลงในช่วงเวลากลางวัน ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 11.17 และรูปที่ 11.18 แต่จากรูปที่ 11.16 นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงกลับไม่ลดลงมากเท่าที่ควรแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากก็ตาม เนื่องจากแรงดันที่ใช้ทำการเปรียบเทียบหรือแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดนั้นจะเป็นค่าแรงดันที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ จุดก่อนเชื่อมต่อเข้าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะมีกระบวนการสำหรับการค้นหาจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) และพยายามคงค่าแรงดันขาเข้าอินเวอร์เตอร์ไว้ในช่วงที่กำหนดเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดเข้าสู่ระบบได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าของแรงดันที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนของกระแส

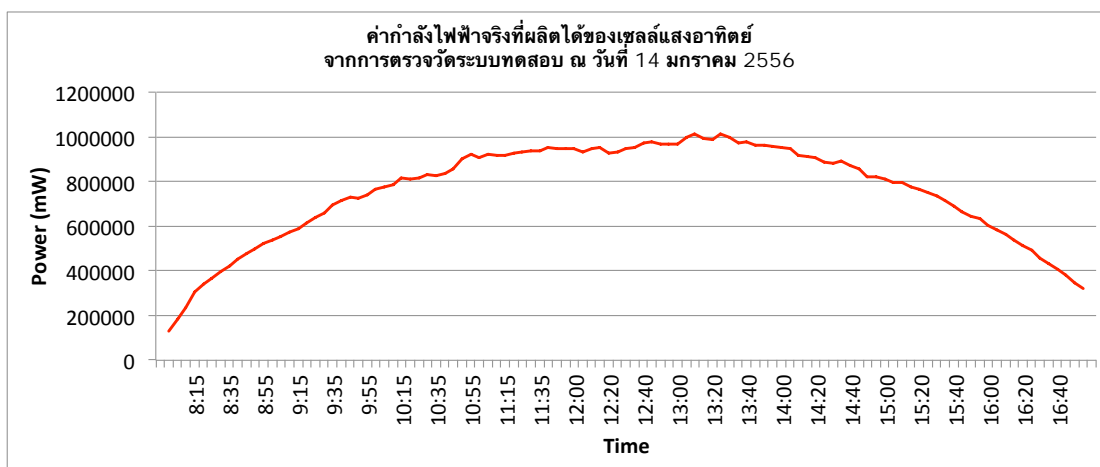
สำหรับค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดนั้น จะทำการบันทึกทุกๆช่วงเวลา 5 นาที ซึ่งค่าที่บันทึกไว้จะเป็นค่าของแรงดันเฉลี่ยในช่วงเวลา 5 นาทีที่ผ่านมา ดังนั้นในการคำนวณค่าของแรงดันโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำการคำนวณค่าของแรงดันในทุกๆช่วงเวลา 5 นาทีแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ของวันที่ 14 มกราคม 2556 ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดมีค่าเป็น 4.961% และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมีค่าเป็น 7.758%

• **การเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์**

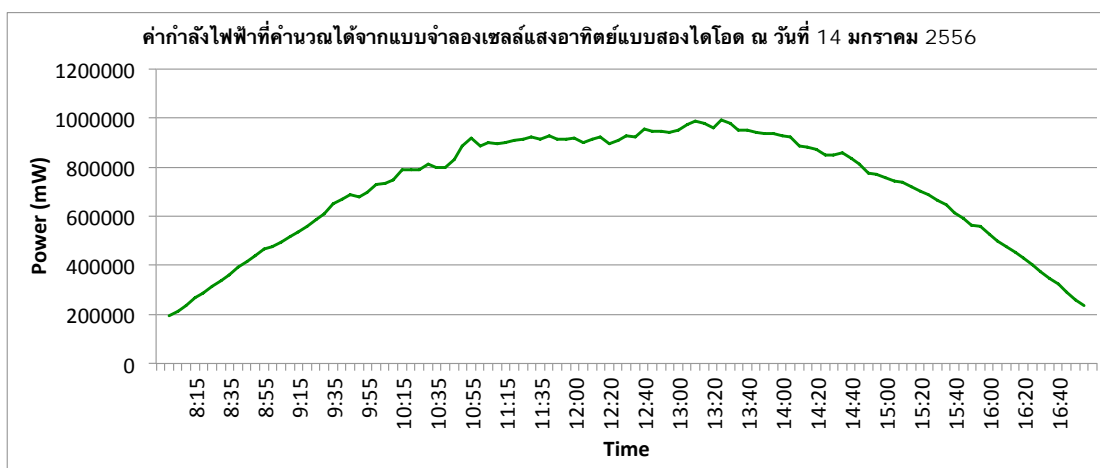
เมื่อนำข้อมูลกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบทดสอบที่บันทึกได้ในทุก 5 นาทีของวันที่ 14 มกราคม 2556 มาแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับเวลาที่บันทึกได้ จะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 11.20 และจากการนำข้อมูลของความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.10 และรูปที่ 11.11 มาทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 11.9 จะแสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอดกับเวลาที่บันทึก และความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากแบบจำลองแบบสองไดโอดกับเวลาที่บันทึกได้ในรูปที่ 11.21 และรูปที่ 11.22 ตามลำดับ



รูปที่ 11.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่บันทึกจากการตรวจวัดระบบทดสอบ ณ วันที่ 14 มกราคม 2556



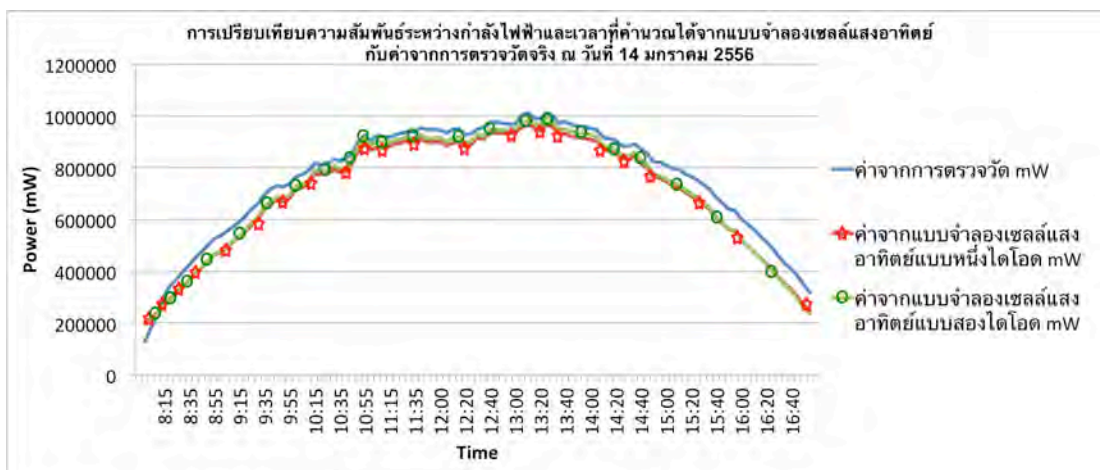
รูปที่ 11.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556



