

การศึกษาแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

THE STUDY OF MODELING AND SIMULATION OF PV MODULE OUTPUT  
BY MATLAB/SIMULINK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-084

การศึกษาแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

THE STUDY OF MODELING AND SIMULATION OF PV MODULE OUTPUT  
BY MATLAB/SIMULINK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF MODELING AND SIMULATION OF PV MODULE  
OUTPUT BY MATLAB/SIMULINK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

KMITL-2016-EN-M-043-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม  
MATLAB/SIMULINK

Thesis Title The Study of Modeling and Simulation of PV Module Output by  
MATLAB/SIMULINK

นักศึกษา นายเอกวัฒน์ บุพิ

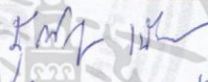
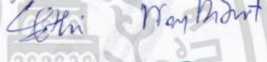


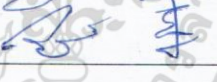
รหัสประจำตัว 57601189

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ รุติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-084

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	รุติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ยินดีให้บริการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ารนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
นักศึกษา	นายเอกวัฒน์ บุพิ
รหัสนักศึกษา	57601189
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อนำมาจำลองการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถเปรียบเทียบการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink กับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการสร้างแบบจำลองได้เริ่มศึกษาจากวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด ซึ่งกระบวนการทำงานของวงจรนี้เปรียบเสมือนเป็นการทำงานของเซลล์ โดยวิเคราะห์วงจรตามกฎของ Kirchhoff law จึงได้สมการแสดงคุณสมบัติทางกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) เป็นสมการตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อทำการสร้างแบบจำลองสำเร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองว่ามีประสิทธิภาพในการจำลองมากแค่ไหน โดยทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากแบบจำลองข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าและแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากหลายชนิด โดยผ่านเงื่อนไขการจำลองในสถานะแวดล้อมต่าง ๆ คือ เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน และเมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิคงที่ จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ ชนิด ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 1.04 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจากโรงงาน ตามช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ 0 – 5 เปอร์เซ็นต์ และแบบจำลองนี้มีจุดเด่น คือ สามารถทำนายการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในย่านที่มีความเข้มแสงสูง และอุณหภูมิสูง ได้อย่างแม่นยำ ในอนาคตแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ยังสามารถพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเพิ่มจำนวนแผง และ เพิ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เข้าไปในแบบจำลอง จะส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในทุกสถานะแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	The Study Of Modeling And Simulation Of PV Module Output By MATLAB/SIMULINK
<b>Student</b>	Mr. Aekkawat Bupi
<b>Student ID</b>	57601189
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

## ABSTRACT

This thesis presents a model for the production of electricity from solar cell by Matlab / Simulink program. This Program can be simulated the production of electricity which will get the result equivalent to the actual in efficiently. This modeling has started to study the equivalent circuit in one diode which a function of cell representation to analyzing the circuit by Kirchhoff's law, then getting an equation which shows the characteristics of current and voltage on the solar cells in the form of Exponential equation is the initial equation for the production of electricity model from solar cell by Matlab / Simulink program. The next step is to test the performance of the model by using various type of solar cell. The demonstration of this model can be used with various types of solar cells. By two conditions, light and temperature variable, otherwise light intensity and temperature constant. The result shown this model can predict the production of electricity from solar cell in accurately. The percentage error is between 0.2 – 1.04 percent and compare with industrial factory is 0- 5 percent of error. This model can simulate to high light intensity and high temperature zone, in the future this model can be developed the prediction accurately by increase cell and increase variable effect to cell into the model.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาทาง  
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ จิตติรุ่งเรือง ชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจน  
ให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการ  
ดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง,  
ดร. โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ และ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์  
ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. กอบศักดิ์ ศรีประภา, นายทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ และนักวิจัยจาก  
ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์  
แห่งชาติ (NECTEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลอง  
ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และรุ่นน้องในศูนย์วิจัย ERC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน  
สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ทุ่มเทร่างกายแรงใจ สนับสนุนข้าพเจ้าทั้งใน  
ด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุก  
ท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการ  
ทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

เอกวัฒน์ บุพิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด...อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XI
รายการสัญลักษณ์.....	XII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 แนวทางการศึกษาในงานวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.1.2 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว.....	8
2.1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก.....	9
2.1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเกล็ดเลียมมาเซไนต์.....	9
2.1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง.....	9
2.1.2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน.....	10
2.1.2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์.....	10
2.1.2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS.....	11
2.1.3 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์.....	11
2.2 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.3 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.4 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อสมการแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของ วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	19
2.7 การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.7.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Standalone system) .....	21
2.7.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)	22
2.7.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) .....	23
บทที่ 3 กระบวนการสร้าง .....	24
3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ .....	24
3.1.1 สร้างแบบจำลองจากวงจรพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอาศัยวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	25
3.1.1.1 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_{ph}$ .....	26
3.1.1.2 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_0$ .....	27
3.1.1.3 แบบจำลองพารามิเตอร์ $R_s$ และ $R_{sh}$ .....	29
3.1.1.4 แบบจำลองกระแสไฟฟ้า.....	30
3.1.2 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink .....	30
3.1.3 การแสดงผลของแบบจำลอง .....	31
3.1.3.1 ค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
3.1.3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	32
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง .....	35
4.1 วิธีการทดลอง.....	35
4.2 ผลการทดลอง .....	37
4.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon, Mono-Si) .....	38
4.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon, Poly-Si) .....	41
4.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon, a-Si).....	44
4.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมสelenium (Copper Indium Selenide, CIS).....	47
4.2.5 HIT (Heterostructure with Intrinsic Thin Layer) Solar cell.....	50
4.2.6 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ .....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	55
เอกสารอ้างอิง .....	57
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก. การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ .....	62
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	68
ภาคผนวก ค. ใบอนุญาตในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย .....	3
2.1 ค่า Ideal factor.....	14
3.1 ค่า Ideal factor Diode.....	26
4.1 ข้อมูลจำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ STC.....	35
4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC.....	38
4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C.....	39
4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ 1000 W/m <sup>2</sup> .....	40
4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC.....	41
4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C.....	42
4.7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ 1000 W/m <sup>2</sup> .....	43
4.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC.....	44
4.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C.....	45
4.10 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ 1000 W/m <sup>2</sup> .....	46
4.11 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนด์ ที่ STC.....	47
4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนด์ ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนด์ ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ $1000 \text{ W/m}^2$ .....	49
4.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC.....	50
4.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิกงที่ เท่ากับ $25 \text{ C}$ .....	51
4.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ $1000 \text{ W/m}^2$ .....	52
4.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่ STC .....	53
4.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิกงที่ เท่ากับ $25 \text{ C}$ .....	53
4.19 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ $1000 \text{ W/m}^2$ .....	54
ก-1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ STC.....	62
ก-2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิกงที่ เท่ากับ $25 \text{ C}$ .....	63
ก-3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ $1000 \text{ W/m}^2$ .....	64
ก-4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ STC.....	65
ก-5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิกงที่ เท่ากับ $25 \text{ C}$ .....	66
ก-6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอนที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ $1000 \text{ W/m}^2$ .....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กระบวนการศึกษา แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	2
2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....	6
2.2 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.3 การแบ่งประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.4 ตัวอย่างเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน.....	11
2.5 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ.....	12
2.6 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์วิเคราะห์เชิงอุดมคติ.....	12
2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง.....	15
2.8 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.9 อิทธิพลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานที่มีต่อสมบัติ เอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.10 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
2.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
2.12 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System).....	17
2.13 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System).....	18
2.14 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System).....	19
3.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
3.2 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด.....	25
3.3 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_{ph}$ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	27
3.4 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_0$ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
3.5 แบบจำลองพารามิเตอร์ $R_s$ และ $R_{sh}$ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
3.6 แบบจำลองกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
3.7 แบบจำลองพารามิเตอร์ทั้งหมดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
3.8 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	31
3.9 แบบจำลองแสดงค่าทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	32
3.10 วงจรแปลงสัญญาณแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	32
3.11 แบบจำลองวงจรแปลงสัญญาณแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	33
3.12 แบบจำลองแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลง IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	หน้าต่างแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink..... 34
3.14	แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink..... 34
4.1	ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากโปรแกรม PVSYST..... 36
4.2	แนวโน้มของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน ..... 37
4.3	แนวโน้มของอุณหภูมิ ของการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน ..... 37
4.4	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC..... 38
4.5	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ..... 39
4.6	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 40
4.7	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC ..... 41
4.8	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ..... 42
4.9	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 43
4.10	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC..... 44
4.11	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ..... 45
4.12	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 46
4.13	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ STC..... 47
4.14	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ..... 48
4.15	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 49
4.16	การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC..... 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ.....	51
4.18 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ.....	52
ก-1 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟิสเทนเดม ที่ STC.....	62
ก-2 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟิสเทนเดม ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ .....	63
ก-3 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟิสเทนเดม ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ .....	64
ก-4 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟิสซิลิคอน ที่ STC.....	65
ก-5 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟิสซิลิคอน ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ .....	66
ก-6 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟิสซิลิคอนที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ .....	67

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	เต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
A	Ampere	แอมป์แปร์
V	Volt	โวลต์
STC	Standard test Conditions	การทดสอบมาตรฐาน
W	Watt	วัตต์
m <sup>2</sup>	Square meter	ตารางเมตร
CIS	copper indium diselenide	คอปเปอร์อินเดียม ไดซีลีไนด์
CIGS	copper indium (gallium) diselenide	คอปเปอร์อินเดียม(แกลเลียม) ไดซีลีไนด์
CdTe	cadmium telluride	แคดเมียมเทลลูไรด์
TCO	Transparent conducting oxide	วัสดุออกไซด์ของโลหะที่นำไฟฟ้า
a-Si	amorphous silicon	ซิลิคอนอสัณฐาน
Mono-Si	Monocrystalline Silicon	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว
Poly-Si	Polycrystalline Silicon	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก
HIT	Heterostructure with Intrinsic Thin Layer	
GaAs	Gallium arsenide	แกลเลียมอาเซไนด์
m	meter	เมตร
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
P	Phosphorus	ฟอสฟอรัส
Si	Silicon	ซิลิคอน
STL	Solar Technology Laboratory	ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน แสงอาทิตย์
NECTEC	National Electronics and Computer Technology Center	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดXIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$I_{ph}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
$I_d$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไดโอด (A)
$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
$V_0$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)
$n$	คือ	ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์)
$I_0$	คือ	กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
$T$	คือ	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
$k$	คือ	ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin
$I_{sc}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)
$V_{oc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)
$V_L$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
$R_s$	คือ	ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	คือ	ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
$G$	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$G_{ref}$	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC ( $W/m^2$ )
$\mu_{sc}$	คือ	สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของกระแสไฟฟ้า
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC (Kelvin)
$I_{sc, ref}$	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)
$V_{oc, ref}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ STC (V)
$E_g$	คือ	Band gap energy of semiconductor
$P_m$	คือ	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (W)
$V_m$	คือ	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
$I_m$	คือ	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการโฟโตโวลตาอิก	Photovoltaic Effect
กระแสแสง	Photocurrent
จุดบกพร่อง	Defect
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
เซลล์แสงอาทิตย์	solar cell
โซลาร์เซลล์	solar cell
เซลล์โฟโตโวลตาอิก	photovoltaic cell
ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	p-n junction diode
สารกึ่งตัวนำ	semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
อะมอร์ฟัสซิลิคอน	amorphous silicon
อิเล็กตรอน	electron
โฮล	hole
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	PV Hybrid system
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	PV Grid Connected System
แบบต่อกับระบบจำหน่าย	
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	PV Stand Alone System
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว	Monocrystalline Silicon
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	Thin film solar cells

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด XIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันพลังงานทางเลือกเช่นพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ได้รับการสนับสนุนจากนโยบายภาครัฐ ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานที่เพิ่มการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีศักยภาพโดยพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยของประเทศไทย อยู่ที่ประมาณ 5 kWh/m<sup>2</sup> จึงได้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งขนาดเล็ก (Solar Rooftop) และขนาดใหญ่ (Solar farm) เชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งในอนาคตการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าโครงข่ายเป็นเรื่องสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้นทางซึ่งก็คือการไฟฟ้าฝ่ายผลิต จำเป็นต้องควบคุมปริมาณไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าระบบสายส่งให้เพียงพอกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า อีกทั้งเพื่อให้การเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นหากสามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่าใด จะช่วยให้การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าทั้งระบบ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพด้วย

แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าออกมาเท่าใด ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่แบบจำลองที่ใช้วงจรสมมูลแบบที่นำค่า  $R_s$  มาคำนวณ ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองเป็นอย่างมาก ต่อมาได้พัฒนาเป็น แบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด ซึ่งพบว่าเป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรไม่มากนักอีกทั้งยังมีความแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เช่นแบบจำลองสองไดโอด

แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในบทความนี้ ใช้วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและแม่นยำ โดยซึ่งสามารถพัฒนาและนำไปใช้คาดการณ์การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และตอบโจทย์การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของประเทศได้ในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink
2. สามารถจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ได้
3. สามารถจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ได้
4. สามารถเปรียบเทียบการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink กับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.3 แนวทางการศึกษาในงานวิจัย

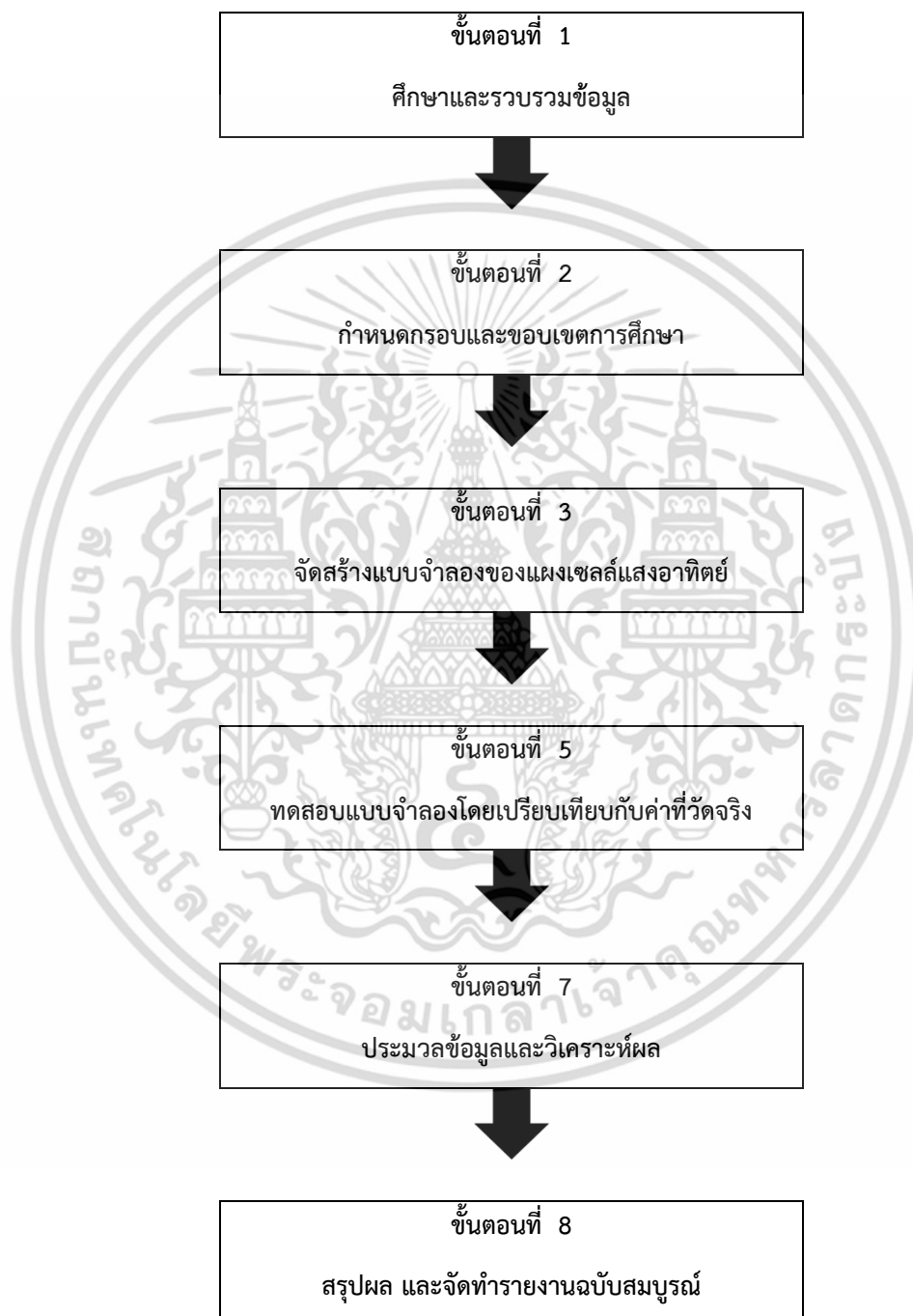
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูล แบบจำลองลักษณะต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดขอบเขตการศึกษาและสร้างแบบจำลองอย่างเหมาะสม รวมถึงการทดลองเป็นไปอย่างรัดกุม และมีประสิทธิภาพ

3. ดำเนินการสร้างแบบจำลอง โดยเริ่มจากแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพัฒนาแบบจำลองให้แม่นยำโดยการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริง

โดยมีรายละเอียดดังรูป ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการศึกษา แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	รายการ	ปีที่ 1				ปีที่ 2			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล								
2	กำหนดกรอบและขอบเขตการศึกษา								
3	จัดสร้างแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์								
4	ทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริง								
5	ประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ผล								
6	สรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ เซึ่งเปรียบเทียบเพื่อนำมาพัฒนา
2. สร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทดสอบและปรับปรุงโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง
3. พัฒนาแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทดสอบและปรับปรุงโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. แบบจำลองฯ ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้
2. สามารถประยุกต์ใช้ผลที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าว เพื่อตรวจเช็คการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

#### 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการนำไปประยุกต์ใช้งานวัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการศึกษาในงานวิจัย ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

**บทที่ 2** ทฤษฎี กล่าวถึงลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการสร้างแบบจำลองการการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การแสดงผลของแบบจำลอง

**บทที่ 4** วิธีการทดลองและผลการทดลอง

**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัย กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางการประยุกต์ใช้งานวิจัยเพื่อต่อยอดพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ [4]

แหล่งพลังงานที่สำคัญของโลกส่วนใหญ่ได้มาจากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซ และ ถ่านหิน เมื่อมีการเติบโต ทางเทคโนโลยี และ ทางเศรษฐกิจ จึงทำให้การบริโภคพลังงานเป็นไปอย่างมหาศาล ซึ่งคาดว่า แหล่งพลังงานของโลกที่ได้มาจาก ฟอสซิลดังกล่าว จะมีสำรองให้ใช้ได้อีกไม่เกิน 50 ปี กระบวนการผลิต และใช้พลังงานจาก ฟอสซิล นั้น ล้วนก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ติดตามมาอย่างมากมาย เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด และ สภาวะเรือนกระจก ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และความเป็นอยู่ของมนุษย์การนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ เช่น พลังงานไฟฟ้า จาก นิวเคลียร์ มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้าง ถอดทิ้ง และทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ การส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนให้มากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และ การแปรรูปจากขยะมูลฝอย ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาสู่ปัจจุบัน กระบวนการแปรรูป พลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้านับเป็นกระบวนการที่สะอาดและไร้มลภาวะและเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุนเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานโดยรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว “แสงอาทิตย์” เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไปแต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างเนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวันตลอดจนมีความเข้มของแสง ที่ไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และฤดูกาลที่เปลี่ยนไป แสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลก จะมีความเข้มของแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,350 วัตต์/ตารางเมตร แต่กว่าจะลงมาถึงพื้นโลก พลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลก เช่น ชั้นโอโซน ชั้นไอน้ำ ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความเข้มของแสงลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร (หรือประมาณร้อยละ 70)