รูปที่ 11.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบจึงขอแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจากการตรวจวัดจริง กำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด และกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดในรูปที่ 11.23





รูปที่ 11.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าจากการตรวจวัดจริง ณ วันที่ 14 มกราคม 2556

จากรูปที่ 11.15 และรูปที่ 11.19 นั้นจะพบว่ากระแสจากการคำนวณของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีค่าแม่นยำกว่าค่ากระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ในขณะที่แรงดันจากการคำนวณของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีค่าแม่นยำกว่าค่าแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 11.23 จะพบว่าค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด

สำหรับค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดนั้น จะทำการบันทึกทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาที ซึ่งค่าที่บันทึกไว้จะเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา 5 นาทีที่ผ่านมา ดังนั้นในการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าในทุกๆ ช่วงเวลา 5 นาทีแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ของวันที่ 14 มกราคม 2556 ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดมีค่าเป็น 8.713% และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมีค่าเป็น 7.551%

และผลของค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละวันจากการตรวจวัดระบบทดสอบนอกเหนือจากวันที่ 14 มกราคม 2556 เปรียบ

เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 11.2

ตารางที่ 11.2 ผลการคำนวณค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยในหนึ่งวัน

วันที่ทำการ ตรวจวัด	แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบ หนึ่งไดโอด			แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองไดโอด		
	ค่าความผิดพลาดของ กระแส (%)	ค่าความผิดพลาดของ แรงดัน (%)	ค่าความผิดพลาดของ กำลัง (%)	ค่าความผิดพลาดของ กระแส (%)	ค่าความผิดพลาดของ แรงดัน (%)	ค่าความผิดพลาดของ กำลัง (%)
13/2/2556	6.192	4.561	7.933	4.195	6.779	6.035
14/2/2556	9.722	2.131	9.090	4.518	6.007	7.528
16/2/2556	6.913	2.369	7.085	4.612	6.230	6.045
17/2/2556	13.050	5.626	11.391	3.477	9.807	10.198
18/2/2556	15.202	4.561	13.119	5.142	10.359	12.924
19/2/2556	12.092	4.938	10.311	7.562	10.138	9.614
20/2/2556	7.931	2.103	7.016	2.822	5.629	5.572
21/2/2556	6.533	1.997	6.437	5.008	6.104	6.073
22/2/2556	6.368	2.079	5.612	3.791	6.407	4.277
23/2/2556	9.623	3.868	6.956	5.345	10.345	5.833
24/2/2556	12.206	4.065	10.644	5.535	10.876	8.922

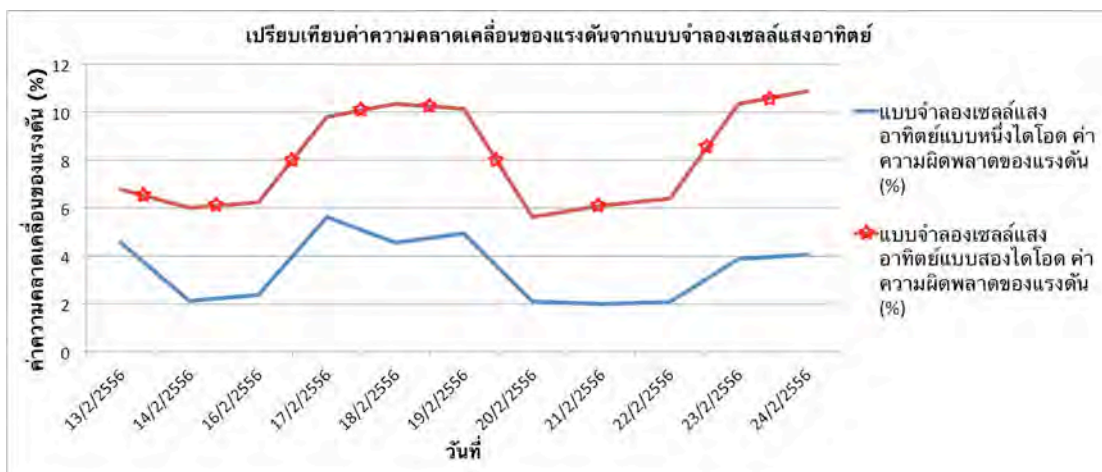
จากตารางที่ 11.2 จะพบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของ การเปรียบเทียบค่าของกระแสจากการตรวจวัดจริงกับค่ากระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลอง หรือกล่าวคือค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีความแม่นยำกว่าค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด โดยค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3.201% - 13.801% ในขณะที่ค่าของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 2.822% - 9.971% และจะพบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของ การเปรียบเทียบค่าของแรงดันจากการตรวจวัดจริงกับค่าแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลอง หรือกล่าวคือค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะมีความแม่นยำกว่าค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด โดยค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 2.079% - 11.467% ในขณะที่ค่าของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.629% - 14.136% และจะพบว่าค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด โดยค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 5.612% - 12.924% ในขณะที่ค่าของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 4.227% - 14.774% ซึ่งหากพิจารณาเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [22] ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า คือ 2.5% 3% และ 5% ตามลำดับจะพบว่าค่าของกระแสที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต ค่าของแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่างานวิจัยในอดีตเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้นนั้นมีค่าลดลงกว่างานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

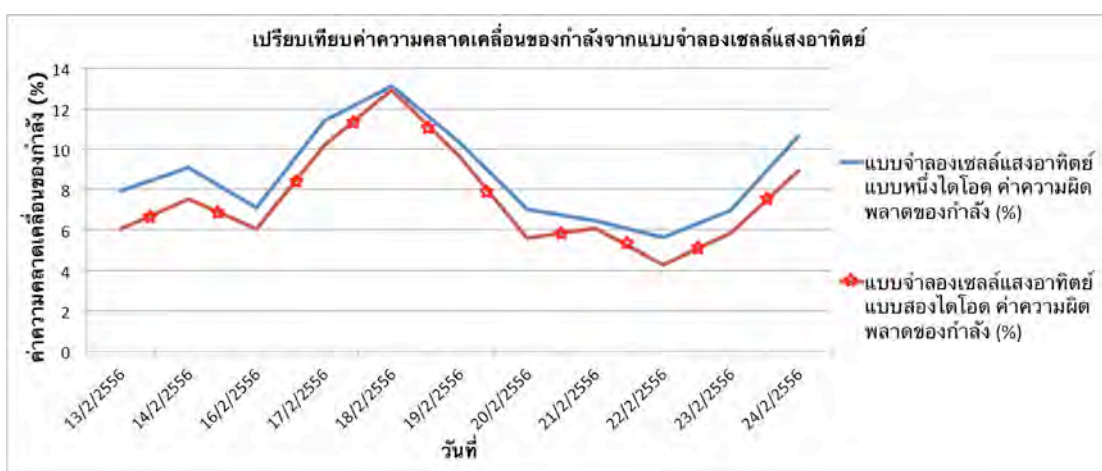
และเมื่อนำค่าของความคลาดเคลื่อนในแต่ละวันมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความคลาดเคลื่อนและวันที่ทำการคำนวณ จะได้ดังรูปที่ 11.24 ถึงรูปที่ 11.26



รูปที่ 11.24 ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสที่คำนวณได้จากแบบจำลองในแต่ละวัน



รูปที่ 11.25 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่คำนวณได้จากแบบจำลองในแต่ละวัน



รูปที่ 11.26 ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองในแต่ละวัน

และจากรูปที่ 11.24 ถึงรูปที่ 11.26 จะพบว่าแนวโน้มของค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ยังคงมีอยู่แม้ว่าจะใช้แบบจำลองที่มีการคำนวณในทางคณิตศาสตร์อย่างแม่นยำเพียงใดก็ตาม อันเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ ได้แก่

- ผลจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 7 % เพราะเครื่องมือในการตรวจวัดความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กโมดูลหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมากและทำการปรับตั้งค่าจากห้องปฏิบัติการอย่างเที่ยงตรง โดยมีหลักการตรวจวัดแสง คือ ทำการเปรียบเทียบค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวัดและค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องมือตรวจวัดแสง แล้วจึงทำการคำนวณกลับเป็นปริมาณความเข้มแสง [39]
- ผลของความผิดพลาดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากอัตราการเสื่อมสภาพ ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ลดลงกว่าที่ควร ในสภาพแวดล้อมเดิม
- ผลของฝุ่นละอองที่ตกค้างบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% เนื่องจากจะให้โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบลดน้อยลงจากการบดบังของฝุ่นละออง ในขณะที่เครื่องมือตรวจวัดค่าความเข้มแสงยังคงแสดงค่าความเข้มแสงที่สภาพแวดล้อมจริง

## 11.2 การเปรียบเทียบผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีหลักการและทฤษฎีพื้นฐานดังที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 2 และใช้วิธีการคำนวณดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 6

อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของระบบทดสอบคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้นเป็นระบบทดสอบที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีรายละเอียดดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 9 คือ ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพียง 10 โมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นจึงไม่สามารถศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดในกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกันแบบขนานได้ ในหัวข้อนี้จึงทำการ

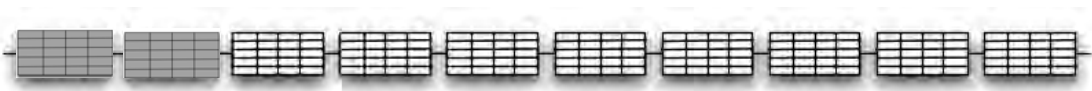
ทดสอบเพียงกรณีศึกษาที่ 1 ที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 10 คือ กรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกบังแสงแดดเพียง 2 โมดูลจากจำนวนทั้งหมด 10 โมดูล และเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ตรวจวัด คือ อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงมีเพียงชิ้นเดียว จึงไม่สามารถทำการตรวจวัดความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังแสงแดดและค่าความเข้มแสงจริงพร้อมกันได้ ทำให้ต้องมีการออกแบบการทดลองซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

สำหรับหัวข้อนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 ส่วนย่อยดังนี้ คือ

- รายละเอียดของการทดลอง
- ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลการทดลอง
- ผลการเปรียบเทียบ

#### • รายละเอียดของการทดลอง

สำหรับการทดลองการบังแสงแดดของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ จะเริ่มจากทำความเข้าใจสถานะของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดผลของฝุ่นละอองแล้วจึงทำการบังแสงแดดเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) จำนวน 2 โมดูลและเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์อีก 8 โมดูลแบบอนุกรมรวมทั้งสิ้น 10 โมดูลในหนึ่งสตริง โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังรูปที่ 11.27 ทำการทดสอบ ณ ระบบทดสอบอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ณ วันที่ 15 มกราคม 2556 ถึงวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2556



รูปที่ 11.27 ลักษณะของสตริงเมื่อเกิดการบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 โมดูล

และเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิมีเพียงชิ้นเดียว ทำให้ไม่สามารถวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังแสงแดดและส่วนที่ไม่ถูกบังแสงแดดพร้อมๆกันได้ จึงออกแบบการทดลองโดยถือว่าค่าของอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังแสงแดดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ถูกบังแสงแดด และใช้ฟิล์มกรองแสงของบริษัท 3M รุ่น FX-HP30 ที่มีความสามารถในการสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 45 % [43] ติดแนบบนโมดูลเซลล์แสง

อาทิตย์จำนวน 2 โมดูลแล้วใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงตรวจวัดค่าความเข้มแสง ส่วนที่ไม่โดนบังแสงแดด จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความเข้มแสงที่ผ่านฟิล์มกรองแสงเป็นค่าความเข้มแสงส่วนที่โดนบังแสงแดดได้ โดยมีรูปประกอบการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 11.28