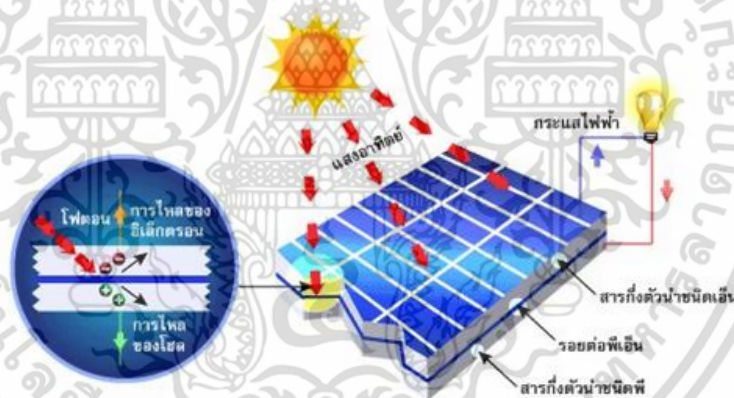
ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง จะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ได้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดต่อวัน ก็จะต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้น ๆ ตามการเคลื่อนที่ของแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอ นอกจากนั้น และจากการที่โลกเอียง ทำให้ซีกโลกเหนือหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูร้อน และเอียงซีกโลกใต้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูหนาว ดังนั้นเราจึงต้องปรับมุมพื้นที่รับแสงนั้น ๆ ในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูกาลด้วย เพื่อให้พื้นที่นั้น ๆ รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งปี ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นขนานที่ 6 -20 องศาเหนือ จะได้รับแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 4-5 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน

การนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ทดแทนพลังงานน้ำมัน ก๊าซ และถ่านหิน น้ำมันเตาซึ่งได้มาจากฟอสซิลของพืชและสัตว์ ได้รับการกล่าวถึงมากขึ้นทุกขณะ เนื่องจากการใช้พลังงานจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันใดประการใดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอสซิลจะมีราคาแพง และมีปริมาณสำรองลดน้อยลงแล้ว การใช้พลังงานจากฟอสซิลยังไปมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมันในการผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่หากนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล จะช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ลดการใช้ก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทย ลดการใช้ถ่านหินจากเหมืองแร่ และช่วยลดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ ฯลฯ ทำให้ช่วยลดภาวะเรือนกระจก และภาวะโลกร้อนได้

สาเหตุที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจคือ

- ขั้นตอนและกระบวนการในการได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่ก่อให้เกิดมลพิษช่วยลดปัญหาการสะสมของก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น
- ขั้นตอนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่มีความซับซ้อน และไม่มีอันตรายทางมลพิษ
- อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 25 ปี ดังนั้นเมื่อทำการลงทุนติดตั้งในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องพลังงานต้นกำเนิดเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีวันหมด
- สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทุกพื้นที่บนโลก และได้พลังงานไฟฟ้าใช้โดยตรง อีกทั้งยังต้องการการบำรุงรักษาระบบน้อยมาก

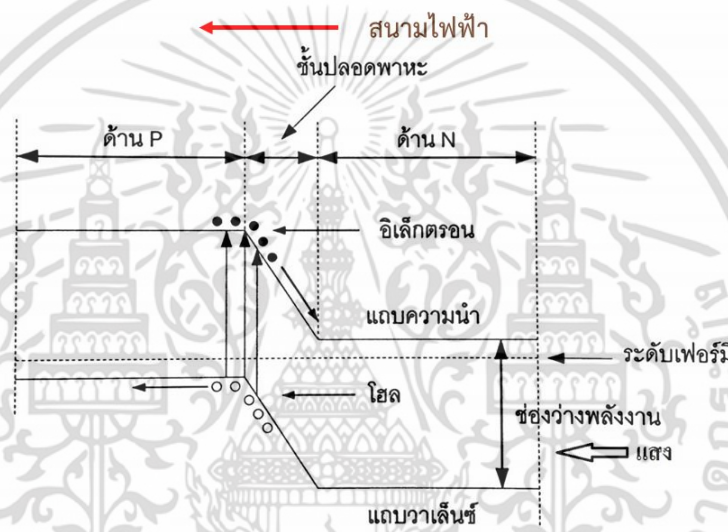
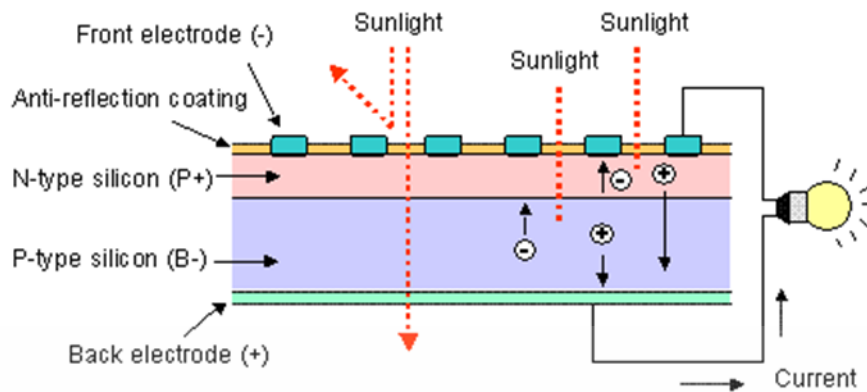


รูปที่ 2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย [4]

### 2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

เซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากรอยต่อแบบพี-เอ็น ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเช่นเดียวกับไดโอด ดังนั้นขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะส่งผลกระทบต่อกระแสและแรงดันเช่นเดียวกับไดโอด เมื่อมีแสงมาตกกระทบบที่รอยต่อจนเกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในแถบความนำ และเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ จากผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ จะทำให้อิเล็กตรอนไหลไปทางขวา ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า โฮลไหลไปทางซ้ายในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกมาภายนอกได้ถ้ามีแหล่งรับพลังงานหรือโหลดที่เหมาะสมต่ออยู่ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “ผลของโฟโตโวลตาอิก” ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยผลของปรากฏการณ์นี้ จนทำให้สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อเป็นข้อมูลความรู้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

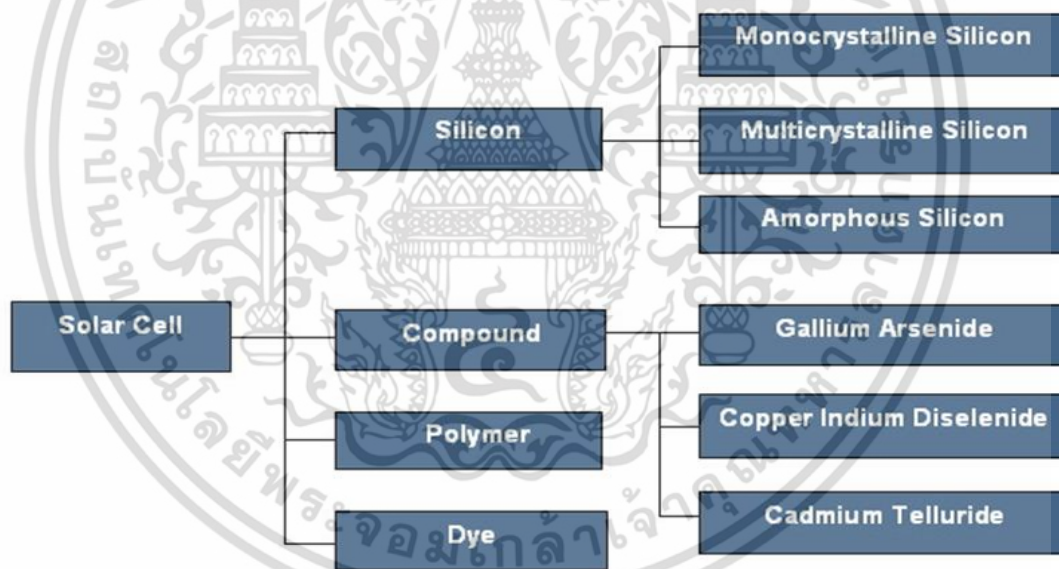
### 2.1.2 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

การค้นพบปรากฏการณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Edman Becquerel ในปี ค.ศ. 1839 งานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ได้อธิบายถึงการทดลองแบตเตอรี่ชนิดเปียก ซึ่งเขาค้นพบว่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ ในปี ค.ศ. 1877 มีรายงานที่กล่าวถึงปรากฏการณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสารชนิดของแข็งโดย Adams และ Day สองนักวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ได้อธิบายถึงการค้นพบสมบัติทางไฟฟ้าของซีลีเนียม (selenium) เมื่อได้รับแสง ในปี ค.ศ. 1883 Chales Edgar Fritts ชาวนิวยอร์ก ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีลีเนียม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซึ่งมีลักษณะเวเฟอร์ซีลีเนียมบาง ๆ ถูกแบ่งเป็นเซลล์และใช้ลวดทองคำเป็นขั้ว และถูกปิดด้วยกระจก แต่เซลล์ยังมีประสิทธิภาพน้อยกว่า 1% จนกระทั่งในช่วงปี ค.ศ. 1950 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อนักวิทยาศาสตร์สามคน Darryl Chapin, Calvin Fuller และ Gerrald Pearson แห่งห้องปฏิบัติการของ Bell Telephone ในรัฐ New Jersey ได้วิจัยผลกระทบของแสงในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(semiconductor) เช่น Germanium และ Silicon ในปี ค.ศ. 1953 Chapin, Fuller และ Pearson ได้ทำการวิจัยปรากฏการณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเป็น 6% และ Bell lab ได้นำมาทดลองใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับโทรศัพท์ในชนบท แต่ในช่วงเวลานั้นยังมีราคาสูงจึงไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในทางธุรกิจในปี ค.ศ. 1958 เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องส่งวิทยุขนาดเล็ก ในดาวเทียมและงานด้านอวกาศในไม่กี่ปีที่ผ่านมาการพัฒนาอย่างรวดเร็วในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการใช้อย่างแพร่หลายในพื้นที่ทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสาร การนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ จนนำไปสู่การเพิ่มจำนวนการผลิตอย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ออกมามากมายตามความต้องการด้านไฟฟ้า การรวมปริมาณของเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้มากขึ้นจนถึงขนาดหลานเมกะวัตต์

จากรูปที่ 2.3 สามารถแยกประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากวัสดุที่นำมาสร้างเป็นหลักโดยแบ่งจากวัสดุที่ทำมาจากซิลิคอน วัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบเพื่อสร้างเป็นชั้นดูดกลืนแสงโดยส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ในประเภทนี้จะสร้างให้มีรูปลักษณะเป็นแบบฟิล์มบาง เนื่องจากวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบมีสมบัติของช่องว่างแถบพลังงานแบบแถบตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงเป็นส่วนใหญ่ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหลักการทำงานจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ [4]

#### 2.1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว [7]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon; c-Si) ในโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ใช้ซิลิคอนแวนผลึกเป็นฐานมีความหนาแน่นประมาณ 200-400  $\mu\text{m}$  ด้านที่รับแสงจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่ตรงข้ามกันระนาบ มีความหนาเพียง 0.2-1  $\mu\text{m}$  เพราะต้องการให้แสงตกกระทบทะลุถึงรอยต่อพี-เอ็นให้ได้มากที่สุด ผิวด้านรับแสงยังประกอบไปด้วยชั้นต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating) อาจทำจาก ซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง และขั้วโลหะได้รับการออกแบบให้ใช้พื้นที่น้อยที่สุดและในขณะเดียวกันสามารถรวบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด ส่วนหัวด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิกที่ดี ซึ่งฉาบไว้เต็มด้านหลังแผ่น และเนื่องจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ต้องมีความบริสุทธิ์มากสูงมาก ซึ่งได้จากการโครคราสกี (Czochralski process) มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้มีราคาค่อนข้างสูง โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยวที่ทำจากแผ่นวงซิลิคอน แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวที่ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 24.4% โดยผลิตจากห้องปฏิบัติการ Photovoltaics Special Research Centre

#### 2.1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก [8]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก (Polycrystalline Silicon; poly-Si) ประกอบด้วยเกรน (Grain) ขนาดเล็ก ๆ ของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวเป็นหลัก มาจากการหล่อผลึกซิลิคอนหลายหลายผลึกเข้าด้วยกันในแม่พิมพ์รูปทรงบาศก์ และ ตัดด้วยเลื่อยชนิดสาย (Wire saw) ให้เป็นแผ่นผลึกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดัง และอีกวิธีหนึ่งซึ่งสร้างแผ่นซิลิคอนชนิดพหุผลึกมีลักษณะคล้ายรีบบ้าง ๑ เรียกรวมให้ละลายเรียกว่า Edage-Define-Film-Fed-Growth (EFG) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึกมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว แต่ยังมีแนวโน้มของประสิทธิภาพที่น้อยกว่าเพราะมีอัตราการเกิดประจุพาหะที่เบาบางและเกิดการรวมตัวใหม่ (Recombination) ระหว่างขอบของเกรน (Boundary) ภายในซิลิคอนชนิดพหุผลึก อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้จากกระบวนการสร้างวัสดุ เช่น แนวทางการให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น การแทรกซึมของแสงภายในเกรน การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าสูงสุด 20.4%

#### 2.1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกลเลียมอาเซไนด์

แกลเลียมอาเซไนด์ (Gallium arsenide; GaAs) เป็นวัสดุชนิด สารประกอบกึ่งตัวนำ (Compound semiconductor) มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกชนิดเดียวกับ ซิลิคอน ซึ่งโดยหลักการแล้วมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะมีค่าการสัมประสิทธิ์ดูดกลืนแสงที่สูง เพราะฉะนั้นจึงสามารถสร้างเป็นชั้นบาง ๆ ได้ GaAs มีความกว้างกับแถบพลังงาน (Band gap energy) มากกว่าซิลิคอน และมีค่าใกล้เคียงอุดมคติมาก สำหรับพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในโลก แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด GaAs จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว เช่นเดียวกับการทำงานที่เกี่ยวข้องกับความร้อนสูงจะมีความทนทานกว่า ซิลิคอนและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่า GaAs เหมาะสมมากที่จะใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด 27.6% ภายใต้การทดสอบมาตรฐาน AM1.5 แต่อีกนัยหนึ่ง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก GaAs มีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับซิลิคอนเพราะต้องสร้างด้วยเทคนิค Epitaxial GaAs และเน้นเรื่องความปลอดภัยเป็นหลักเพราะแก๊ส As มีความเป็นพิษสูงมากส่วนมากใช้ในงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูงเช่นงานด้านอวกาศ เป็นต้น

#### 2.1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [9]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cells) ได้รับความสำเร็จในประสิทธิภาพ 15-20% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางสามารถผลิตจากวัสดุได้หลายชนิดที่รู้จักส่วนมากเช่น ซิลิคอนอสัณฐาน (amorphous silicon; a-Si) คอปเปอร์อินเดียม(แกลเลียม) ไคซิลไนด์ (copper indium gallium selenide; CIGS) และซิลิคอนฟิล์มบาง (silicon heterojunction) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

indium (gallium) diselenide; CIGS) และแคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride; CdTe) เป็นต้น ซึ่งชื่อของวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในโครงสร้าง เนื่องด้วยสมบัติที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงจึงทำให้สามารถสร้างฟิล์มที่มีความหนาเพียง 1-3  $\mu\text{m}$  โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมีสองลักษณะที่คล้ายกันคือ แบบ ซับสเตอร์ท และ แบบ ซุปเปอร์สเตอร์ท ประกอบไปด้วยฐานรองที่ทำด้วยกระจก

ชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer) สร้างจากวัสดุออกไซด์ของโลหะที่นำไฟฟ้าซึ่งมีชื่อเรียกว่า TCO (Transparent conducting oxide) ส่วนมากมักสร้างจาก ITO, FTO หรือ ZnO เป็นต้น มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่สูง และมีสมบัติโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ดี

ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer layer) สร้างจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยหน้าที่หลักของชั้นนี้ทำหน้าที่เป็นรอยต่อระหว่างชั้นดูดกลืนแสง และเพื่อลดความเสี่ยงอิเล็กตรอนไปสู่ชั้นหน้าต่างรับแสงและช่วยป้องกันการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นรับหน้าต่างแสงและชั้นดูดกลืนแสง

ชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer) สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด p มีความกว้างของแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1-2 eV ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ขั้วโลหะ (Metal contact ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อลดความเสี่ยงพาหะออกสู่วงจรรภายนอก

#### 2.1.2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน [10]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (Amorphous silicon; a-Si) มีลักษณะแตกต่างจากชนิดรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งเป็นที่รู้จักแพร่หลายในรูปแบบรอยต่อ 'p-i-n' ประกอบด้วยชั้นที่บางมาก ๆ ในชั้นพีของ a-Si อยู่บนสุดและตามด้วยชั้นของ a-Si ที่หนากว่าด้านพี โดยปราศจากการเจือเป็น a-Si บริสุทธิ์ และชั้นเอ็นที่บางมากของ a-Si โดยทั่วไปแล้วการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐานคล้ายคลึงกับหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ซิลิคอนแบบผลึก เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนอสัณฐานถูกสร้างให้ประหยัดกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก และมีค่าดูดซับแสงที่สูงกว่ามาก เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางได้ ซึ่งประหยัดในเรื่องการลดวัสดุ กระบวนการสร้างที่ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก เหมาะสำหรับนำไปใช้ในทางพาณิชย์ แต่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si ในปัจจุบันยังคงมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si มีค่าประมาณ 10.09% ในระดับห้องปฏิบัติการ

#### 2.1.2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ [11]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium telluride; CdTe) เป็นฟิล์มบางที่ผลิตจาก แคดเมียม เทลลูเรียม ถูกสร้างภายใต้จุดประสงค์ที่ทำงานและใช้ต้นทุนต่ำ โดยที่มีกว้างของแถบพลังงานใกล้เคียงกับค่าอุดมคติและมีประสิทธิภาพสูงถึง 16.7% อย่างไรก็ตาม CdTe ยังได้สารที่มีความเป็นพิษอย่าง แคดเมียม ซึ่งต้องระมัดระวังในระหว่างกระบวนการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์

### 2.1.2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS [11]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบจากธาตุหมู่ I-III-VI ประกอบไปด้วย ทองแดง, อินเดียม(แกเลียม), ซีลีเนียม (ซัลเฟอร์) ได้ฟิล์มบางซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด คาลโคไพไรต์ โดยทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง ได้แก่  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{Cu(InGa)Se}_2$ ,  $\text{Cu(InGa)(SeS)}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$  ฟิล์มแต่ละตัวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความกว้างของแถบพลังงานที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่ม CIS ถูกพัฒนาขึ้นมาแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์เนื่องจากมีความเป็นพิษน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ นอกจากนี้การพัฒนาในห้องปฏิบัติการยังมีประสิทธิภาพสูงถึง 18% และในเชิงพาณิชย์โดยบริษัทซีเมนสูงกว่า 10% ซึ่งอาจมองได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แห่งอนาคต เมื่อเทียบกับค่าประสิทธิภาพในอุดมคติและแถบพลังงานยังพบว่าการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถทำให้ก้าวหน้ากว่าปัจจุบันได้อีกมาก โดยฟิล์มสารประกอบที่น่าสนใจในกลุ่มนี้คือ ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ( $\text{CuInS}_2$ ; CIS) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่า  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  มีความกว้างของแถบพลังงาน 1.5 eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางกลุ่มเดียวกัน และยังสามารถสร้างด้วยวิธีไม่ใช้ระบบสุญญากาศซึ่งใช้ต้นทุนต่ำกว่าการสร้างด้วยฟิล์มชนิดอื่น อาทิเช่น วิธีสเปรย์ด้วยความร้อน (Spray pyrolysis method) วิธีหมุนเคลือบ (Spin coating method) และวิธีคอลลอยด์(Colloidal method)

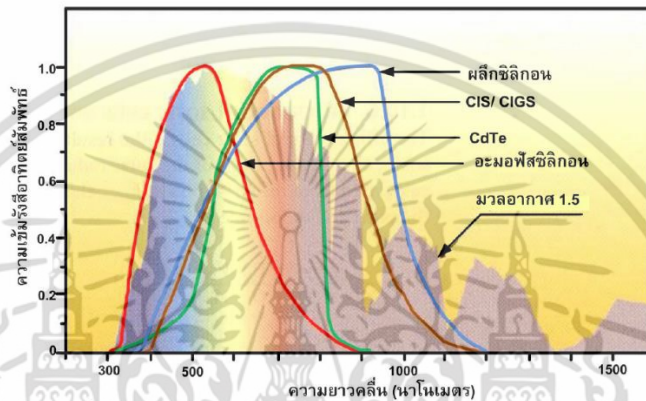


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน [5]

### 2.1.3 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ [5]

เป็นที่ทราบกันว่า รังสีอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และแสงอินฟราเรด หากพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงสเปกตรัมแสงและการตอบสนองต่อสเปกตรัมประกอบกัน ถึงแม้ว่าสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ช่วงค่อนข้างกว้างตั้งแต่เอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าให้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