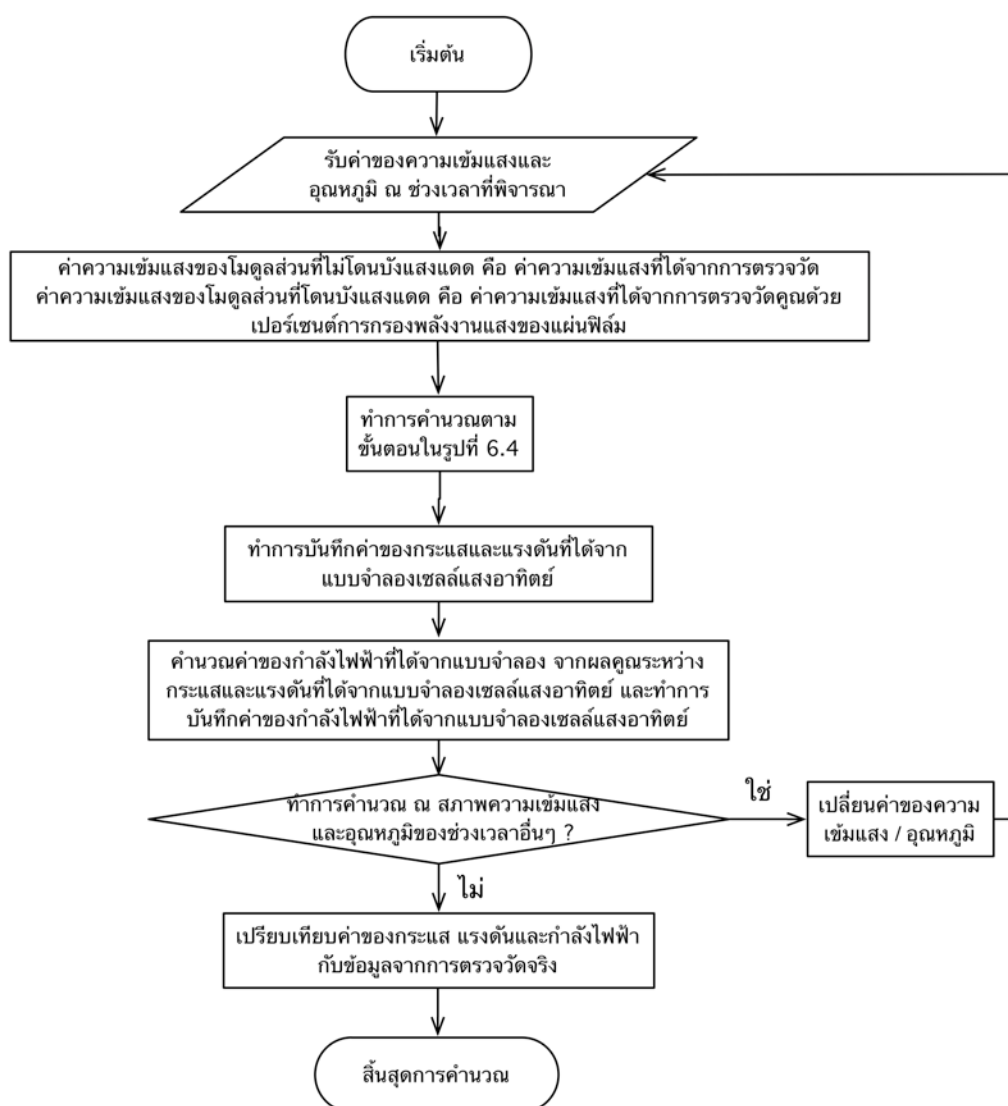


รูปที่ 11.28 การทดลองผลกระทบของการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์

#### • ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลการทดลอง

สำหรับการเปรียบเทียบผลของการบังแสงแดดในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลของค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ที่ได้จากการตรวจวัดจากระบบทดสอบที่ทำการบังแสงแดดกับค่าของ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เฉพาะแบบสองไดโอดโดยพิจารณาสภาพการบังแสงแดดร่วมด้วย ในช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ และทำงานในโหมด MPP ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าในทุกๆ 5 นาที แล้วจึงคิดค่าเฉลี่ยของความแม่นยำของแบบจำลองในแต่ละวันออกมา โดยขั้นตอนการคำนวณค่าของ

กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น จะทำการคำนวณโดยใช้หลักการที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 6 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดได้ดังรูปที่ 11.29



รูปที่ 11.29 ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดและค่าที่คำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

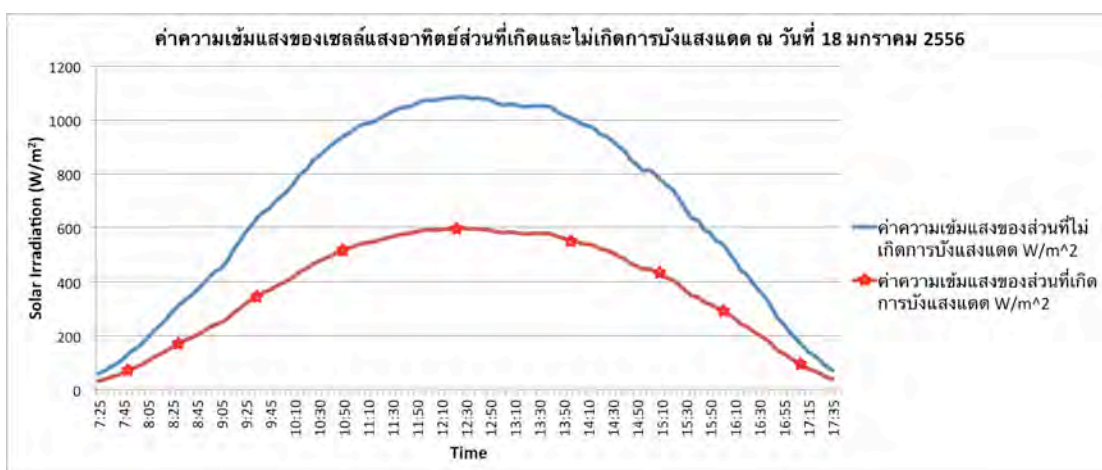


- ขั้นตอนที่ 1 : รับข้อมูลของสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาที่ต้องการคำนวณ
- ขั้นตอนที่ 2 : ทำการคำนวณค่าความเข้มแสงโดย
- ค่าความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดด คือ ค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้
  - ค่าความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่เกิดการบังแสงแดด คือ ค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้คูณด้วยเปอร์เซ็นต์การกรองพลังงานแสงของฟิล์ม
- ขั้นตอนที่ 3 : ทำการคำนวณตามขั้นตอนในรูปที่ 6.4
- ขั้นตอนที่ 4 : ทำการบันทึกค่าของกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา
- ขั้นตอนที่ 5 : ทำการคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา และบันทึกค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- ขั้นตอนที่ 6 : - หากต้องการทำการคำนวณอีกครั้ง ณ สภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิค่าใหม่ ที่ช่วงเวลาอื่นๆ ให้รับค่าของความเข้มแสงและอุณหภูมิค่าใหม่ ณ ช่วงเวลาที่ต้องการแล้วกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1
- หากไม่ต้องการคำนวณเพิ่มเติม ให้เข้าสู่ขั้นตอนที่ 6
- ขั้นตอนที่ 7 : ทำการเปรียบเทียบค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง
- ขั้นตอนที่ 8 : สิ้นสุดการคำนวณ