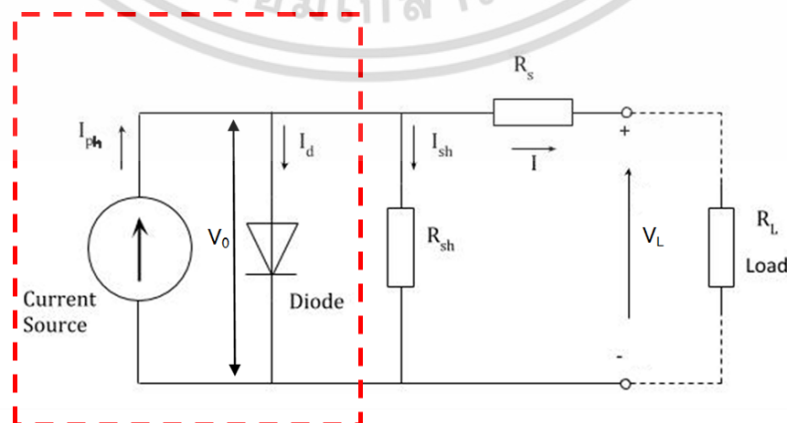
380 - 1100 นาโนเมตร แต่ด้วยข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิกอนที่ตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงช่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและแสงอินฟราเรด ดังนั้นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานจริงจึงแคบลง รูปที่ 2.4 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ โดยแกนความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์เฉพาะประเภทเดียวกัน ซึ่งอะมอร์ฟัสซิลิกอน (ชนิดฟิล์มบาง) ประสิทธิภาพน้อยกว่าผลึกซิลิกอน เนื่องจากมีช่วงการตอบสนองที่ความยาวคลื่นช่วงต้นของแสงมองเห็นด้วยตาเปล่าประมาณ 350-650 นาโนเมตรการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเดิม เช่น CdTe และ CIS หรือ CIGS เป็นต้นทำให้ช่วง การตอบสนองได้เพิ่มขึ้นพิจารณาจากช่วงแถบ กว้างของกราฟที่มากขึ้น



รูปที่ 2.5 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ

## 2.2 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

เพื่อที่จะเข้าใจสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสงให้หมีค่า  $I_{ph}$  , รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด , ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ให้หมีค่าเป็น  $R_s$  และความต้านทานขนานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ให้หมีค่าเป็น  $R_{sh}$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์วิเคราะห์เชิงอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส  $I_{ph}$  ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงนี้จะแบ่งไหลผ่านไดโอดและ  $R_s$  แล้วจึงผ่านมายังโหลด  $R_L$  กระแสที่ไหลผ่าน  $R_s$  และ  $R_L$  ให้มีค่าเป็น  $I$  จะได้ว่า

$$I_{ph} = I_d + I \quad (2.1)$$

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.2)$$

เมื่อ  $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)  
 $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไดโอด (A)  
 $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)

เมื่อ  $R_s = 0$  , กระแส  $I_d$  จะมีค่าดังนี้

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_0}{n.k.T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไดโอด (A)  
 $V_0$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)  
 $n$  คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 2.1)  
 $I_0$  คือ กระแสไบอัสอิมิตวย้อนกลับของไดโอด (A)  
 $T$  คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)  
 $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.380 \times 10^{-23}$  J/Kelvin

แทนค่าสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_0}{n.k.T}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

ในกรณีที่ลัดวงจรทางโหลด เพื่อดูค่ากระแสสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{sc}$ ) จะได้ว่า  $V = 0$

$$I = I_{ph} = I_{sc} \quad (2.5)$$

ในกรณีนี้ กระแส  $I_{ph}$  ก็คือ  $I_{sc}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง

ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อค่าแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{oc}$ ) จะได้ว่า  $I = 0$  ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{ph} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{n.k.T}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

$$\ln \frac{I_{ph}}{I_0} = \frac{qV_{oc}}{n.k.T} - 1 \quad (2.7)$$

$$V_{oc} = \frac{n.k.T}{q} \left( \ln \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.8)$$

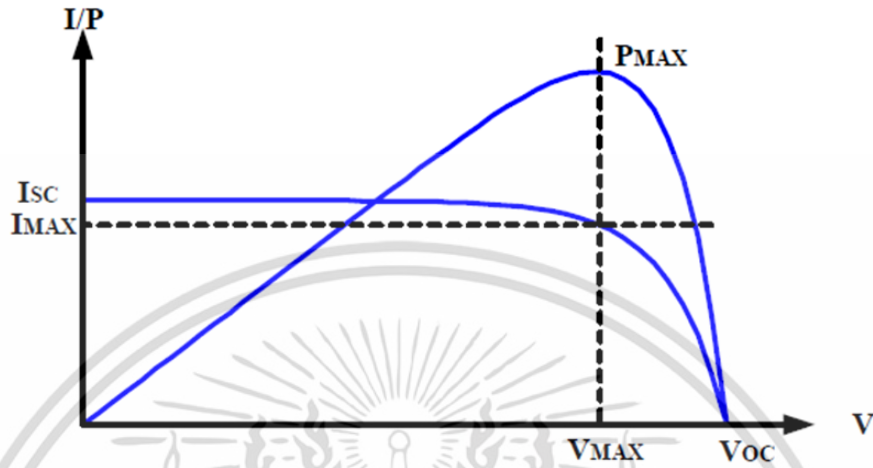
เมื่อ	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$I_0$	คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
	$I_{sc}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)
	$V_{oc}$	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)
	T	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	n	คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 2.1)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	k	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

ตารางที่ 2.1 ค่า Ideal factor

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	Ideal factor
Mono-Si	1.2
Poly-Si	1.3
a-Si:H	1.8
a-Si:H tandem	3.3
a-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
GaAs	1.3

กรณีที่โหลดมีค่า  $0 < R_L < \infty$  จะได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกระแส  $I$  และแรงดัน  $V$  ให้แก่โหลดค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < I < I_{sc}$  และ  $0 < V < V_{oc}$  ตามลำดับ กำลังงาน ที่เซลล์จ่ายไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แก่โหลด  $R_L$  สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่โหลดได้รับ ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้ผลคูณของปริมาณทั้งสองมีค่าสูงสุด เรียกว่า กระแสสูงสุด และแรงดันสูงสุด ตามลำดับ ซึ่งที่จุดนี้จะให้กำลังงานสูงสุด ดังรูป 2.6

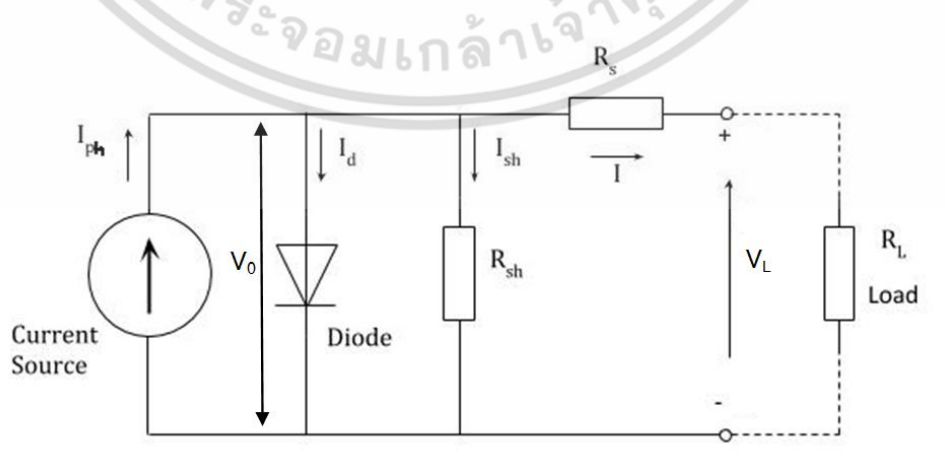


รูปที่ 2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง [3]

### 2.3 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.7 ในขณะที่ใช้งานจะเห็นว่ากระแสเนื่องจากแสง แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_{ph}$  ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในทางอุดมคติ  $I_d$

ค่าความต้านทานอนุกรม  $R_s$  เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำ , ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มมิก ระหว่างโลหะกับส่วนพี และส่วนเอ็น , ค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมดเขียนด้วยย่อเป็น  $R_s$  ค่าความต้านทานขนาน  $R_{sh}$  เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่ขนานกับรอยต่อในรอยต่อพี-เอ็น ที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับกรใช้งานในเพียงการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นใบเชิญประกอบการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุดมคติค่าของ  $R_{sh}$  จะมีค่าเป็นอนันต์ และในเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติค่าของ  $R_s$  จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย เกิดขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อโดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ๆ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า  $R_{sh}$  จึงไม่สูงเป็นอนันต์และผลของค่า  $R_s$  ก็มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ผลของค่า  $R_s$  และ  $R_{sh}$  จะทำให้สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป

โดยทั่วไปแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์ค่าความต้านทานขนาน  $R_{sh}$  จะมีค่าไม่สูงพอที่ไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม  $R_s$  จะมีผลและบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง , การสร้างจึงต้องพิจารณาผลของค่า  $R_s$

ซึ่งถ้าคิดที่  $R_s = 0$  และได้  $I$  ออกมาดังนี้

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_0}{n.k.T}\right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

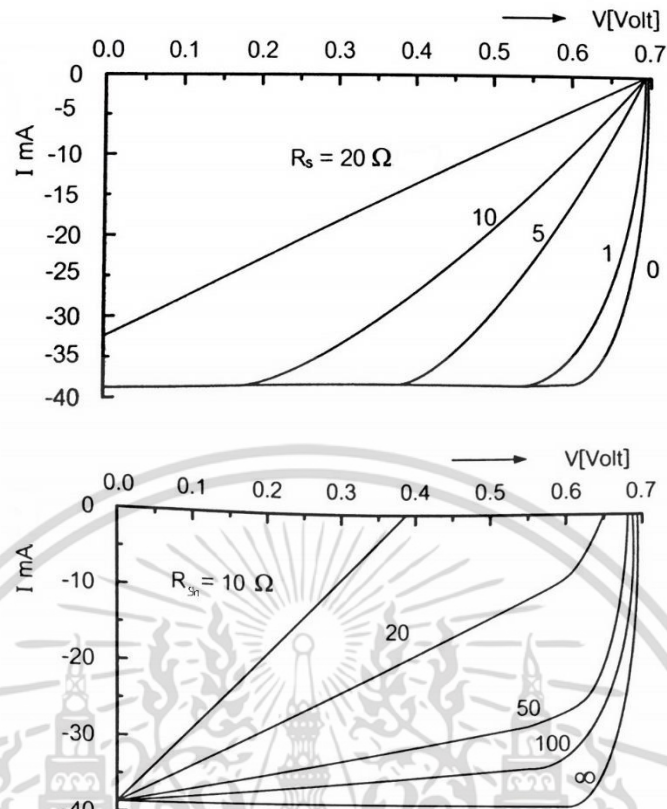
ซึ่งถ้า  $R_s > 0$  และ  $R_{sh} < \infty$  ค่าอนันต์ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริง ๆ จะมีค่าดังนี้  
แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ  $V_0 = V_L + IR_s$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_L + IR_s)}{n.k.T}\right) - 1 \right] - \frac{(V_L + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

เมื่อ	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$I_0$	คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
	$V_L$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
	$V_0$	คือ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)
	$R_s$	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$n$	คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 2.1)
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

จากสมการที่ 2.10 จากกราฟแสดงผลของ  $R_s$  ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูป 2.9 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า  $R_s$  สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็จะลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จึงควรหาทางลดค่า  $R_s$  ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานที่มีต่อสมบัติเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

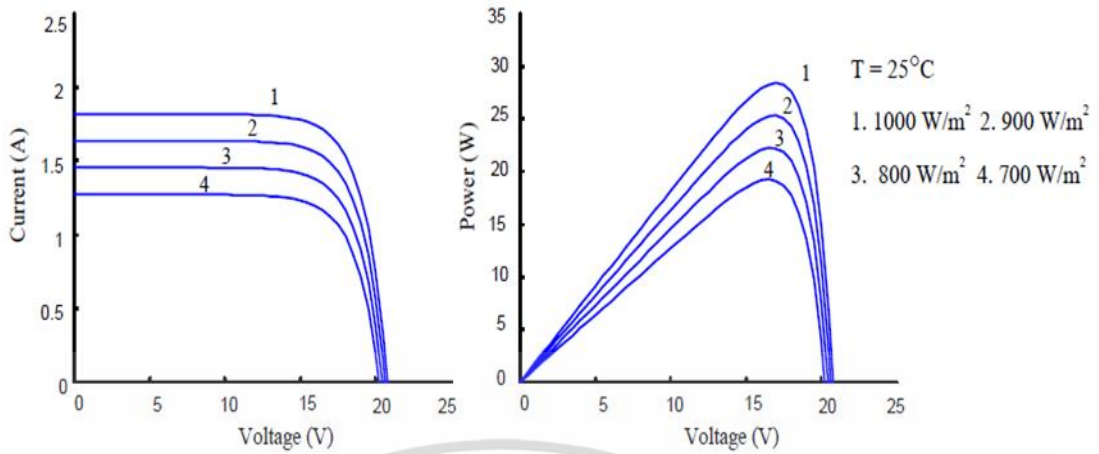
#### 2.4 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับโฮลภายในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้นก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้นด้วย กราฟความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน แสดงไว้ดังรูป 2.8

ในกรณีที่ลัดวงจรทางโหลด เพื่อดูค่ากระแสสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{sc}$ ) จะได้ว่า  $V = 0$

$$I = I_{ph} = I_{sc} \quad (2.5)$$

ในกรณีนี้ กระแส  $I_{ph}$  ก็คือ  $I_{sc}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง ซึ่งเป็นผลโดยตรงที่มีต่อความเข้มแสง กล่าวคือ ค่าที่มีผลต่อ  $I_{sc}$  ก็คือ  $I_{ph}$  ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิต่ำลง เป็นผลให้  $I_{sc}$  มีค่าลดลง เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



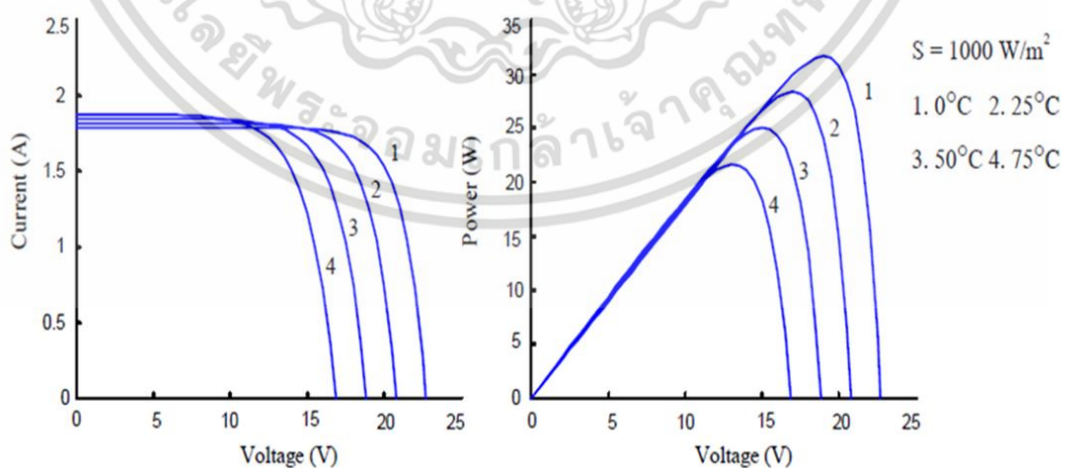
รูปที่ 2.10 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

พิจารณาจากค่าแรงดันขณะวงจรเปิดดังสมการ 2.8 จากสมการนี้ค่า  $kT/q$  จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ  $V_{oc}$  เนื่องจากค่า  $k/q$  มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ  $V_{oc}$  ก็คือ  $I_0$  ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้  $V_{oc}$  มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อค่าแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{oc}$ ) จะได้ว่า  $I = 0$  ,  $V_0 = V_{oc}$

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \left( \ln \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อสมการแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของวงจรมูลแบบหนึ่งไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_L + I.R_s)}{n.k.T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_L + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (2.10) [31]$$

เมื่อ	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
	$I_d$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไดโอด (A)
	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$I_0$	คือ กระแสไบอัสอิมิตวย้อนกลับของไดโอด (A)
	$V_L$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
	$R_s$	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$n$	คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 2.1)
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

จากวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ามีการมีพารามิเตอร์ 4 ตัวที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์คือ  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  และ  $R_{sh}$  เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

ค่า  $I_{ph}$  เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ 2.6

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{sc,ref} + \mu_{sc} (T - T_{ref}) \right] \quad (2.11)[31]$$

เมื่อ	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$G$	คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
	$G_{ref}$	คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC ( $W/m^2$ )
	$\mu_{sc}$	คือ สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของกระแสไฟฟ้า
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC (Kelvin)
	$I_{sc,ref}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์กับอุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมิยังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิมิตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_0$ ) ดังสมการที่ (2.9)

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.12) [31]$$

โดยที่ 
$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp \left( \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right) \quad (2.13) [31]$$

ดังนั้น 
$$I_0 = \left[ I_{sc,ref} \exp \left( \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right) \right] \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.14) [31]$$

เมื่อ	$I_0$	คือ กระแสไบอัสอิมิตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
	$I_{sc,ref}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)
	$V_{oc,ref}$	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ STC (V)
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC (Kelvin)
	$n$	คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin
	$E_g$	คือ Band gap energy of semiconductor

ในความเป็นจริงมันเป็นไปได้ที่จะละเลยความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทาน shunt ( $R_{sh}$ ) โดยรูปแบบของวงจรที่นำความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทาน shunt ( $R_{sh}$ ) เข้ามาพิจารณา ได้แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตาม  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ดังสมการที่ (2.10)

$$R_{sh} = \frac{V_m + (I_m \cdot R_s)}{I_{sc,ref} - I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_m + I_m \cdot R_s - V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right] \right\} + I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[ \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right] \right\} - \frac{P_m}{V_m}} \quad (2.15) [31]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

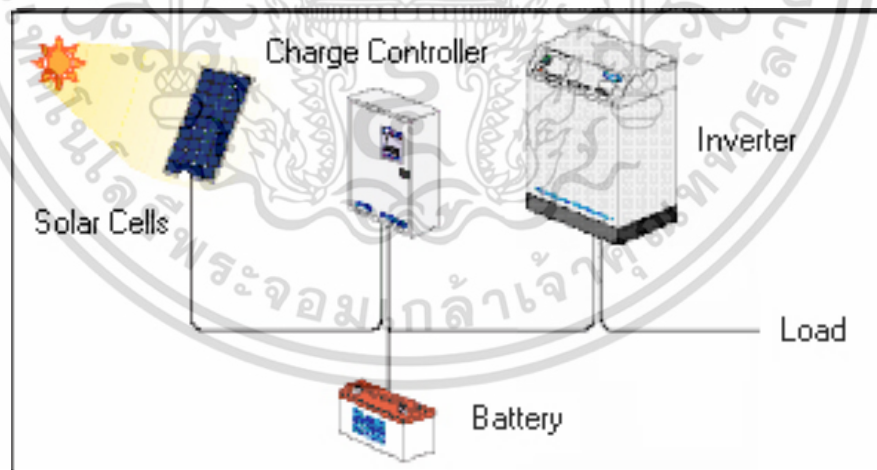
เมื่อ	$R_s$	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$I_{sc, ref}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)
	$V_{oc, ref}$	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ STC (V)
	$P_m$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (W)
	$V_m$	คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
	$I_m$	คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
	$n$	คือ ค่า Ideal factor (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1)
	$T$	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

## 2.7 การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบ คือ 3 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น

### 2.7.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Standalone system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ



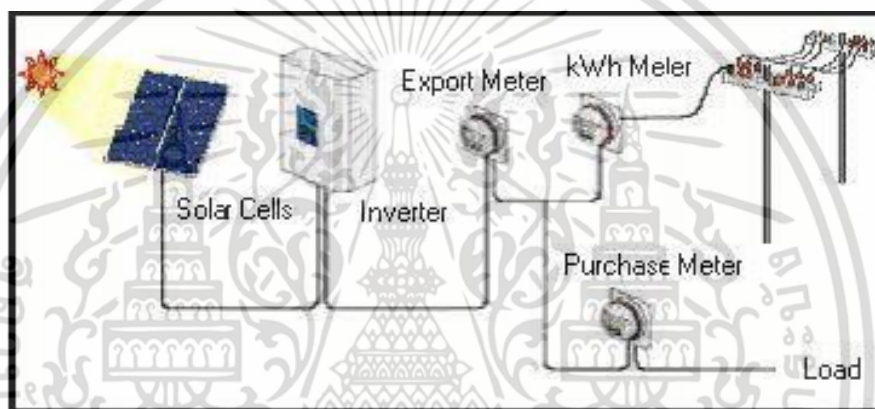
รูปที่ 2.12 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) [5]