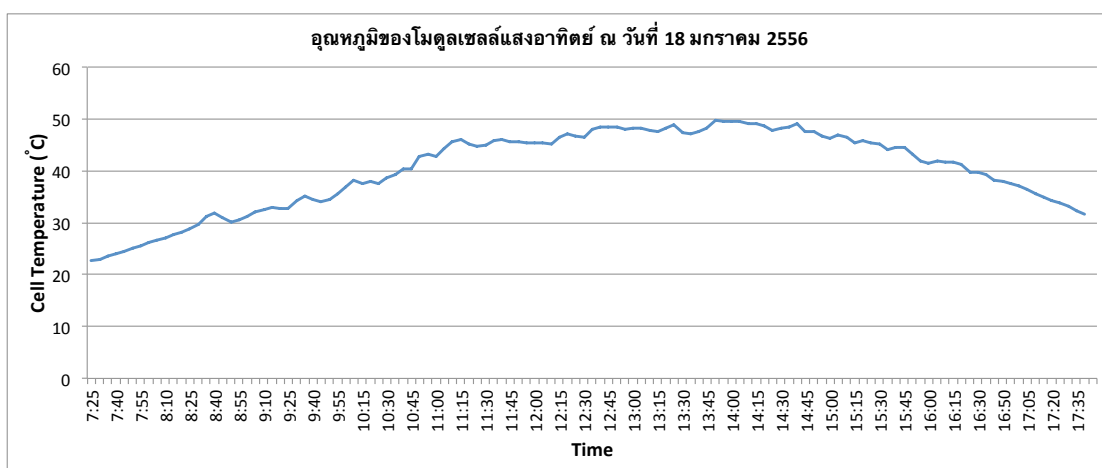
#### • ผลการเปรียบเทียบ

สำหรับการเปรียบเทียบผลการบังแสงแดดต่อเซลล์แสงอาทิตย์นี้ จะยกตัวอย่างของข้อมูลการบังแสงแดด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556 อย่างละเอียดเพียงหนึ่งวัน

เริ่มจากการพิจารณาข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิในหนึ่งวัน รูปที่ 11.30 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และรูปที่ 11.31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์กับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของวันที่ 18 มกราคม 2556



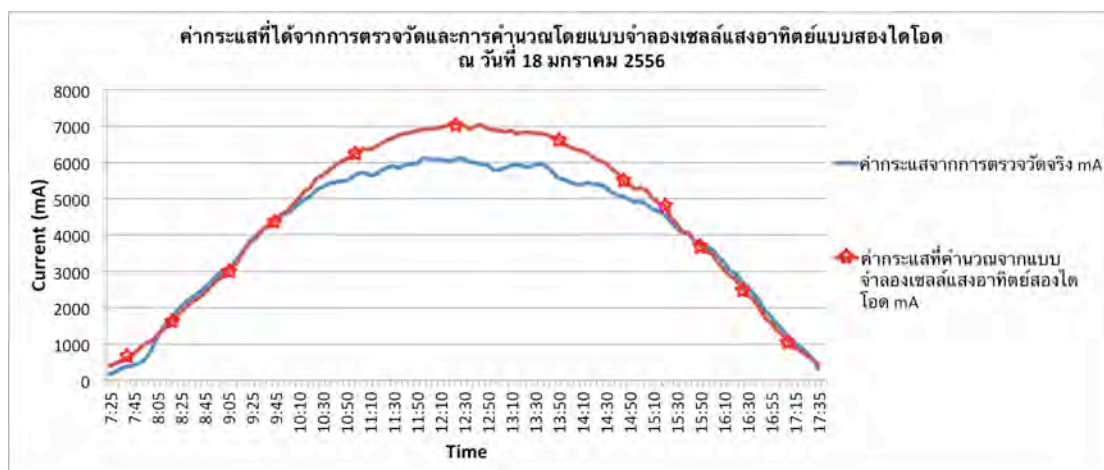
รูปที่ 11.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556



รูปที่ 11.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์กับเวลาที่บันทึกได้จากระบบทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดการบังแสงแดด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556

รูปที่ 11.30 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดด (เส้นบน) และความสัมพันธ์ของความเข้มแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนที่เกิดการบังแสงแดด (เส้นล่าง) จะพบว่า การเพิ่มขึ้นและลดลงของความเข้มแสงมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เพราะเป็นระบบทดสอบที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน (พื้นที่เดียวกัน) เพียงแต่มีบางส่วนที่ได้รับความเข้มแสงลดลงเนื่องจากผลของการบังแสงแดดนั่นเอง

และรูปที่ 11.32 รูปที่ 11.33 และรูปที่ 11.34 นั้นจะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดตามลำดับ



รูปที่ 11.32 การเปรียบเทียบค่าของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556



รูปที่ 11.33 การเปรียบเทียบค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556



รูปที่ 11.34 การเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ณ วันที่ 18 มกราคม 2556

จากรูปที่ 11.32 จะพบว่าค่าของกระแสที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงในช่วงเวลาเช้าและเย็น เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียังค่าความเข้มแสงน้อย ทำให้ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่ากระแสที่ผลิตได้มีค่าน้อย ในขณะที่ค่าของกระแสที่ได้จากการคำนวณในช่วงเวลากลางวันจะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในช่วงเวลาเช้าและเย็น เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่ากระแสมีค่ามาก โดยพิจารณาจากสมการที่ (4.27) จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของกระแสไฟโตอิเล็กทริกส์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ตรวจวัด

ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้ต้องมีการประมาณให้อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่เกิดการบังแสงแดดและส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดดมีค่าเท่ากัน จึงทำให้ผลการคำนวณจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคลาดเคลื่อน โดยค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงดังรูปที่ 11.31 นั้นเอง โดยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของกระแสที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่า 14.377 %