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าจาก National Grid โดยมีหลักการทำงานแบ่งได้เป็น ช่วงเวลา 2 กล่าวคือ ช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อม ๆ กัน ส่วนในช่วงกลางคืน เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้น พลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บประจุไว้ในช่วงกลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิด Stand alone เป็นต้น

### 2.7.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

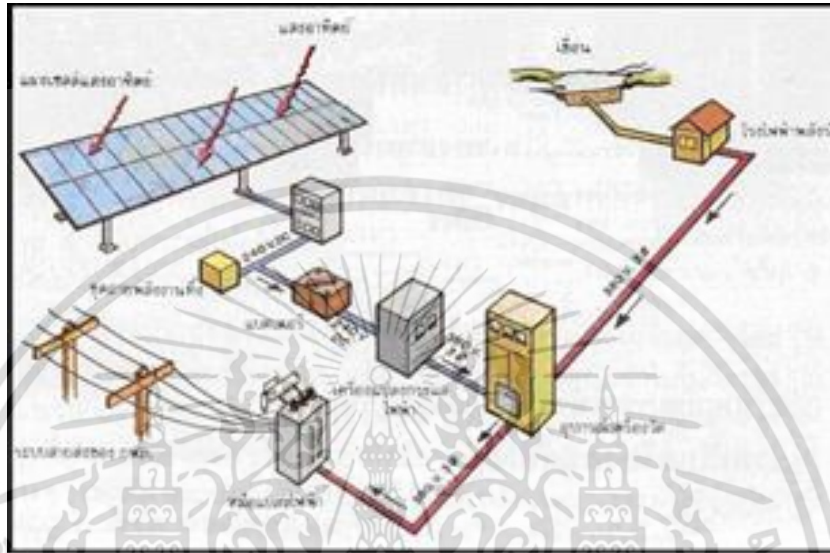


รูปที่ 2.13 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System) [5]

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า National Grid โดยตรง มีหลักการทำงานแบ่งเป็น ช่วง กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดด 2 สามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า สังเกตได้เนื่องจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทาง ส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายให้แก่โหลดโดยตรง สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ ดังนั้น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายจะเป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า Grid connected เป็นต้น

### 2.7.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ



รูปที่ 2.14 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) [5]

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล มีหลักการทำงาน กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าได้ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิด Multi-function ทำงานร่วมกับไฟฟ้าจากพลังงานลม จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดพร้อมทั้งทำงานประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินไว้ในแบตเตอรี่ ในกรณีพลังงานลมต่ำไม่สามารถผลิตไฟฟ้าหรือเวลากลางคืนไม่มีไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดแบตเตอรี่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลด และกรณีแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากจนถึงพิกัดที่ออกแบบไว้ เครื่องยนต์ดีเซลจะทำงานโดยอัตโนมัติเป็นอุปกรณ์สำรองพลังงาน กล่าวคือจะจ่ายกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่โดยตรงและแบ่งจ่ายให้แก่โหลดพร้อมกัน และหากโหลดมีมากเกินไประบบจะหยุดทำงานทันที และจะทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หรือพลังงานลมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่ได้ปริมาณตามพิกัดที่ออกแบบไว้พร้อมทั้งขนาดโหลดอยู่ในพิกัดที่ชุดแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

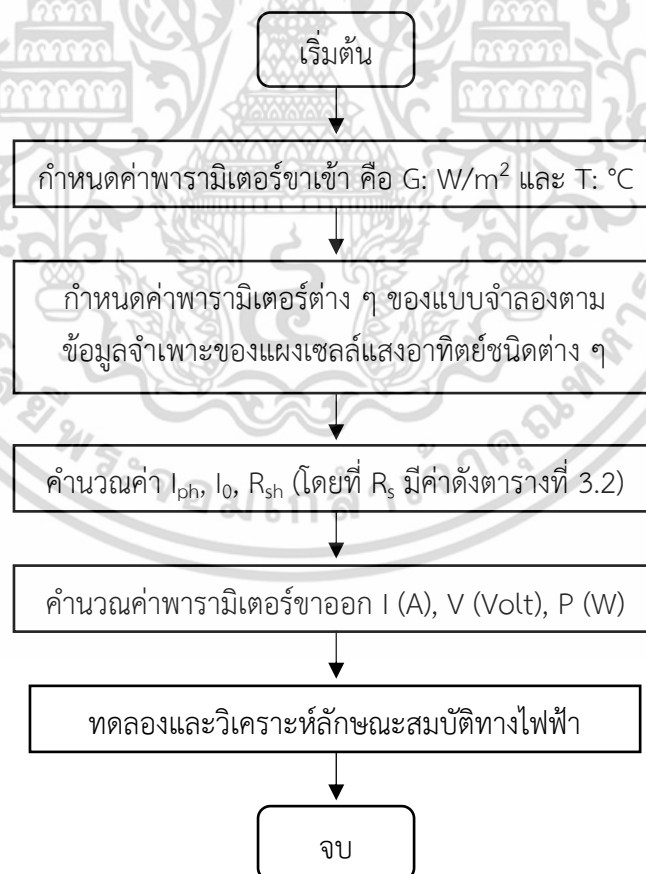
### บทที่ 3

## กระบวนการสร้าง

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จากวงจรพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด โดยตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการสร้างด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มาทดลองเพื่อให้แบบจำลองแสดงผลตรงตามลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ามาตรฐานการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

### 3.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ก่อนกระบวนการสร้างจะเกิดขึ้น จำเป็นต้องออกแบบแผนภาพการทำงานของแบบจำลองก่อนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แบบจำลอง ดังรูปที่ 3.1 โดยในการออกแบบนี้มุ่งเน้นให้แบบจำลองแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำ

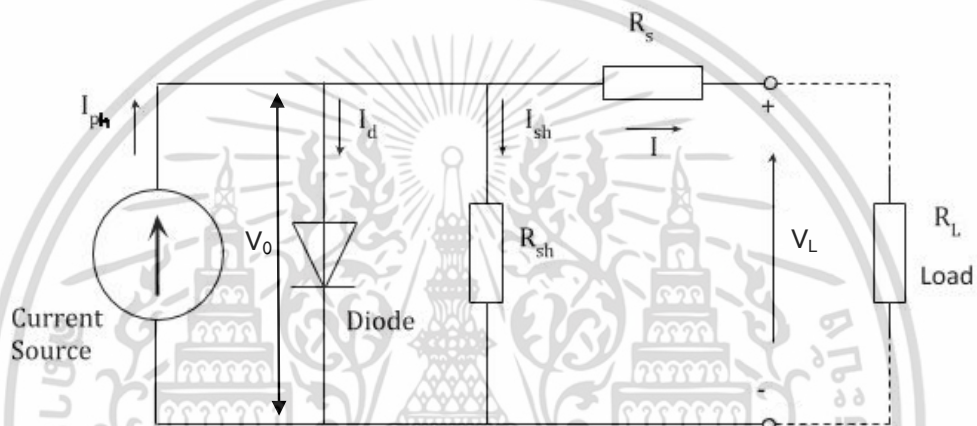


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 สร้างแบบจำลองจากรวงจรพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยวงจรมูลแบบหนึ่งไดโอดด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย รอยต่อพีเอ็น (p-n) ของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ซึ่งแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแสในวงจรมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้เกิดประจุพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อและเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณขั้วทั้งสอง และเมื่อต่อโหลดก็จะมีกระแสไหลในวงจร ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยสมการซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.2 วงจรมูลแบบหนึ่งไดโอด

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_L + I.R_s)}{n.k.T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_L + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (3.1) [31]$$

เมื่อ	$I$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$I_0$	คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)
	$V_L$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
	$R_s$	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
	$n$	คือ ค่า Ideal factor Diode (ค่า Ideal factor Diode นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1)
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
	$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kelvin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่า Ideal factor Diode

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	Ideal factor
Mono-Si	1.2
Poly-Si	1.3
a-Si:H	1.8
a-Si:H tandem	3.3
a-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
GaAs	1.3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สร้างด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีพารามิเตอร์หลักอยู่ 4 ค่าคือ  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  และ  $R_{sh}$

### 3.1.1.1 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_{ph}$

ค่า  $I_{ph}$  เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ 3.2

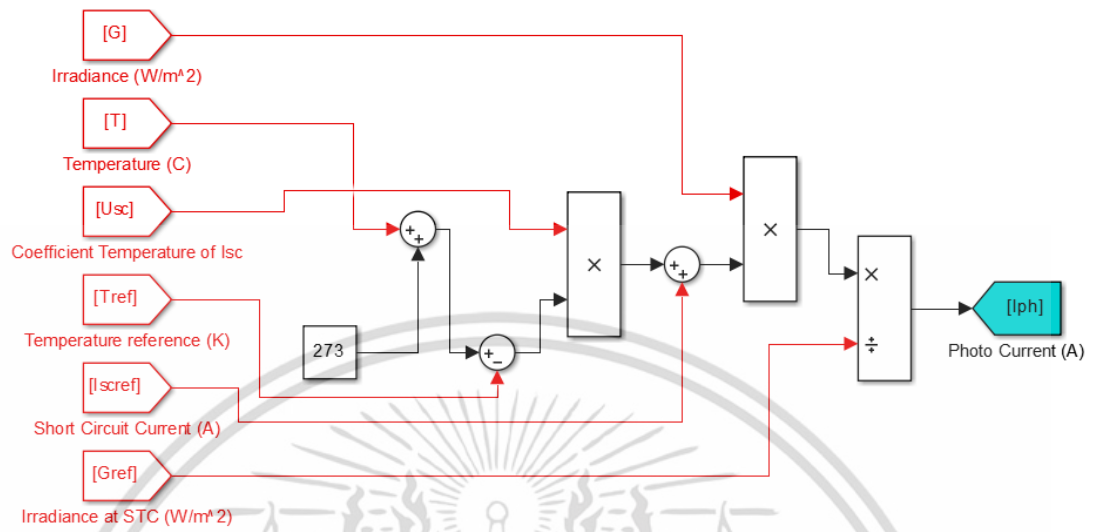
$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{sc,ref} + \mu_{sc} (T - T_{ref}) \right] \quad (3.2) [31]$$

เมื่อ	$I_{ph}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (A)
	$G$	คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
	$G_{ref}$	คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC ( $W/m^2$ )
	$\mu_{sc}$	คือ สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของกระแสไฟฟ้า
	$T$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Kelvin)
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC (Kelvin)
	$I_{sc,ref}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)

และจากสมการที่ (3.2) สามารถสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์  $I_{ph}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ (3.3) โดยตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $I_{ph}$ ) ของแบบจำลองนี้คือความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G$ ) และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T$ )



รูปที่ 3.3 แบบจำลองพารามิเตอร์  $I_{ph}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.1.1.2 แบบจำลองพารามิเตอร์ $I_0$

ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์กับอุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมียังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิมิตวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_0$ ) ดังสมการที่ (3.3)

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \tag{3.3} [31]$$

โดยที่  $I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp \left( \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right)$  (3.4) [31]

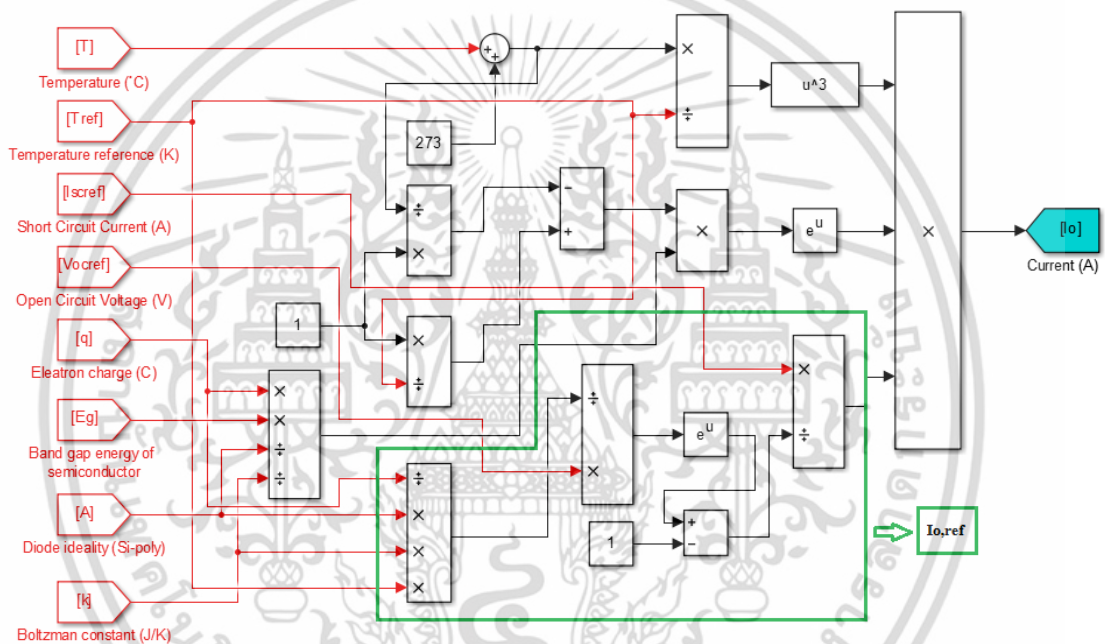
ดังนั้น  $I_0 = \left[ I_{sc,ref} \exp \left( \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right) \right] \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$  (3.5) [31]

- เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสไบอัสอิมิตวย้อนกลับของไดโอด (A)
- $I_{sc,ref}$  คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)
- $V_{oc,ref}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ STC (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC (Kelvin)
- $n$  คือ ค่า Ideal factor Diode (ค่า Ideal factor Diode นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1)
- $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C
- $k$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.380 \times 10^{-23}$  J/Kelvin
- $E_g$  คือ Band gap energy of semiconductor

และจากสมการที่ (3.5) สามารถสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์  $I_0$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.4 โดยตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $I_0$ ) ของแบบจำลองนี้คืออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองพารามิเตอร์  $I_0$  ของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.1.1.3 แบบจำลองพารามิเตอร์ $R_s$ และ $R_{sh}$

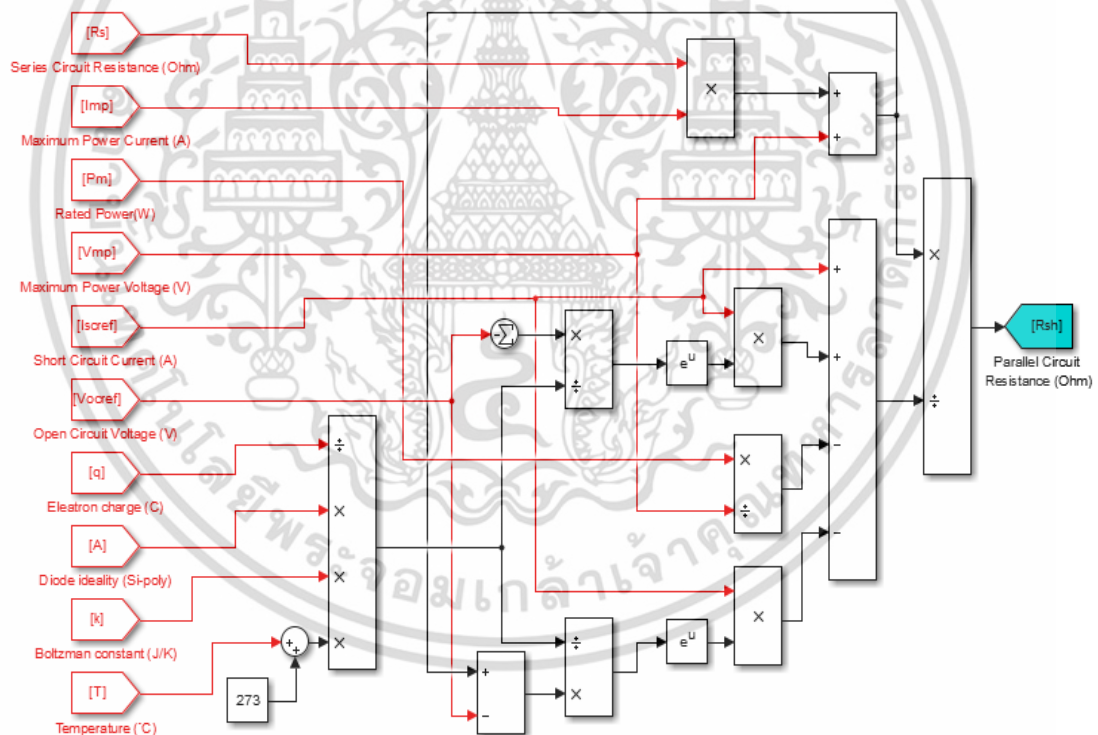
แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.2 โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตาม  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ดังสมการที่ (3.6)

$$R_{sh} = \frac{V_m + (I_m \cdot R_s)}{I_{sc,ref} - I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_m + I_m \cdot R_s - V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right] \right\} + I_{sc,ref} \left\{ \exp \left[ \frac{q(-V_{oc,ref})}{n \cdot k \cdot T} \right] \right\} - \frac{P_m}{V_m}} \tag{3.6} [31]$$

เมื่อ  $R_s$  คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{sh}$	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )
$I_{sc, ref}$	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรที่ STC (A)
$V_{oc, ref}$	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ STC (V)
$P_m$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (W)
$V_m$	คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (V)
$I_m$	คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (A)
$n$	คือ ค่า Ideal factor Diode (ค่า Ideal factor Diode นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1)
$T$	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kevin)
$q$	คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
$k$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23}$ J/Kevin

และจากสมการที่ (3.6) สามารถสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.5

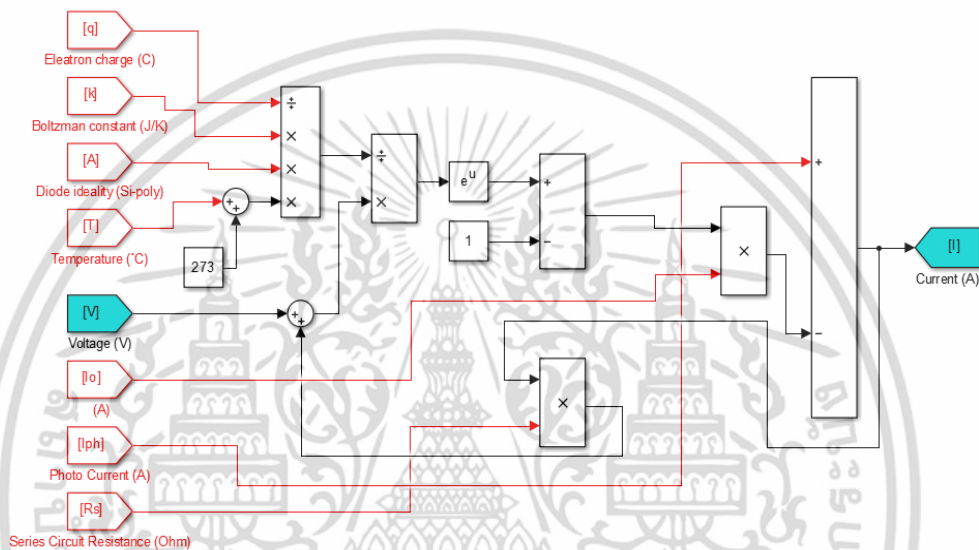


รูปที่ 3.5 แบบจำลองพารามิเตอร์  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.4 แบบจำลองกระแสไฟฟ้า

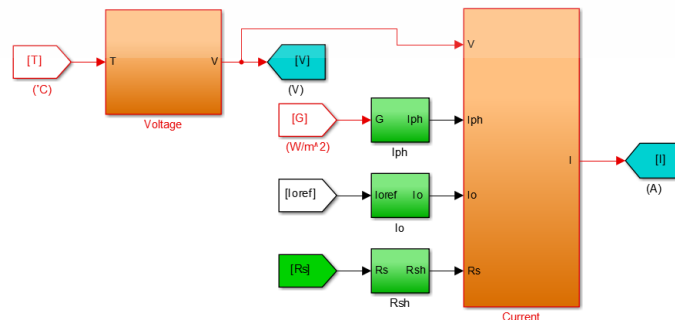
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink วิเคราะห์จากวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด (รูปที่ 3.2) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยสมการซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังสมการที่ (3.1) และจากสมการนี้สามารถสร้างแบบจำลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.6 (โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดที่อยู่ในสมการที่ (3.1) สามารถวิเคราะห์ได้จากแบบจำลองพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น)



รูปที่ 3.6 แบบจำลองกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.1.2 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

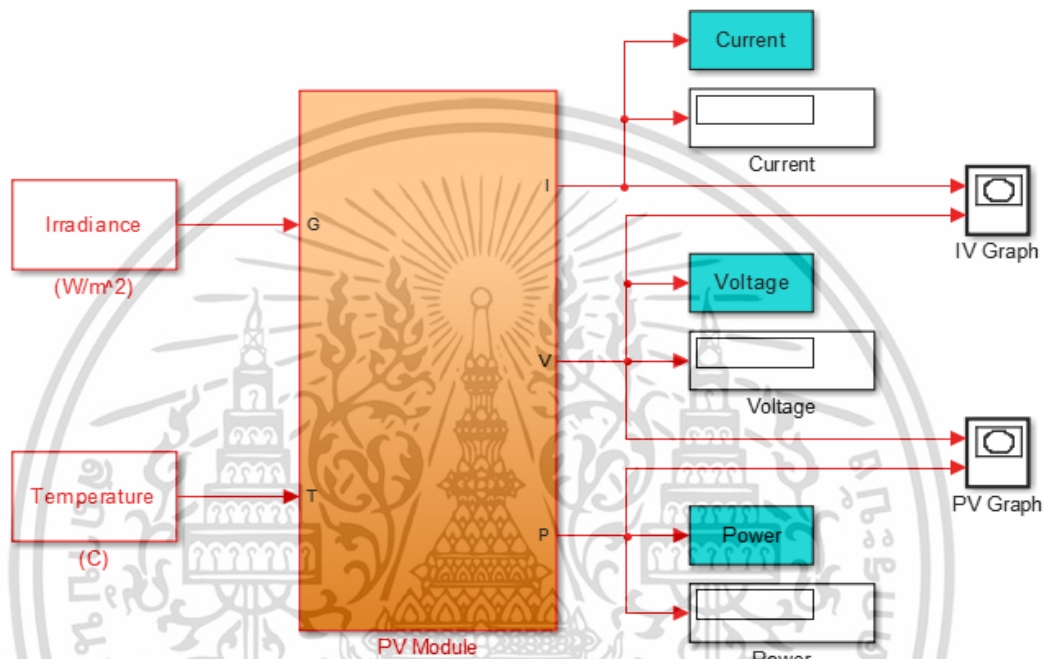
แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สร้างด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยนำแบบจำลองพารามิเตอร์ทั้งหมดที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ , แรงดันไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) มาสร้างรวมกันให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองพารามิเตอร์ทั้งหมดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แบบจำลองพารามิเตอร์ทั้งหมดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 แบบจำลองนี้เป็นการแสดงกระบวนการคำนวณของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีพารามิเตอร์ขาเข้า คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G: W/m^2$ ) และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T: ^\circ C$ ) เข้าไปคำนวณในแบบจำลองดังกล่าว โดยมีการแสดงผลออกมาเป็น 2 ลักษณะ คือ ค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการทั้งหมดนี้ มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 3.8 โดยวิธีการแสดงผลจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.8 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

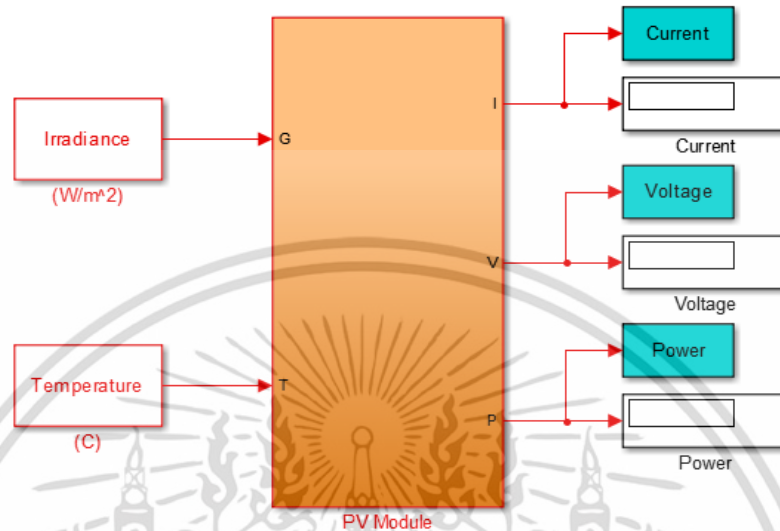
### 3.1.3 การแสดงผลของแบบจำลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการแสดงผลลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จากรูปที่ 3.8 โดยมีพารามิเตอร์ขาเข้าของแบบจำลอง คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G: W/m^2$ ) และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T: ^\circ C$ ) ผ่านกระบวนการคำนวณในแบบจำลอง แสดงผลออกมาเป็นพารามิเตอร์ขาออก คือ กระแสไฟฟ้า ( $I: A$ ) แรงดันไฟฟ้า ( $V: Volt$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P: W$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบบจำลองนี้จะแสดงผลออกมาเป็น 2 ลักษณะ คือ ค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อธิบายได้ดังนี้

#### 3.1.3.1 ค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การแสดงผลในลักษณะนี้ จะเป็นการระบุค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (คือ กระแสไฟฟ้า ( $I: A$ ) แรงดันไฟฟ้า ( $V: Volt$ ) และกำลังไฟฟ้า ( $P: W$ )) ที่ผ่านกระบวนการคำนวณจากสมการแสดงคุณสมบัติทางกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จัดรูปของฟังก์ชันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

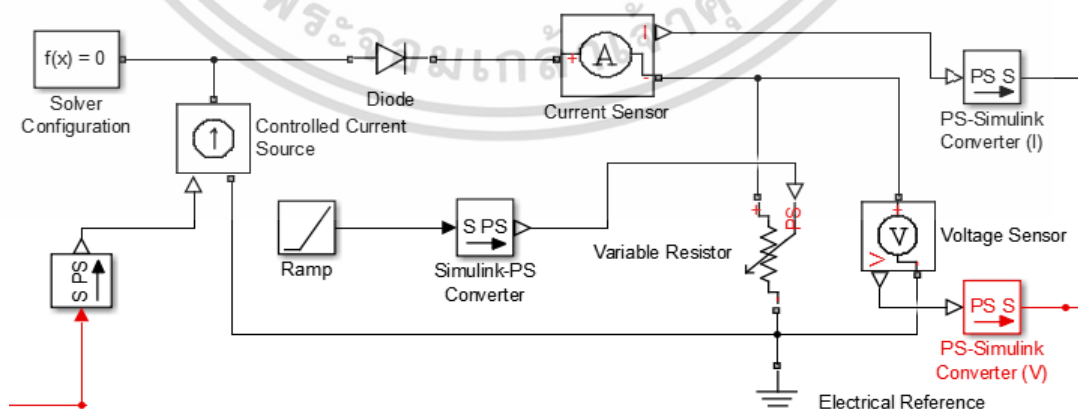
เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังสมการที่ 3.1 แสดงผลออกมาอยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูล จำนวน 3 ชุดข้อมูล คือ กระแสไฟฟ้า ( $I$ : A) แรงดันไฟฟ้า ( $V$ : Volt) และกำลังไฟฟ้า ( $P$ : W) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองแสดงค่าทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

### 3.1.3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

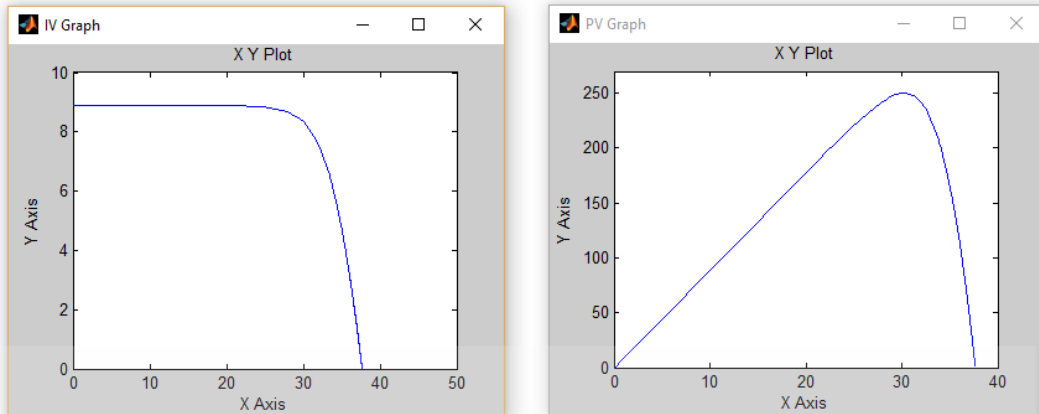
การแสดงผลในลักษณะนี้ จะเป็นการแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ คุณลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ( $I$ - $V$  Characteristic) และคุณลักษณะเฉพาะของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ( $P$ - $V$  Characteristic) โดยการนำชุดข้อมูลจากการแสดงผลค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณด้วยวงจรแปลงสัญญาณแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงสัญญาณแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

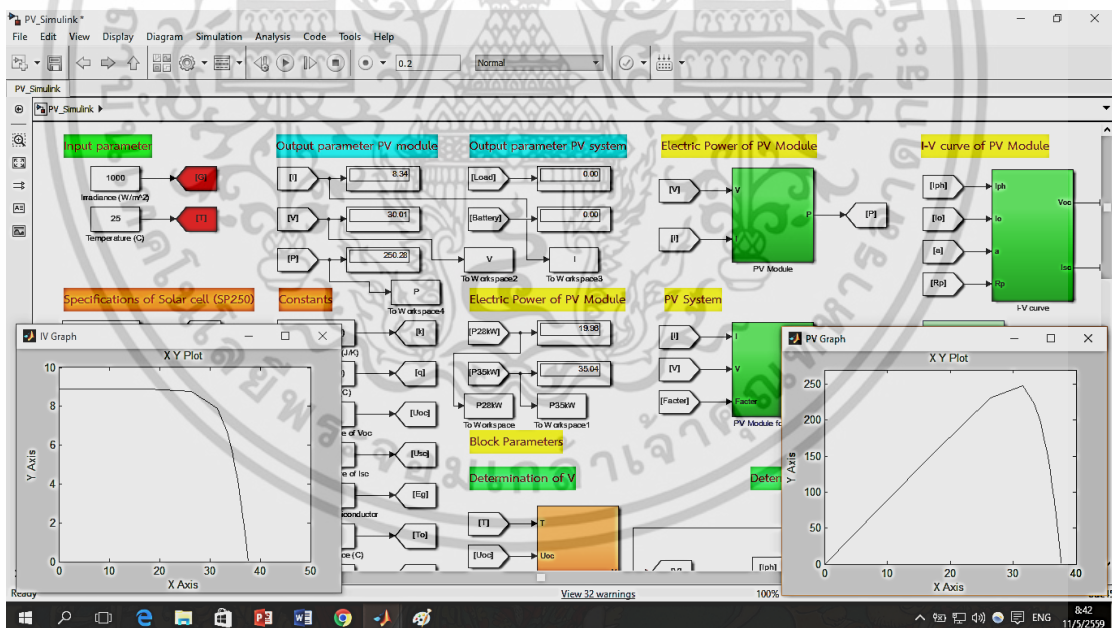
โปรแกรม Matlab/Simulink เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.13 หน้าต่างแสดงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

จากขั้นตอนกระบวนการสร้างในขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่ได้วิเคราะห์การแสดงผลของแบบจำลองแล้ว หน้าต่างของแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ที่พร้อมใช้งาน เป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบแบบจำลอง กับข้อมูลจำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นต่าง ๆ และทดสอบแบบจำลอง การผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริง โดยมีเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

#### 4.1 วิธีการทดลอง

ทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากแบบจำลองข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าและแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ได้มากหลายชนิด โดยเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดลองกับ แบบจำลองนี้มีทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่

- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon, Mono-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon, Poly-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon, a-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมสelenium (Copper Indium Selenide, CIS)
- HIT (Heterostructure with Intrinsic Thin Layer) Solar cell

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ STC:  
ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (G:  $W/m^2$ ) เท่ากับ  $1000 W/m^2$   
อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T:  $^{\circ}C$ ) เท่ากับ  $25^{\circ}C$

Technology Solar Cells	Pm at STC	Gref	Tref	Vmpp	Impp	Voc	Isc	mIsc	mVoc	mPm	R serie	n	Eg
	W	$W/m^2$	$^{\circ}C$	V	A	V	A	$mA/K$	$mV/K$	$\% / K$	Ohm		
Si-mono	165	1000	25	35.20	4.69	43.50	5.14	2.40	-168.33	-0.48	0.42	1.20	1.10
Si-poly	165	1000	25	35.60	4.65	43.70	5.05	1.50	-148.08	-0.44	0.27	1.30	1.10
a-Si:H single	330	1000	25	143.40	2.30	187.80	2.80	2.50	-463.22	-0.20	1.99	1.80	1.70
CIS	155	1000	25	80.00	1.95	108.00	2.20	0.20	-182.30	-0.31	6.20	1.50	0.90
HIT	167	1000	25	51.40	3.25	64.90	3.63	2.30	-150.81	-0.30	1.67	1.50	1.10

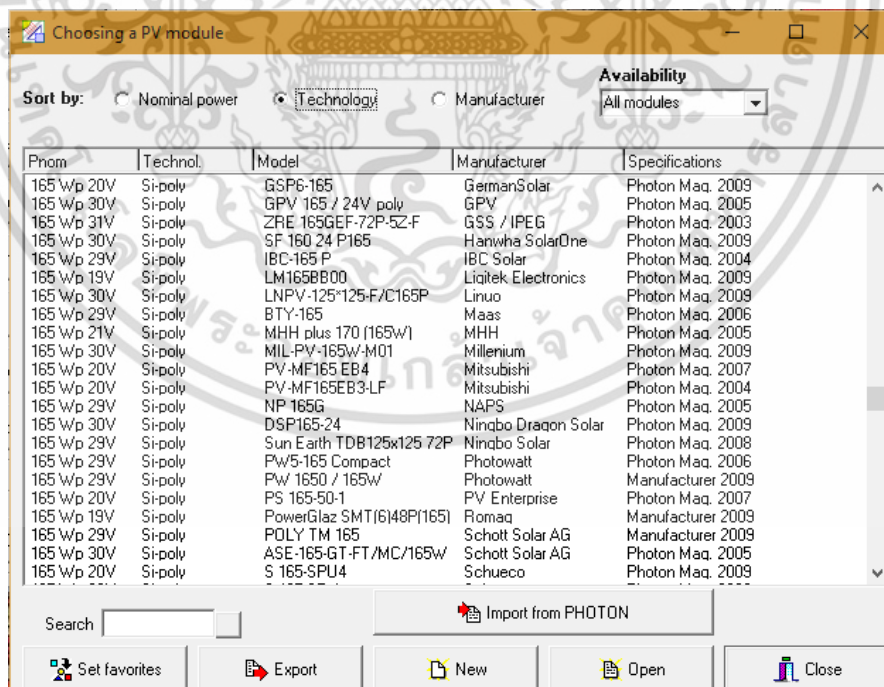
โดยมีพารามิเตอร์ขาเข้า คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (G:  $W/m^2$ ) และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T:  $^{\circ}C$ ) ผ่านกระบวนการคำนวณในแบบจำลอง แสดงผลออกมาเป็นพารามิเตอร์ขาออก คือ กระแสไฟฟ้า (I: A) แรงดันไฟฟ้า (V: Volt) และกำลังไฟฟ้า (P: W) ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 4.1 โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

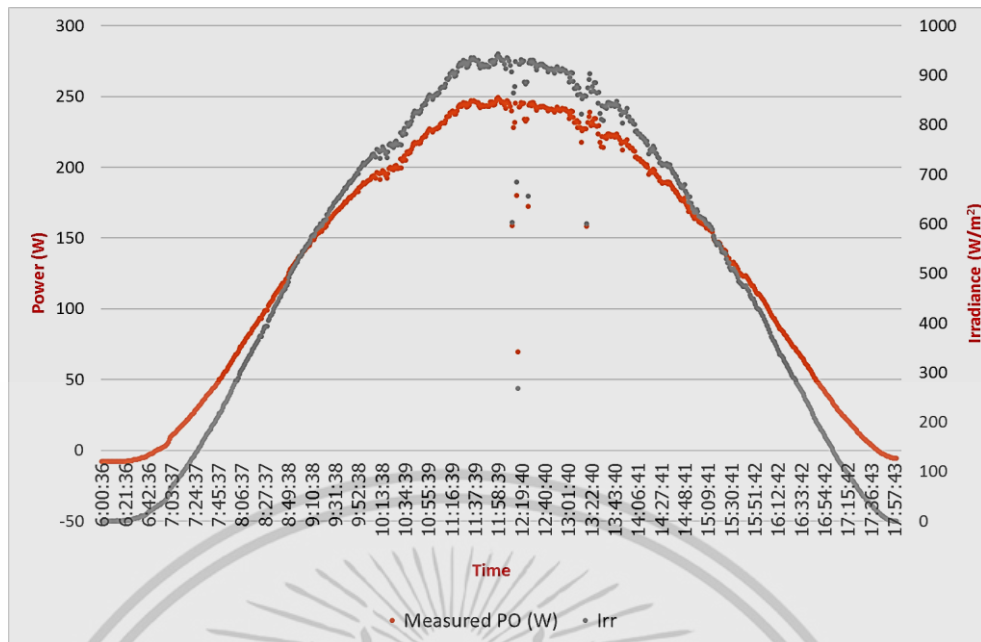
- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยกำหนดค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G$ :  $W/m^2$ ) เท่ากับ  $1000 W/m^2$  และกำหนดให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ  $25 ^\circ C$
- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G$ :  $W/m^2$ ) ตั้งแต่  $200, 400, 600, 800$  และ  $1,000 W/m^2$  และกำหนดให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ ( $T$  เท่ากับ  $25 ^\circ C$ )
- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $T$ :  $^\circ C$ ) ตั้งแต่  $10, 25, 40, 55$  และ  $70$  องศาเซลเซียส และกำหนดให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ ( $G$  เท่ากับ  $1,000 W/m^2$ )

ในการนำข้อมูลจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงของเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงานนั้น ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงได้นำมาจากโปรแกรม PVSYST (รูปที่ 4.1) ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่รวบรวมข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากผู้ผลิตต่าง ๆ ซึ่งแนวโน้มของความเข้มแสง และอุณหภูมิ ของการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน แสดงดังรูป 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

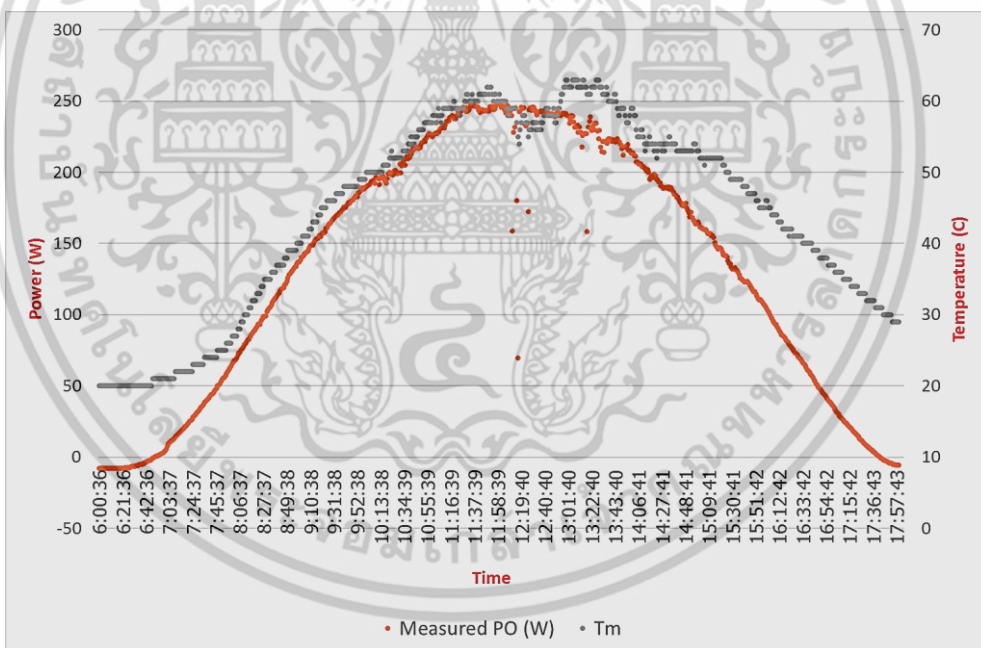


รูปที่ 4.1 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากโปรแกรม PVSYST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แนวโน้มของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน



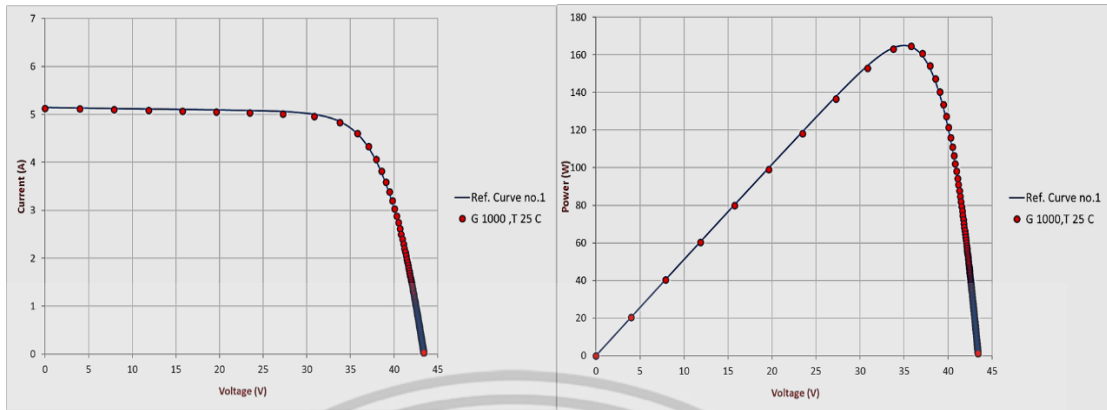
รูปที่ 4.3 แนวโน้มของอุณหภูมิ ของการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน

#### 4.2 ผลการทดลอง

การทดสอบนี้ใช้ข้อมูลจำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 4.1 โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ มีผลการทดลอง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon, Mono-Si)



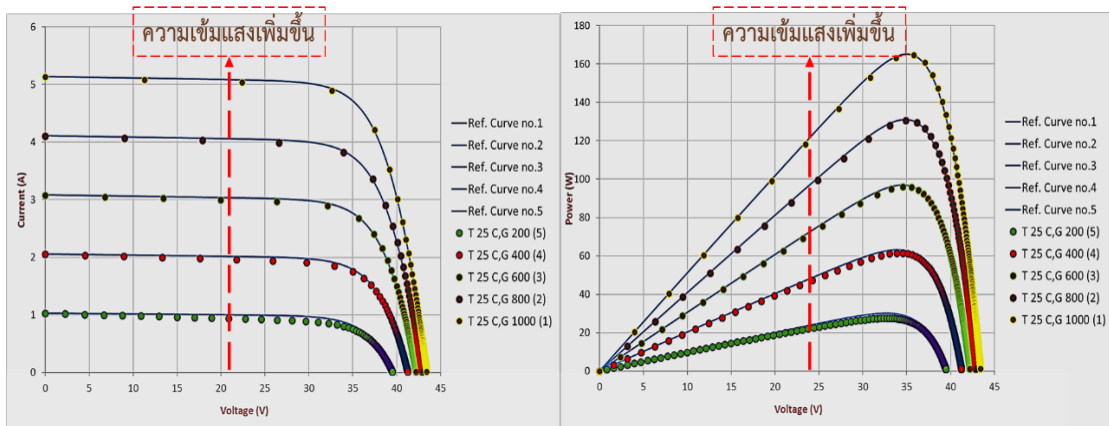
รูปที่ 4.4 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	165.114	164.683	0.26
Im (A)	4.724	4.602	2.60
Vm (V)	34.950	35.787	2.40
Isc (A)	5.140	5.131	0.18
Voc (V)	43.500	43.396	0.24

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.26 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



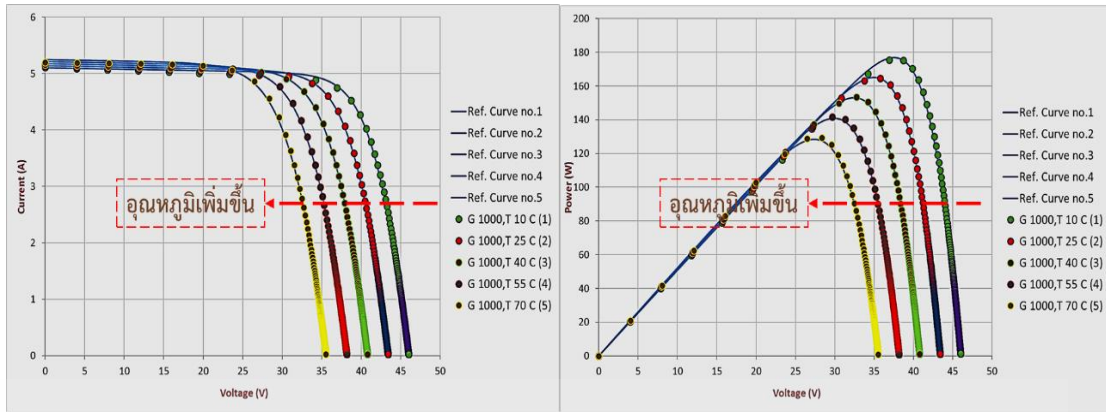
รูปที่ 4.5 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	30.125	27.567	8.49
400	63.182	61.520	2.63
600	96.979	96.058	0.95
800	131.070	130.617	0.35
1000	165.114	164.683	0.26

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.26-8.49 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



รูปที่ 4.6 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

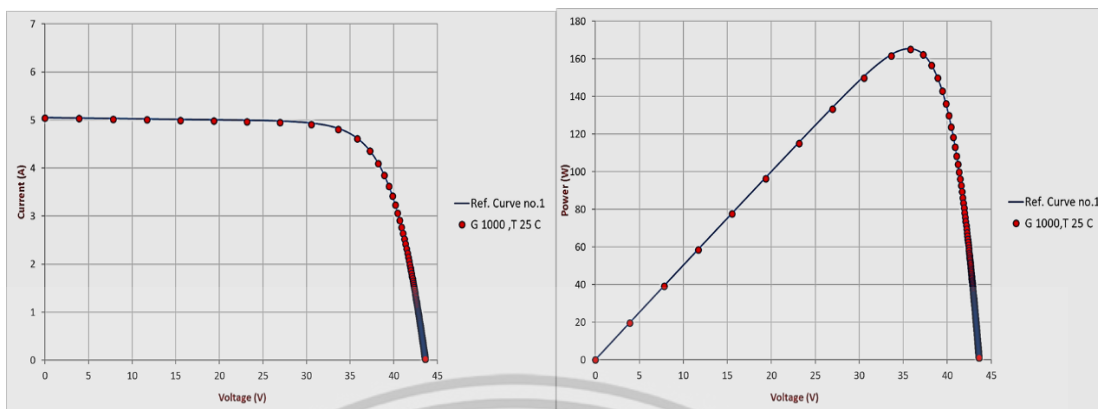
ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	176.892	176.656	0.13
25	165.114	164.683	0.26
40	153.101	153.585	0.32
55	140.869	141.714	0.60
70	128.451	129.408	0.75

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.26-0.75 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon, Poly-Si)



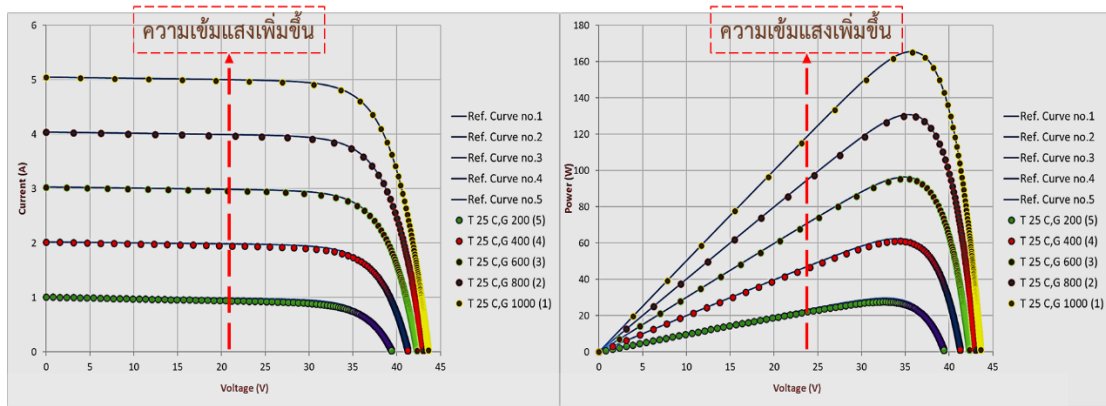
รูปที่ 4.7 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	165.544	165.043	0.30
Im (A)	4.646	4.607	0.83
Vm (V)	35.635	35.827	0.54
Isc (A)	5.050	5.045	0.09
Voc (V)	43.700	43.609	0.21

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.30 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



รูปที่ 4.8 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

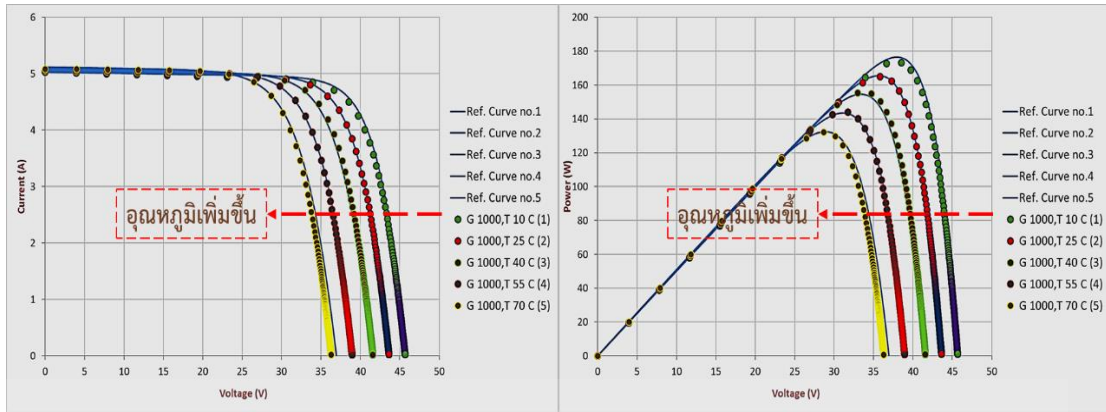
จากผลการจำลอง รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	29.660	27.586	6.99
400	62.524	61.071	2.32
600	96.402	95.304	1.14
800	130.851	129.883	0.74
1000	165.544	165.043	0.30

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.30 – 6.99 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

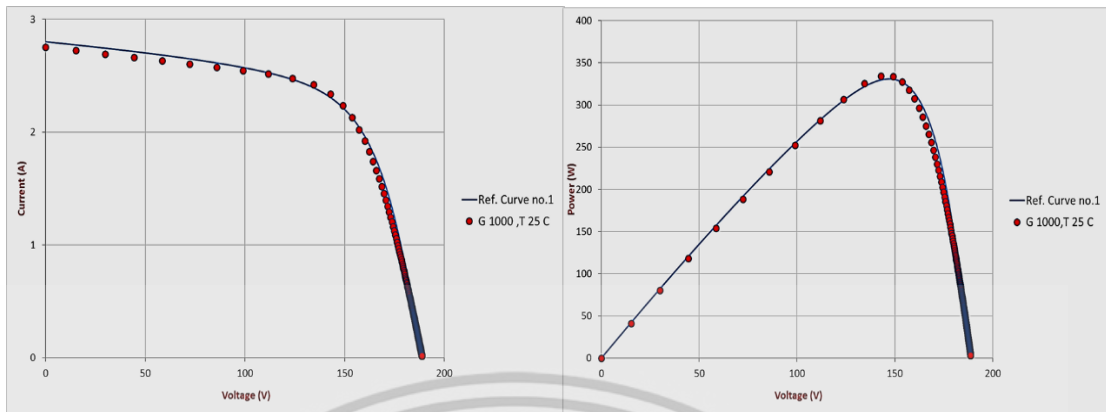
จากผลการจำลอง รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	176.484	173.333	1.79
25	165.544	165.043	0.30
40	154.540	155.005	0.30
55	143.500	143.924	0.30
70	132.439	132.228	0.16

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหลายผลึก อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.16 – 1.79 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

### 4.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon, a-Si)



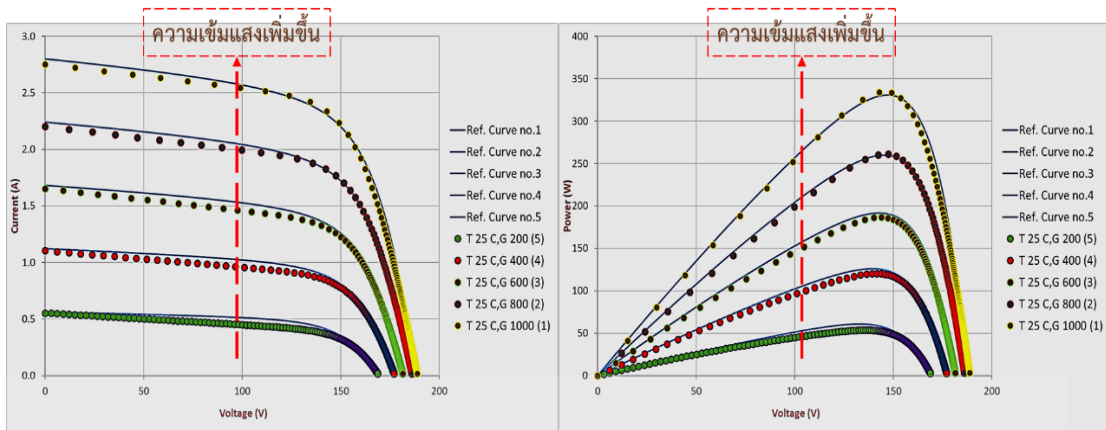
รูปที่ 4.10 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	330.762	332.445	0.51
Im (A)	2.251	2.237	0.62
Vm (V)	146.969	149.110	1.46
Isc (A)	2.800	2.754	1.63
Voc (V)	187.800	188.729	0.49

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.51 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



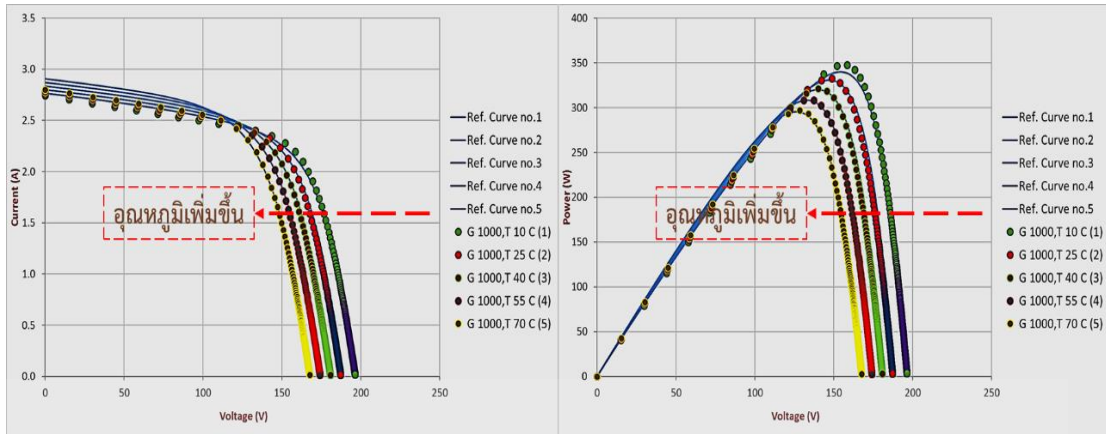
รูปที่ 4.11 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	60.664	53.639	11.58
400	125.929	120.349	4.43
600	191.583	186.706	2.55
800	259.864	263.017	1.21
1000	330.762	332.445	0.51

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.51 – 11.58 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



รูปที่ 4.12 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

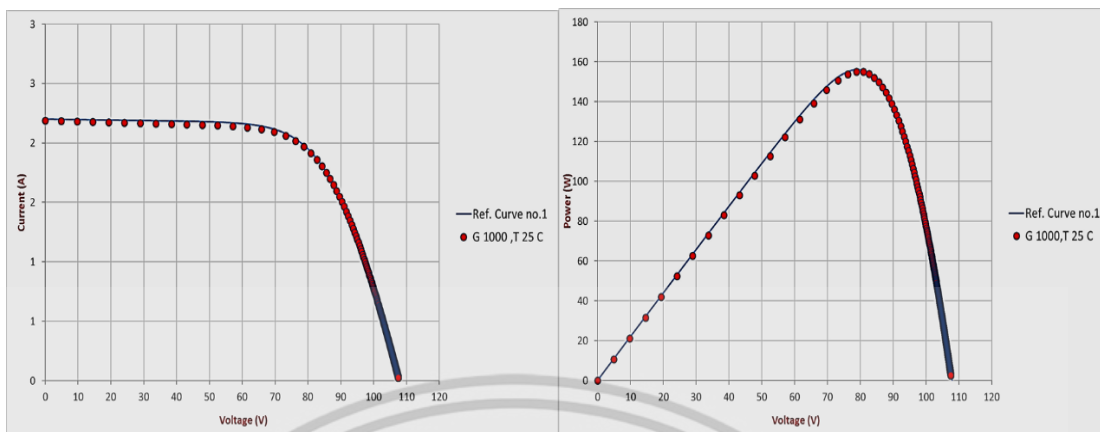
ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	339.845	347.584	2.28
25	330.762	332.445	0.51
40	320.086	321.229	0.36
55	308.233	309.405	0.38
70	295.518	296.972	0.49

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.49 – 2.28 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนต์ (CIS)



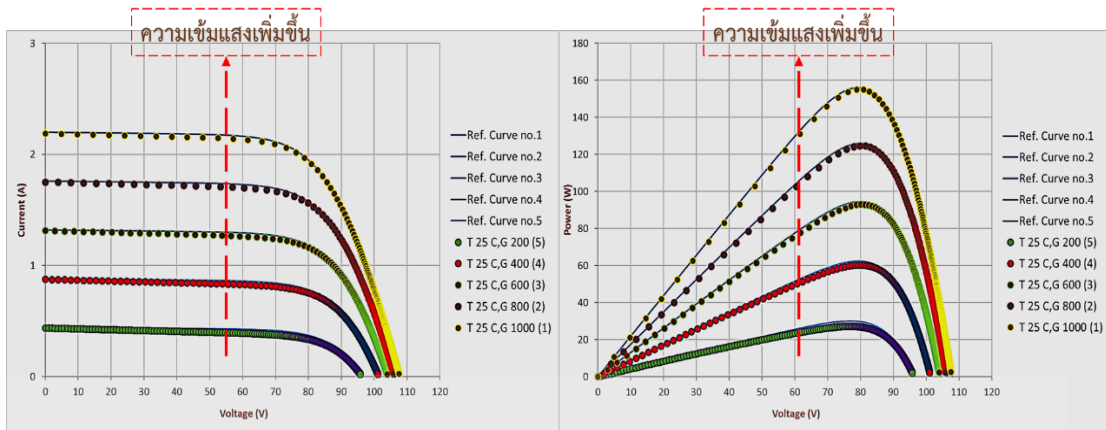
รูปที่ 4.13 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ STC

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ STC

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนต์ ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	156.072	155.069	0.64
Im (A)	1.971	1.969	0.11
Vm (V)	79.176	78.757	0.53
Isc (A)	2.200	2.190	0.46
Voc (V)	108.000	107.531	0.43

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ CIS ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.64 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



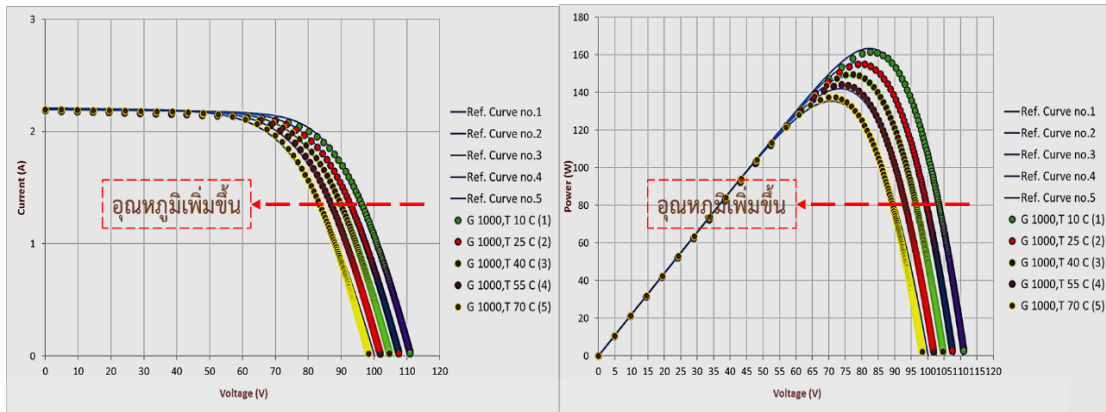
รูปที่ 4.14 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลไนด์ ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	30.059	27.254	9.33
400	62.450	60.270	3.49
600	94.576	93.043	1.62
800	125.896	124.728	0.93
1000	156.072	155.069	0.64