จากรูปที่ 11.33 จะพบว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริง เนื่องจากเหตุผลเดียวกับการเกิดความคลาดเคลื่อนของกระแสดังที่ได้กล่าวไป แต่จากสมการที่ (2.10) จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของแรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลง จึงทำให้ค่าของแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดมีค่ามากกว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 11.32 นั้นเอง โดยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่า 11.230 %

จากรูปที่ 11.34 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่า 11.066 %

จากการเปรียบเทียบค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดและค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้น จะพบว่ายังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ เนื่องจากการออกแบบการทดลองนั้นมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวไป และผลของการคำนวณแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดนี้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดลองนี้ออกแบบให้สามารถจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม PVSYST ได้ด้วย โดยในส่วนนี้จะเป็นการตรวจเช็คผลของการบังแสงแดดภายใต้สภาวะการบังแสงแดดเดียวกันกับการทดลองกับระบบทดสอบ (ดังแสดงในรูปที่ 11.27) โดยจะยกตัวอย่างเพียงผลของการบังแสงแดดได้เพียงสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิมาตรฐาน คือ  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่  $25^\circ\text{C}$  (STC) เท่านั้น และผลการจำลองจากโปรแกรม PVSYST กับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ในตารางที่ 11.3

ตารางที่ 11.3 ผลของการจำลองการบังแสงแดดต่อระบบทดสอบ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลอง	ค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดการบังแสงแดด (W)	ค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อไม่เกิดการบังแสงแดด (W)	ร้อยละของกำลังสูญเสีย (%)
โปรแกรม PVSYST	957	1209	20.8
แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดที่พัฒนาขึ้น	817.753	1022.19	19.996

จากตารางที่ 11.3 จะพบว่าผลของการคำนวณจุดทำงานกำลังสูงสุดด้วยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นจะมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม PVSYST อยู่ เนื่องจากขั้นตอนการคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์พื้นฐาน คือ ค่าความต้านทานสมมูลต่ออนุกรม ( $R_s$ ) และค่าความต้านทานสมมูลต่อขนาน ( $R_p$ ) ที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ฐานข้อมูลของโปรแกรม PVSYST ดังแสดงไว้ในตารางที่ 11.1 อย่างไรก็ตามผลกาคำนวณร้อยละของกำลังสูญเสียเมื่อเกิดการบังแสงแดดเทียบกับกรณีที่ไม่เกิดการบังแสงแดดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่ประมาณ 20 % เนื่องจากการคำนวณผลของการบังแสงแดดโดยวิธีการทางกราฟ (Graphical method) ที่พัฒนาใช้ในแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับวิธีการคำนวณโดยสมการทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรม PVSYST จะให้ผลที่เหมือนกัน

### 11.3 สรุป

ในบทที่ 11 นี้ได้ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยใช้ระบบทดสอบคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นระบบทดสอบขนาดเล็กซึ่งมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ จึงทำให้สามารถทำการทดลองตรวจวัดจริงได้เพียงบางกรณีศึกษา

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองนั้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ในสภาวะมาตรฐาน (STC) จะพบว่ากระบวนการคำนวณของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดจะให้ค่าพารามิเตอร์ที่แม่นยำกว่าการใช้กระบวนการคำนวณของแบบจำลองแบบสองไดโอด ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และ

กำลังไฟฟ้ากับแรงดันของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดเมื่อเทียบกับ ข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าผลจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แบบสองไดโอด

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองในบทนี้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดในสภาวะปกติเมื่อเทียบกับผลจากการตรวจวัดจริง

และในสภาวะที่เกิดการบังแสงแดดนั้น แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสอง ไดโอดและวิธีการหาค่าจุดทำงานกำลังสูงสุดที่พัฒนาขึ้น สามารถคำนวณหาจุดทำงาน และค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าได้ โดยสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย ออกมาได้ใกล้เคียงกับผลจากโปรแกรม PVSYST ที่เป็นโปรแกรมที่ใช้จริงในทาง ปฏิบัติ

## บทที่ 12 สรุปวิทยานิพนธ์

ในบทนี้จะเป็นการสรุปงานวิจัยทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 2 หัวข้อ คือ

- (1) สรุป
- (2) ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

### 12.1 สรุป

สำหรับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วยงานวิจัยหลัก 6 ส่วน คือ

1) ส่วนแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดและแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตนั้นยังไม่เพียงพอสำหรับการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบหนึ่งไดโอดและแบบสองไดโอด จึงต้องมีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบจะมีส่วนประกอบและพารามิเตอร์ที่ต้องการไม่เท่ากัน จึงทำให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละแบบมีวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ไม่เท่ากัน โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดจะมีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่า เนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ที่มากกว่า จึงต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์บางค่า เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดเป็นหลัก เนื่องจากมีความแม่นยำสูงกว่าในช่วงที่ค่าความเข้มแสงน้อย

อย่างไรก็ตามแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นนี้ เมื่อสามารถคำนวณพารามิเตอร์ที่จำเป็นได้ครบแล้ว สามารถใช้คำนวณค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตได้ ภายใต้สภาวะความเข้มแสงและอุณหภูมิที่กำหนด

2) ส่วนแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด ซึ่งเป็นการนำแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมาทำการปรับปรุงเพื่อให้สามารถคำนวณจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดดด้วยวิธีการทางกราฟเพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณที่ซับซ้อน และทำการการแบ่งอาเรย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี



รูปแบบการบังแสงแดดเหมือนกันเป็นกลุ่มเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา โดยพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์แยกเป็นส่วนที่เกิดการบังแสงแดดและส่วนที่ไม่เกิดการบังแสงแดด นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้น โดยพิจารณาเฉพาะกรณีที่โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์มีการติดตั้งบายพาสไดโอดแล้ว

3) ส่วนแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดผลความแตกต่างของแผง ซึ่งเป็นการนำแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดมาทำการปรับปรุง เพื่อให้สามารถคำนวณจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของแผงด้วยวิธีการทางกราฟเพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณที่ซับซ้อน โดยพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์แยกเป็นส่วนที่มีคุณลักษณะเหมือนกันให้เป็นกลุ่มเดียวกัน นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อเกิดผลของความแตกต่างของแผงขึ้น

4) ส่วนคำนวณจุดทำงานกำลังสูงสุดเมื่อเกิดจุดยอดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด เนื่องจากผลของการบังแสงแดดและผลของความแตกต่างของแผงจะทำให้กราฟคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันมีค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าหนึ่งจุด (จากปกติที่มีเพียงหนึ่งจุด) ซึ่งในกระบวนการหาค่าของจุดทำงานกำลังสูงสุดในอินเวอร์เตอร์ทั่วไป เช่น กระบวนการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) นั้นอาจไม่สามารถค้นหาจุดทำงานทำงานที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ อีกทั้งยังมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการคำนวณจุดทำงานกำลังสูงสุดโดยนำผลที่ได้จากส่วนของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการวาดกราฟแล้วใช้หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้า ศึกษาค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาที่ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

5) ส่วนเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งไม่สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม คือ อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลง โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบไปด้วย ส่วนไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนอินเวอร์เตอร์ และส่วนไฟฟ้ากระแสสลับโดยพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อเข้าสู่ระบบทดสอบและพิจารณาโหมดการทำงานต่างๆของอินเวอร์เตอร์ในโหมด PV และโหมด PQ ที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับจุดต่างๆในระบบทดสอบ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆและคำนวณร่วมกับการไหลของกำลังไฟฟ้า

6) ส่วนเปรียบเทียบผล ซึ่งเป็นส่วนตรวจสอบผลของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำผลจากการตรวจวัดจริงและผลจากโปรแกรม PVSYST มาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อตรวจสอบระดับความแม่นยำของผลการคำนวณ

## 12.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ควรจะมีการปรับปรุงวิธีการคำนวณเพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น หรืออาจทำการเปรียบเทียบผลของการคำนวณจากวิธีต่างๆ เปรียบเทียบกัน
2. ควรมีการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน เพื่อให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติได้อย่างกว้างขวาง
3. สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติควรพิจารณาผลของ Dark current ด้วย
4. สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด ควรมีการปรับปรุงค่าของแฟกเตอร์อุดมคติ (Ideality factor) ของไดโอดตัวที่สอง และมีการวิเคราะห์หาค่าของแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดตัวที่สองที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ
5. ควรมีการทดลองกับระบบทดสอบที่มีอุปกรณ์ตรวจวัดที่เพียงพอและมีขนาดของระบบทดสอบที่ใหญ่ขึ้น เพื่อศึกษาผลจากการตรวจวัด ทั้งในสภาพปกติ สภาพที่เกิดการบังแสงแดด และสภาพที่เกิดผลของความแตกต่างของแผง รวมถึงมีการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองได้ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองที่แม่นยำมากขึ้น
6. ส่วนเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า มีการศึกษาค่าพารามิเตอร์จริงของระบบทดสอบ เช่น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอินเวอร์เตอร์และหม้อแปลง
7. ควรมีกระบวนการคำนวณการค้นหาจุดทำงานกำลังสูงสุดเมื่อเกิดการบังแสงแดด และผลของความแตกต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในวิธีต่างๆเพื่อเปรียบเทียบผลของการคำนวณ

## รายการอ้างอิง

- [1] พลังงาน, กระทรวง. พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย 2542. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html> [4 สิงหาคม 2555]
- [2] พลังงาน, กระทรวง. แหล่งพลังงานต่างๆของประเทศไทย การวางตำแหน่งเชิงยุทธศาสตร์เพื่ออนาคต 2549. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://old.energy.go.th/moen/upload/File/energy%20info/5\\_1.pdf](http://old.energy.go.th/moen/upload/File/energy%20info/5_1.pdf) [4 สิงหาคม 2555]
- [3] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน),. ข้อมูลพลังงานรอบรู้ก๊าซธรรมชาติ 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pttplc.com/Files/Document/Pdf/Gas/Gas2.pdf> [4 สิงหาคม 2555]
- [4] พลังงาน, กระทรวง. นโยบายพลังงานของประเทศไทย 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://old.energy.go.th/moen/upload/File/energy%20info/5\\_1.pdf](http://old.energy.go.th/moen/upload/File/energy%20info/5_1.pdf) [4 สิงหาคม 2555]
- [5] Solarbuzz ,Part of the NPD Group,. *Solarbuzz Retail Pricing Environment*, 2555. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment> [19 กุมภาพันธ์ 2555]
- [6] Document, Palangthai. ข้อเสนอแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (PDP2012)., 2555. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.palangthai.org/docs/PDP2012-Thai.pdf> [21 กันยายน 2555]
- [7] Masters, Gilbert M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power System*, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.

- [8] Streetman, Ben G. (2006), Sanjay Kumar Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 6th Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- [9] Ramos Hernanz, JA., Campayo Martín, J.J., Zamora Belver, I., Larrañaga Lesaka, J., Zulueta Guerrero, E. Puelles Pérez, E., *Modeling of Photovoltaic Module*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality(ICREPQ10), 2010.
- [10] E.M.G. Rodrigues, R. Melício<sup>1,2</sup>, V.M.F. Mendes and J.P.S. Catalão, *Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality(ICREPQ11), 2011.
- [11] Abir Chatterjee, Ali Keyhani, Dhruv Kapoor, *Identification of Photovoltaic Source Models*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, Page 883-889, 2011.
- [12] Adolpho Cezar Moreira Soares, Eduardo Vieira, Marcio Mendes Casaro, *SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC MODEL USING BISECTION METHOD*, Power Electronics Conference(COBEP), Page 807-8011, 2011.
- [13] A. Durgadevi, S. Arulselvi, S.P.Natarajan, *Photovoltaic Modeling and Its Characteristics*, Emerging Trends in Electrical and Computer Technology(ICETECT), Page 469-475, 2011.
- [14] Geoff Walker, *EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL*, Journal of Electrical and Electronics Engineering, Page 49-56, 2001.