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.64 – 9.33 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



รูปที่ 4.15 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

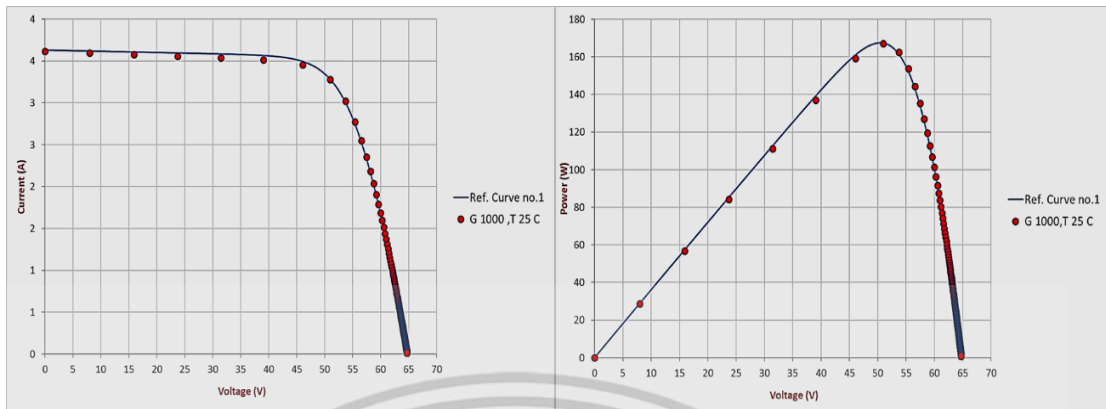
จากผลการจำลอง รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเซลล์ไนด์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	163.464	161.606	1.14
25	156.072	155.069	0.64
40	148.933	149.701	0.52
55	142.051	142.219	0.12
70	135.427	135.563	0.10

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS อุณหภูมิต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10 – 1.14 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

#### 4.2.5 HIT (Heterostructure with Intrinsic Thin Layer) Solar cell



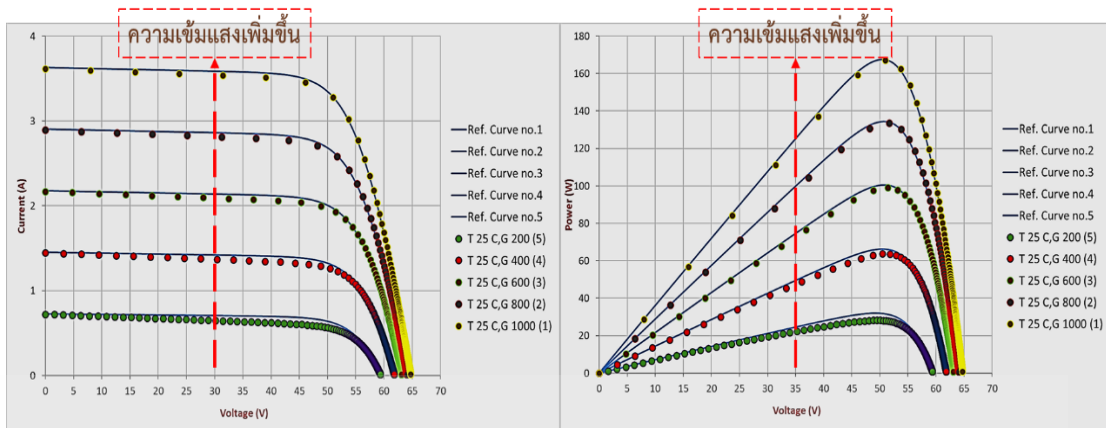
รูปที่ 4.16 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	167.481	167.116	0.22
Im (A)	3.325	3.278	1.43
Vm (V)	50.366	50.986	1.23
Isc (A)	3.630	3.615	0.42
Voc (V)	64.900	64.727	0.27

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 0.22 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



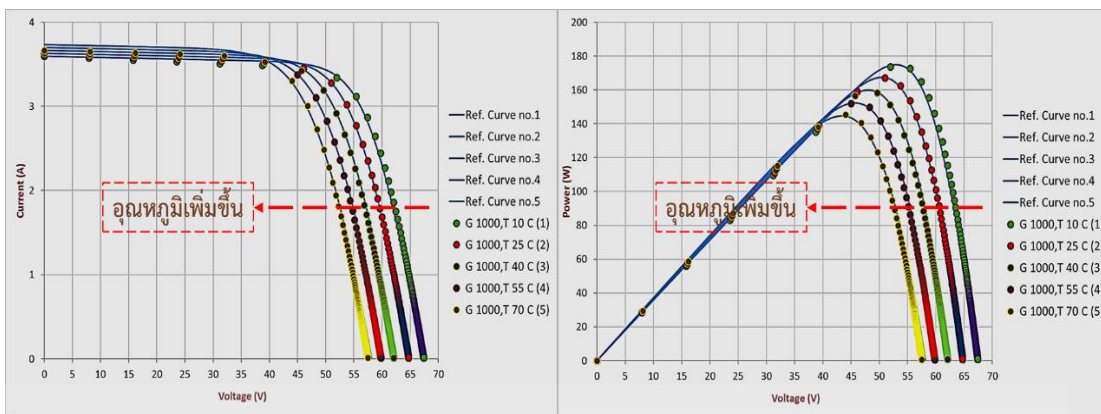
รูปที่ 4.17 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	32.024	28.259	11.76
400	66.257	63.727	3.82
600	100.518	99.068	1.44
800	134.386	133.510	0.65
1000	167.481	167.116	0.22

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 11.76 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง



รูปที่ 4.18 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

จากผลการจำลอง รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup>

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	174.993	174.703	0.17
25	167.481	167.116	0.22
40	159.917	159.547	0.23
55	152.308	151.942	0.24
70	144.670	145.416	0.52

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT Solar cell ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup> มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.23 – 0.52 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

#### 4.2.6 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่ STC

เทคโนโลยีแผงเซลล์แสงอาทิตย์	Pm (W) STC Performance	Simulation	Error (%)
Mono-Si	165.114	164.683	0.26
Poly-Si	165.544	165.043	0.30
A-Si	330.762	332.445	0.51
CIGS	156.072	155.069	0.64
HIT	167.481	167.116	0.22

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิด ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 1.04 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)					ช่วง Error (%)
	Mono-Si	Poly-Si	A-Si	CIGS	HIT	
200	8.49	6.99	11.58	9.33	11.76	6.37-11.76
400	2.63	2.32	4.43	3.49	3.82	2.32-4.43
600	0.95	1.14	2.55	1.62	1.44	0.95-2.55
800	0.35	0.74	1.21	0.93	0.65	0.35-1.21
1000	0.26	0.30	0.51	0.64	0.22	0.22-0.64

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิด ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 11.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในค่าที่สูง ๆ ดังแสดงดังตารางที่ 4.18 ซึ่งเมื่อจำลองในสภาวะความเข้มแสงสูง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 - 1.04 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางกลับกันที่ความเข้มแสงต่ำ

ๆ การจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเนื่องมาจากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ความเข้มแสงต่ำของเซลล์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน

**ตารางที่ 4.19** ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มแสงคงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Error (%)					ช่วง Error (%)
	Mono-Si	Poly-Si	A-Si	CIGS	HIT	
10	0.13	1.79	2.28	1.14	0.17	0.13-2.28
25	0.26	0.30	0.51	0.64	0.22	0.22-0.64
40	0.32	0.30	0.36	0.52	0.23	0.23-0.52
55	0.60	0.30	0.38	0.12	0.24	0.12-0.60
70	0.75	0.16	0.49	0.10	0.52	0.10-0.75

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิดอุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มแสงคงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10 – 2.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ ดังแสดงดังตารางที่ 4.19 ซึ่งเมื่อจำลองในสภาวะอุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10 – 0.75 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางกลับกันที่อุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ การจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเนื่องมาจากคุณสมบัติการทำงานที่อุณหภูมิต่ำของเซลล์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากสมมติฐานและวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้คือการศึกษากonstrukสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มาจำลองการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถเปรียบเทียบการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink กับข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการสร้างแบบจำลองได้เริ่มศึกษาจากวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด ซึ่งกระบวนการทำงานของวงจรนี้เปรียบเสมือนเป็นการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรง อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect)) โดยวิเคราะห์วงจรตามกฎของ Kirchhoff law จึงได้สมการซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังสมการที่ (2.10) เป็นสมการตั้งต้นในการสร้างแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อทำการสร้างแบบจำลองสำเร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองว่ามีประสิทธิภาพในการจำลองมากแค่ไหน โดยทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จากแบบจำลองข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าและแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากหลายชนิด โดยเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดลองกับแบบจำลองนี้มีทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่

- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon, Mono-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon, Poly-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon, a-Si)
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมเทลลูไรด์ (Copper Indium Selenide, CIS)
- HIT (Heterostructure with Intrinsic Thin Layer) Solar cell

ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ข้อมูลจำเพาะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดดังที่กล่าวมา โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยกำหนดค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G$ :  $W/m^2$ ) เท่ากับ  $1000 W/m^2$  และกำหนดให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ  $25 ^\circ C$
- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $G$ :  $W/m^2$ ) ตั้งแต่  $200, 400, 600, 800$  และ  $1,000 W/m^2$  และกำหนดให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ ( $T$  เท่ากับ  $25 ^\circ C$ )
- ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแผงเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ (T: °C) ตั้งแต่ 10, 25, 40, 55 และ 70 องศาเซลเซียส และกำหนดให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ (G เท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$ )

จากการทดสอบพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิด ที่ STC มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 1.04 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจากโรงงาน ตามช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับในปัจจุบันคือ 0 – 5 เปอร์เซ็นต์

เมื่อจำลองผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิด ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 °C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 11.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในค่าที่สูง ๆ ซึ่งเมื่อจำลองในสภาวะความเข้มแสงสูง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.22 – 1.04 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางกลับกันที่ความเข้มแสงต่ำ ๆ การจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ความเข้มแสงต่ำของเซลล์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน

เมื่อจำลองผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 5 ชนิด อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มแสงคงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10 – 2.28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งเมื่อจำลองในสภาวะอุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10 – 0.75 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางกลับกันที่อุณหภูมิในค่าที่อุณหภูมิสูง ๆ การจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเนื่องจากคุณสมบัติการทำงานที่อุณหภูมิต่ำของเซลล์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน

จุดเด่นของแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink คือ สามารถทำนายการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในย่านที่มีความเข้มแสงสูง และอุณหภูมิสูง ได้อย่างแม่นยำ แต่ในย่านความเข้มแสงต่ำ หรืออุณหภูมิต่ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากยังไม่นำตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือความเข้มแสงต่ำ เช่น Capture loss, Wiring loss และ System loss เป็นต้น เข้ามาในการคำนวณนั่นเอง ซึ่งในอนาคตแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ยังสามารถพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเพิ่มจำนวนแผง และ เพิ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [2] ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์. เทคโนโลยีการสร้างและใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.
- [3] สมชัย วงษ์เมตตา. “การสร้างและพัฒนาเซลล์อาทิตย์แบบซิลิกอน”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2525.
- [4] Bernhard,K.J. 1998.Crystalline Silicon Solar Cells. Translated by Swadlincore, R.W.UK:John Wiley&Sons.
- [5] Green, M.A. 1992. Solar Cells Operating Principles, **Technology and System Applications**. New South Wales:The University of New South Wales.
- [6] Godfrey boyle. Renewable Energy. 2011,76-80.
- [7] Jianhua Zhao, Aihua Wang, and Martin A. Green. “ 19. 8% efficient “honeycomp” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells.” **APPLIED PHYSICS LETTERS**, 1997, Vol. 73, pp.1991-1993
- [8] O. Schuitz, S. W. Glunz and G. P. Willeke. “Multicrystalline Silicon SolarCells Exceeding 20% Efficiency.” **Process in photovoltaics: research and applications, 2004**, Vol. 12, pp. 553-558
- [9] Steven S. Hegedus and William N. Shafarman. “Thin-Film Solar Cells: Device Measurements and Analysis.” **Process in photovoltaics: research and applications, 2004**, Vol. 12, pp. 155-176
- [10] S. Benagli, D. Borrello, E. Vallet-Sauvain, J. Meier, U. Kroll, J. Hoetzel, J. Bailat, J. Steinhauser, M. Marmelo, G. Monteduro and L. Castens. “ High-Efficiency Amorphous Silicon Devices on LPCVD-ZNO TCO prepared in Industrial KAITM-M R&D Reactor.” **24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009**. pp. 2293-2298
- [11] X. Wu, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, C.DeHart, J.C. Keane, A. Duta, T.J. Coutts, S. Asher, D.H. Levi, H.R. Moutinho, Y. Yan, T. Moriarty, S. Johnston, K. Emery, and P. Sheldon. “ High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells.” **NCPV Program Review Meeting, 14-17 October 2001**
- [12] Carlson D.E., Wronski C.R. “ Amorphous Silicon Solar Cell.” **Applied Physics Letters**, Vol. 28, 1976, p. 671.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Brodsky M.H., Editor. Amorphous Semiconductors. New York : Springer Verlag, 1979.
- [14] Hamakawa Y., Editor. Amorphous Semiconductor. North Holland OHM : Japan Annual Reviews in Electronics, Computers & Telecommunicatetions (JARECT), 1982, p. 134.
- [15] Schropp, Ruud E.I. and Miro Zemn. Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells : Modeling, Materials and Device Technology. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [16] Johannes Peter Seif and et al. 2014. “Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells.” *J. Appl. Phys.* 115.
- [17] Charanpreet Sethi and et al. 2012. “Optimization of Surface Reflectance for Alkaline Textured Monocrystalline Silicon Solar Cell.” *International Journal of Computing Science and Communication Technologies.* 5(1) : 0974-3375.
- [18] P. Papet and et al. 2006. “Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching.” *Selected Papers from the Solar Cells and Solar Energy Materials Symposium.* 90(22) : 2319–2328.
- [19] M. Moreno and et al. 2014. “A comparative study of wet and dry texturing processes of c- Si wafers for the fabrication of solar cells.” *Solar Energy.* 101 : 182–191.
- [20] S.Zaidi, D.Ruby, J.Gee. 2001. “Characterization of random reactive ion etched-textured silicon solar cells.” *IEEE Transactions on Electron Devices.* 48 (6) : 1200–1206.
- [21] H.F.W.Dekkers, F.Duerinckx, J.Szlufcik and J.Nijs. 2000. “Silicon surface texturing by reactive ion etching.” *Opto-Electronics Review.* 8 (4) : 311–316.
- [22] **The Oxford Instruments.** Reactive Ion Etching (RIE). [Online]. Available : <http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-and-growth/plasma-etch-deposition/rie>
- [23] Stephen J. Fonash. 2010. **Solar Cell Device Physics.** 2nd ed.: Elsevier Inc.
- [24] ดุสิต เครื่องงาม. 2542. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน.** เล่มที่ 1.:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [25] H.J. Hovel. 1975. **Semiconductors and Semimetals .** 11.: Academic Press
- [26] E.S.Heavens. 1955. **Optical Properties of Thin Solid Films.** Buterworths

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [27] C. Gianetti et al. 1989. "SnO<sub>2</sub> Reduction by H-Bombardment and its Effects on SnO<sub>2</sub>/a-Si Interfaces." **J. Non-Cryst. Solid.** 115: 204.
- [28] A. Catalano, B. W. Faughnan and A. R. Moore.1986. "Effects of Low Level Boron Doping of the ilayer Performance of a-SiC:H p-i-n Devices. **Solar Energy Material.** 13 : 65.
- [29] D. Kruangam, K. Hanaki, S. Nonomura, H. Okamoto and Y. Hamakawa. 1984. "Characterization of Undoped Microcrystalline Silicon for Solar Cell Application." **Technical Digest of Int. Photovoltaic Science & Engineering Conf. (PVSEC-1).** Kobe. Japan. 437.
- [30] A.Matsuda. 1983. "Formation Kinetics and Control of Microcrystalline in  $\mu$ -Si:H From Glow Discharge Plasma." **J. Non-Cryst. Solids.** 59&60 : 767.
- [31] Guorong Li, Yuqin Zhou and Fengzhen Liu. 2012. "Influence of textured c-Si surface morphology on the interfacial properties of heterojunction silicon solar cells." **Journal of Non-Crystalline Solid.** 358 : 2223–2226.
- [33] ดุสิต เครื่องาม. 1989. **สถานภาพของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.** วิศวกรรมสาร 65
- [34] Van Sark, Wilfried G. J. H. M., Korte, Lars, Roca, Francesco (Eds.). 2012. "Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells" **Engineering Materials.**15
- [35] Pathros Cardenas & David Tung. **Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition.**
- [36] M. REICHE, U. GOSELE, M. WIEGAND. 2000. // "Modification of Si (100)-Surfaces by SF<sub>6</sub> Plasma Etching – Application to Wafer Direct Bonding." **Cryst. Res. Technol.** 35 : 807-821.
- [37] Yeong-Dae Lim, Seung-Hwan Lee and Won Jong Yoo. 2009. "Roles of F and O Radicals and Positive Ions in a SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> Plasma in Forming Deep Via Structures." **Journal of the Korean Physical Society.** 54(5) : 1774-1778.
- [38] H.Watanabe, K.Haga and T.Lohner. 1993. "Structure of high-photosensitivity silicon-oxygen alloy films" **J. Non-Cryst. Solids.** 1085 : 164-166.
- [39] Q.Wang, M. R. Page, E. Iwaniczko, Y. Q. Xu, L. Roybal, R. Bauer, B. To, H. C. Yuan, A. Duda, and Y. F. Yan. 2008. "Crystal Silicon Heterojunction Solar Cells by Hot-Wire CVD." **the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, California.**
- [30] Walker, Geoff, "Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, 2001, 21(1).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] Alsayid, B. , Jallad, J. , “ Modeling and simulation of photovoltaic cells/modules/arrays,” Int. J. Res. Comput. Sci. (IJRRCS), 2011, 2(6).  
M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “ Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” Power Electronics Conference, 2009, pp. 1244-1254.
- [32] A. Chatterjee, A. Keyhani, and D. Kapoor, “Identification of Photovoltaic Source Models,” Energy Conversion, IEEE Transaction, 2011, vol.PP, pp. 1-7.
- [33] X. Weidong, W. G. Dunford, and A. Capel, “ A novel modeling method for photovoltaic cells,” Power Electronics Specialists Conference, 2004, Vol. 3, pp. 1950-1956,
- [34] J. A. Gow and C. D. Manning, “Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies,” Electric Power Application, 1999, IEE Proceeding, Vol. 146, pp. 193-200.
- [35] Z. Salam, K. Ishaque, and H. Taheri, “An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system,” Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010, pp.1-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

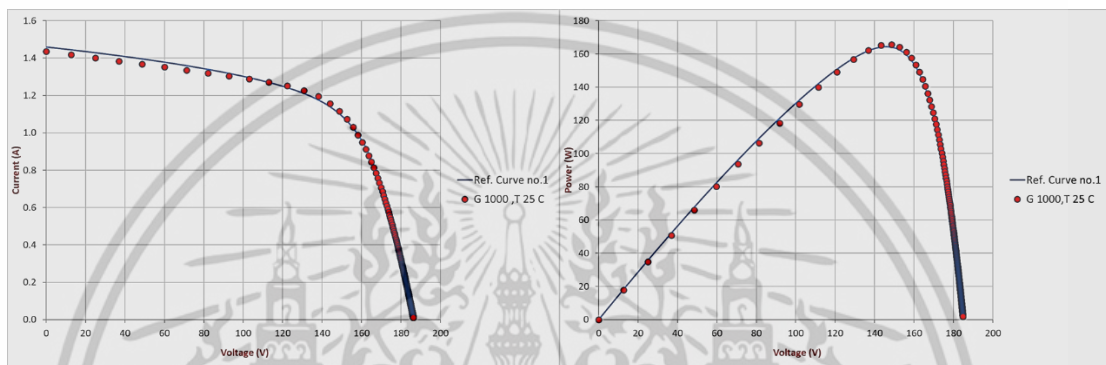


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ

เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม (Amorphous Silicon, a-Si tandem)