- [15] Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, *PV panel model based on datasheet values*, Industrial Electronics IEEE International Symposium on, Page 2392-2396, 2007.
- [16] R.Ramaprabha, B.L.Mathur, *MATLAB based Modelling to Study the Influence of Shading on Series Connected SPVA*, Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), Page 30-34, 2009.
- [17] Hiren Patel, Vivek Agarwal, *MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Page 302-310, 2008.
- [18] S. Moballegh, J. Jiang, *Partial Shading Modeling of Photovoltaic System with Experimental Validations*, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, Page 1-9, 2011.
- [19] G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli, *A model of mismatched photovoltaic fields for simulating hybrid solar vehicles*, 2nd International Workshop on Hybrid and Solar Vehicles, 2007.
- [20] J.D. Bastidas, C.A. Ramos-Paja, E. Franco, G. Spagnuolo, G. Petrone, *Modeling of photovoltaic fields in mismatching conditions by means of inflection voltages*, Engineering Applications (WEA), 2012 Workshop on, Page 1-6, 2012.
- [21] Po-Wen Hsiao, Chih-Hao Chang, Huan-Liang Tsai, *Accuracy Improvement of Practical PV Model*, SICE Annual Conference, Page 2725-2730, 2010.

- [22] D. L. King, B. R. Hansen, J. A. Kratochvil, and M. A. Quintana, *Dark Current-Voltage Measurements on Photovoltaic Modules as a Diagnostic or Manufacturing Tool*, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Page 1125-1128, 1997.
- [23] Chan,D.S.H., Phang,J.C.H., *Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics*, Electron Devices IEEE Transactions on, Page 286-293, 1987.
- [24] Zhao Ran, Xu Hui-jun, Zhao Zhi-ying, Zhang Shun-hua, *A Simplified Double-Exponential Model of Potovoltaic Module in Matlab*, Energy and Enviroment Technology, Page 157-160, 2009.
- [25] Kashif Ishaque, Zainal Salam, Hamed Taheri, *Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model*, Power Electronics Drives and Energy System(PEDES), Page 1-5, 2010.
- [26] Wang Yi-Bo, Wu Chun-Sheng, Liao Hua, Xu Hong-Hua, *Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System*, Industrial Technology ICIT IEEE Conference on, Page 1-6, 2008.
- [27] บริษัท พรีเมียมโซลาร์เซลล์ จำกัด. *หลักการทำงานของโซลาร์เซลล์*. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.premiumsolarcell.com/บทความโซลาร์เซลล์/การทำงานของโซลาร์เซลล์.html> [7 สิงหาคม 2555]
- [28] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. *การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์*. 2543. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html> [6 สิงหาคม 2555]

- [29] บริษัท ลีโอนิกส์ จำกัด. *ความรู้เซลล์แสงอาทิตย์*. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: [http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar\\_knowledge.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php) [6 สิงหาคม 2555]
- [30] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. *เซลล์แสงอาทิตย์: ข้อดี ข้อเสีย*. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.nstda.or.th/sci-kids-menu/2326-solar-cell-advantage-disadvantage> [6 สิงหาคม 2555]
- [31] Kyocera. *KC200GT Photovoltaic Module Datasheet*. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf> [17 สิงหาคม 2555]
- [32] บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน). *Multi-Crystalline Silicon Solar Modules 130 Watt SP130*. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: [http://www.solartron.co.th/Catalog/SP130\\_TH.pdf](http://www.solartron.co.th/Catalog/SP130_TH.pdf) [17 สิงหาคม 2555]
- [33] Solar Cell Sales. *Technic Information Shell SP70*. [ออนไลน์]. 2548. [http://www.solarcellsales.com/techinfo/docs/Shell\\_SP70.pdf](http://www.solarcellsales.com/techinfo/docs/Shell_SP70.pdf) [17 สิงหาคม 2555]
- [34] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์*, 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell\\_pg5.htm](http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_pg5.htm) [19 สิงหาคม 2555]
- [35] Wang NianCHun, Sun Zuo, Yukita, K., Goto, Y. and Ichiyanagi, K. *Research of PV Model and MPPT Methods in Matlab*. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Page 1 – 4. 2010.

- [36] PVEDUCATION,. *Double Diode Model*, 2008. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://pvcdrom.pveducation.org/CHARACT/double.HTM> [19 สิงหาคม 2555]
- [37] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,. *เซลล์แสงอาทิตย์*, 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> [4 กันยายน 2555]
- [38] Ratna Ika Putri and M. Rifa'i, Liao Hua, Xu Hong-Hua, *Tracking the Maximum Power Point of Photovoltaic System Using Neural-Fuzzy Controller*, Industrial Electronic, IEEE Transactions on , Page 749-758, 2003.
- [39] บริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน). *Sunny Boy 1300TL/1600TL/2100TL user's manual*. 2548. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://files.sma.de/dl/5684/SB1600TL-DEN123015.pdf> [30 กันยายน 2555]
- [40] ไศรฎา แข็งการ และกนต์ธร ชำนิประศาสน์, *การใช้ MATLAB สำหรับงานทางวิศวกรรม*. ฉบับ. ปรับปรุงครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [41] Founder,. Functionalities,. *PVSyST*, 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pvsyst.com/en/software/functionalities> [4 ธันวาคม 2555]
- [42] SAM,. NREL,. *Welcome to SAM*, 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://sam.nrel.gov/> [14 ธันวาคม 2555]
- [43] Product and Services,. Product Catalogue,. *Automotive window film*,. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://catalogue.3m.eu/en\\_EU/EU-awf/Automotive\\_Window\\_Films/3M\\_FX-HP\\_Series/td%7EAutomotive\\_Window\\_Film%7EFX-HP\\_30/Automotive\\_Window\\_Film](http://catalogue.3m.eu/en_EU/EU-awf/Automotive_Window_Films/3M_FX-HP_Series/td%7EAutomotive_Window_Film%7EFX-HP_30/Automotive_Window_Film) [12 สิงหาคม 2555]



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพดล ชวนไชยะกุล เกิดเมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชวินิต มัธยมเมื่อปีพ.ศ. 2551 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตที่คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในช่วงปีพ.ศ. 2551 ถึง 2555 และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2555

ในระหว่างที่ศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิตนั้น นายนพดล ชวนไชยะกุล ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัยในห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง (Power System Research Laboratory: PSRL) ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในงานวิจัยและโครงการต่างๆดังนี้ คือ (1) โครงการศึกษาและพัฒนาระบบโครงข่าย ไฟฟ้าอัจฉริยะของประเทศไทยโดยสำนักนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติ (สนพ.) และ (2) โครงการศึกษาทบทวนระบบเชื่อมโยงโครงข่ายไฟฟ้าภายในประเทศโดย สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานแห่งชาติ (สกพ.)

นอกจากนี้ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมทาง วิชาการ 1 แห่ง คือ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference ครั้งที่ 34) (EECON 34)