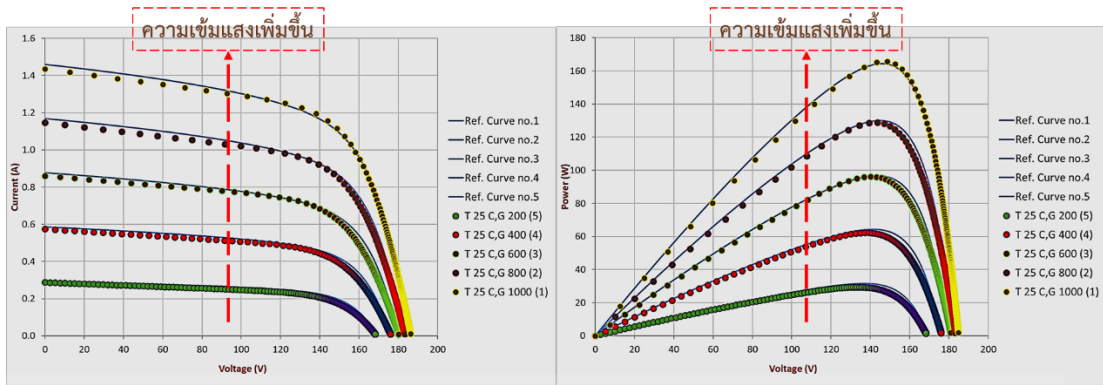


รูปที่ ก-1 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ STC

ตารางที่ ก-1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	164.371	165.558	0.72
Im (A)	1.127	1.116	0.93
Vm (V)	145.902	148.574	1.83
Isc (A)	1.460	1.436	1.63
Voc (V)	185.200	186.273	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

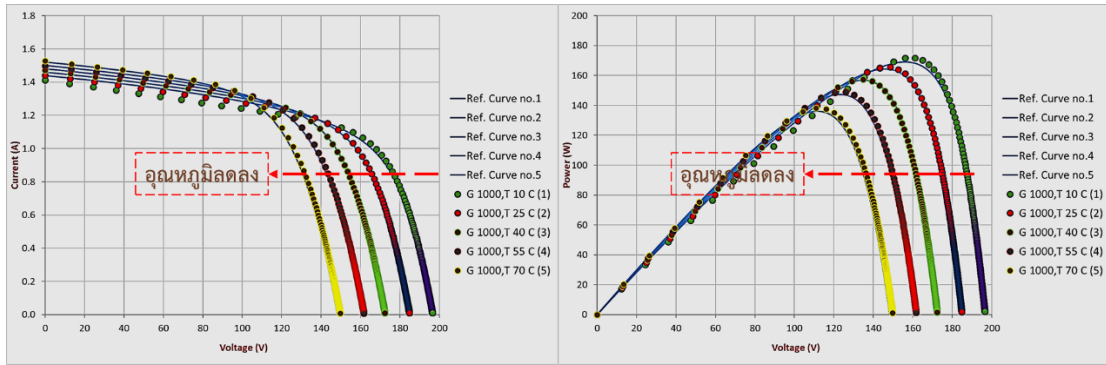


รูปที่ ก-2 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	31.610	29.459	6.81
400	64.330	62.261	3.22
600	96.725	95.170	1.61
800	130.058	128.353	1.31
1000	164.371	165.558	0.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



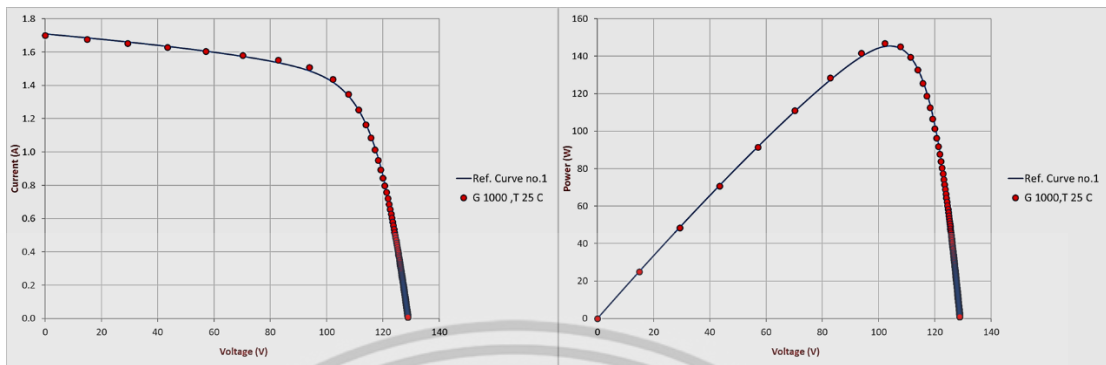
รูปที่ ก-3 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสแทนเดม ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	136.129	138.253	1.56
25	147.318	148.827	1.02
40	156.916	157.377	0.29
55	164.371	165.558	0.72
70	169.052	171.719	1.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน (Micro Crystalline Amorphous Silicon,  $\mu\text{c/a-Si}$ )

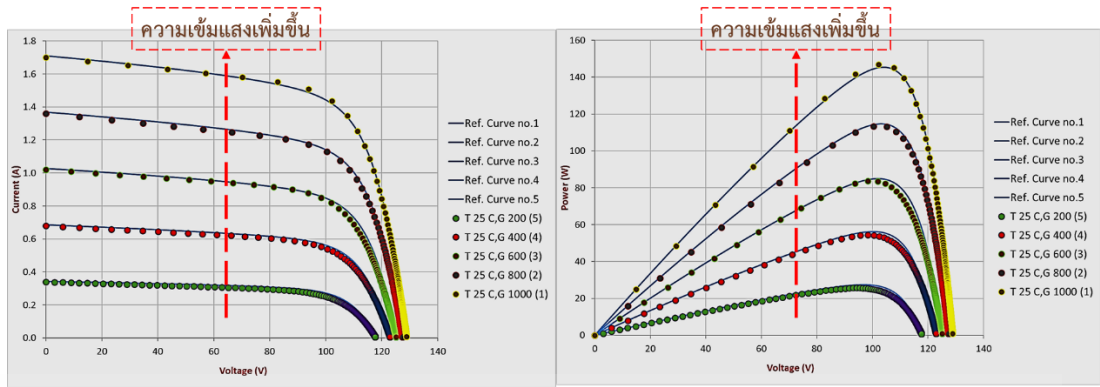


รูปที่ ก-4 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ STC

ตารางที่ ก-4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ STC

Parameters	STC Performance	Simulation	Error (%)
Pm (W)	145.418	146.925	1.04
Im (A)	1.400	1.437	2.68
Vm (V)	103.877	102.215	1.60
Isc (A)	1.710	1.701	0.53
Voc (V)	128.800	128.889	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

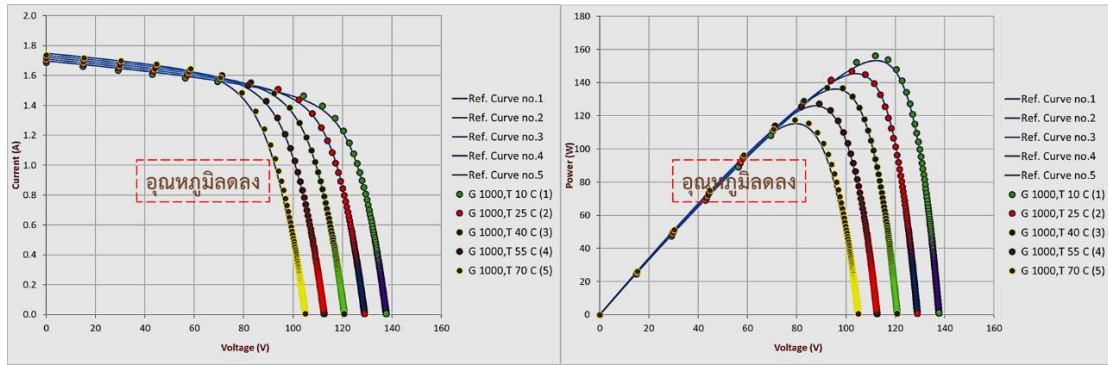


รูปที่ ก-5 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ โดยอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 25 C

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
200	27.444	25.695	6.37
400	56.238	54.387	3.29
600	84.969	83.656	1.55
800	114.688	113.327	1.19
1000	145.418	146.925	1.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-6 การจำลองเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โมโนคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์อะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์คงที่ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$

อุณหภูมิ (°C)	Pm (W) Performance	Simulation	Error (%)
10	153.335	156.320	1.95
25	145.418	146.925	1.04
40	136.155	136.910	0.55
55	126.006	127.230	0.97
70	115.297	117.535	1.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] เอกวัฒน์ บุพิ, ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “การประเมินแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7, pp. 319-322 (2015).
- [2] เอกวัฒน์ บุพิ, ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์, พรหมพัทธ์ ดาวัลย์, วิไลลักษณ์ ศิริวงษ์รังสรรค์, กอบศักดิ์ ศรีประภา และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, pp. 585-588 (2016).




**RMUTK**  
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 7


  
**EENET2015**  
*Creative Technology for Green Energy*  
 27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7**  
 The 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network  
 of Rajamangala University of Technology



**Conference Topics**

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

**คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ**  
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120  
<http://www.eenet2015.org>


  
**EENET2015**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

การประเมินแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

Estimation of Photovoltaic Module 250 W using MATLAB/Simulink

เอกวัฒน์ นูที<sup>1</sup> ทรงเกียรติ กิตติธนธิกรณ<sup>1</sup> กอบศักดิ์ ศรีประภา<sup>1</sup> และวิศุทธิ์ ชูริ่งเรือง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2739-0643 E-mail: kmutilbk\_55@hotmail.com

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ 112 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง

หลวง จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 02-564-6900 E-mail: info@nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรณีศึกษาแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W โดยสร้างขึ้นจากสมการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง อุณหภูมิ, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมในงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย ซึ่งจากการทดสอบแบบจำลองพบว่าความต้านทานอนุกรมและขนานมีผลต่อค่า Fill Factor และ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ และความเข้มแสงส่งผลต่อกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ตัวต้านทานอนุกรมและขนานต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

This article is presented Models of photovoltaic solar power 250 W was built on the basic equations of the solar cell. To study the effect of light intensity, temperature, resistors in series and parallel to the power of solar cells. To compare the simulated solar panels in practice. Makes it possible to study the characteristics of solar cells. It also can be used to control the solar system as well. Therefore, the test showed that the resistance in series and parallel Fill Factor and affect the temperature of the solar affect the output voltage of the solar cell. And light intensity affect the output of solar cells.

Keywords: Photovoltaic Module, Irradiance, temperature, resistors in series and parallel to the power of solar cells

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนได้รับความนิยมอย่างมาก ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนด้วยเช่นกัน พลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลมเป็นต้น พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องด้วยพื้นที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell) ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อเสียตรงที่ใช้ต้นทุนการผลิตและต้นทุนในการติดตั้งค่อนข้างสูงในการทดลองนั้นมักจะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มีปริมาณต่างกันในแต่ละวันแต่ละเวลา ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองนี้ สามารถที่จะใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถจำลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โมดูล ที่จะเกิดความสะดวกยิ่งขึ้นเพราะสามารถทดลองในช่วงเวลาหรือสถานที่ใดก็ได้

2. การนำเสนอและการสร้างแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ PN Junction [2] ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังในรูปที่ 1 และสามารถแสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

ภาพระบวนการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{1}$$

ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชัน เอกโปเนนเชียล (exponential equation) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \tag{2}$$

เมื่อ  $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (A),  $I_0$  คือ กระแสไบอัสต่ออิมิตชันกลับของไดโอด (A),  $a$  คือ แรงดันซึ่งเกิดจากความร้อน,  $V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (Volt),  $R_s$  คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ ( $\Omega$ ),  $R_p$  คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ ( $\Omega$ )

ซึ่งแรงดันที่เกิดจากความร้อน ( $a$ ) จะแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_c}{q} \tag{3}$$

เมื่อ  $N_s$  คือ จำนวนเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์,  $A$  คือ ค่า Ideal factor ของ Si-Poly มีค่าเท่ากับ 1.3 (ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์),  $T_c$  คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kelvin),  $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $k$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/Kelvin แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม แสดงดังสมการที่ (4)

$$V = V_m - B_s (T_m - T_0) \tag{4}$$

เมื่อ  $V_m$  คือ ค่าแรงดันสูงสุดของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์,  $B_s$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดัน ( $V/^\circ C$ ),  $T_m$  คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $^\circ C$ ),  $T_0$  คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ( $^\circ C$ )

ในบทความนี้เทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ Si-poly และในการทดลองนี้คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดกำลังไฟฟ้า 245-260 W

STC Performance	SP245	SP250	SP255	SP260
Rated Power, P <sub>max</sub> (W)	245	250	255	260
Open Circuit Voltage, Voc (V)	37.9	37.97	37.97	37.75
Short Circuit Current, Isc (A)	9.79	9.69	9.20	9.08
Maximum Power Voltage, V <sub>mp</sub> (V)	28.96	29.01	29.44	29.79
Maximum Power Current, Imp (A)	8.20	8.34	8.43	8.47
Module Efficiency (%)	14.84	15.15	15.45	15.75
Maximum Power Tolerance (W)		-9.25 W		
Maximum Open-Circuit Voltage (V)		4820		
Maximum Rated Current (A)		15		
Temperature coefficient of P <sub>max</sub>		-0.42 % / °C		
Temperature coefficient of Voc		-0.31 % / °C		
Temperature coefficient of Isc		0.05 % / °C		
Normal operating cell temperature (NOCT)		45.2 °C		

3.การกำหนดค่าพารามิเตอร์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ 4 ตัวที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์คือ  $I_0$ , ค่า  $I_{sc}$  เป็นผลของแสงที่ตกกระทบ และค่า  $R_s, R_p$  เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ ของ  $I_{ph}$

ค่า  $I_{ph}$  เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นตัววัดโดยตรงกับค่าความเข้มแสง (Irradiance) และอุณหภูมิตามสมการที่ (5)

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot \Delta T) \tag{5}$$

เมื่อ  $G$  คือ ความเข้มแสง ( $W/m^2$ ),  $G_{ref}$  คือ ความเข้มแสงที่ STC =  $1000$  ( $W/m^2$ ),  $\mu_{sc}$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ( $A/^\circ C$ ),  $\Delta T = T_c - T_{c,ref}$  (Kelvin),  $T_{c,ref}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ที่ STC =  $25 + 273 = 298$  K,  $I_{ph,ref}$  คือ กระแสที่เกิดจากความเข้มแสงที่ STC

3.2 การกำหนดพารามิเตอร์ ของ  $I_0$

ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อพลังงานไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากกระแสลัดวงจรสัมพันธ์กับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิมิตชันกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse saturation current of diode ( $I_0$ ) ดังสมการที่ (6)

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \tag{6}$$

เมื่อ  $E_g$  คือ Band gap energy of semiconductor,  $A$  คือ สมการ  $I_{sc}$  เป็นดังสมการที่ (7)

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp \left( \frac{-V_{oc,ref}}{a} \right) \tag{7}$$

3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ ของ  $R_s$  และ  $R_p$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดัน ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามค่าแปรในสมการที่ (2) จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

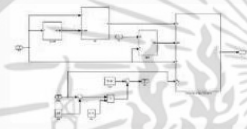
Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

$$R_p = \frac{V_{oc,ref} - I_{sc,ref} R_s}{I_{sc,ref} - I_{sc,ref} \left[ \exp \left( \frac{V_{oc,ref} + I_{sc,ref} R_s - V_{oc,ref}}{a} \right) - 1 \right] - I_{sc,ref} \left[ \exp \left( \frac{-V_{oc,ref}}{a} \right) - 1 \right] \left( \frac{P_{max}}{V_{oc,ref}} \right)} \quad (8)$$

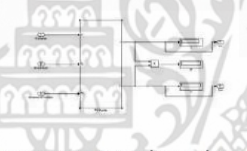
4.แบบจำลอง และผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink โดยศึกษา ผลกระทบของ 4 ตัวแปรต่อจุดจ่ายกำลังไฟของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปวิเคราะห์ในรูปแบบคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตามขั้นตอน โดยนำแบบจำลองของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กล่าวไว้ข้างต้นนำมาสร้างรวม ดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W ในโปรแกรม Matlab/Simulink

4.2 ผลการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

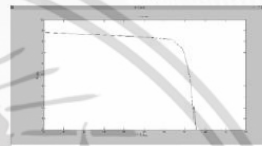
ในการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ขาเข้าของแบบจำลอง คือ ความเข้มแสง และ อุณหภูมิ, พารามิเตอร์ขาออกของแบบจำลอง คือ กระแส, แรงดัน และ กำลังไฟฟ้า ซึ่งค่าความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ป้อนเข้าไป จะใช้ค่า STC (Standard Test Conditions) คือ ค่าความเข้มแสง เท่ากับ 1000 W/m<sup>2</sup>, อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

4.2.1 ผลการจำลองของค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการที่ (4) สามารถหาค่าแรงดันได้ คือเมื่อ V<sub>oc</sub> เท่ากับ 30.01 Volt, B<sub>i</sub> เท่ากับ 0.0013 (V<sup>2</sup>/C), I<sub>sc</sub> คือ 25 (C), T<sub>o</sub> คือ 25 (C) ดังนั้นค่าแรงดัน เท่ากับ 30.01 Volt

4.2.2 ผลการจำลองความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อกำหนดค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิเข้าไปในแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ และอีกพารามิเตอร์ที่กำหนดคือ R<sub>s</sub> ซึ่งในนี้จะให้เท่ากับ 0.06 โอห์ม เพราะเป็นค่าที่ได้ทำการคำนวณมาแล้วหลังจากนั้นนำค่า R<sub>s</sub> ไปหาค่า R<sub>p</sub> เมื่อคำนวณออกมาแล้วจะมีค่าเท่ากับ 55.54 โอห์ม และการแสดงผลจะออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์คุณสมบัติ I-V และกราฟความสัมพันธ์คุณสมบัติ P-V ดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ และจะแสดงผลของการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์และผลการเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์คุณสมบัติ I-V ที่ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink (โดยที่แกน x คือค่าแรงดัน และแกน y คือค่ากระแส)



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์คุณสมบัติ P-V ที่ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโปรแกรม Matlab/Simulink (โดยที่แกน x คือค่าแรงดัน และแกน y คือค่ากำลังไฟฟ้า)

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W

	SP250	Simulation	Error
P <sub>max</sub> (W)	250	252.08	0.83 %
V <sub>oc</sub> (V)	30.01	30.01	0 %
I <sub>sc</sub> (A)	8.34	8.40	0.71 %

และเมื่อดึงข้อมูลออกมาจะพบว่าเมื่อป้อนค่าอุณหภูมิให้ครั้งที่ 25 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนค่าความเข้มแสง ดังนี้ 100, 200,

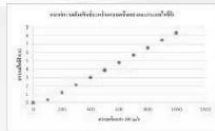
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

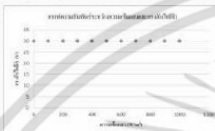
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

300, ..., 1000 W/m<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมากขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ ดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและแรงดันไฟฟ้า

**5.สรุป**

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย โปรแกรม Matlab/Simulink พบว่าเมื่ออุณหภูมิคงที่มีผลกระทบบต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำให้แรงดันขาออกมีค่าคงที่ไปด้วย ค่าความต้านทาน R<sub>s</sub> ที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทาน R<sub>s</sub> น้อยลงส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้ไม่ถึงจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ประสิทธิภาพลดลง สำหรับค่าความเข้มแสงจะเป็นตัวกำหนดกระแสขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ถ้าความเข้มแสงต่ำกระแสขาออกก็จะต่ำลงด้วย อุณหภูมิทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลดลง ส่วนผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP250 ดังตารางที่ 3 ดังนั้นจึงสามารถได้วิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์และบอกแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าของเซลล์ได้

**6.กิตติกรรมประกาศ**

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านวิเคราะห์และวิเคราะห์มีผลกระทบที่ประสพผลสำเร็จได้เป็นอย่างดี

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Habbati Bellia<sup>1</sup>, Ramdani Youcef<sup>2</sup>, Moulay Fatima<sup>3</sup> "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB" Université Bechar, Algeria, Université Sidi-Bel-Abbes, Algeria, 2014
- [2] เชนนิตธิธ อิมปริดา, วันชัย ทรัพย์สิงห์ "ฯแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [3] Aissa Chouder<sup>2</sup>, Santiago Silvestre<sup>1</sup>, Nawel Sadaoui<sup>1</sup>, Lazhar Rahmani<sup>1</sup> "Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters" Development Centre of Renewable Energies, MNT, Electronic Engineering Department, Laboratory of Automatic, University of Setif

**ประวัติผู้เขียนบทความ**

	นายเอกวัฒน์ นูติ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.
	นายทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ จบการศึกษาระดับปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
	นายคอมศักดิ์ ศรีประภา จบการศึกษาระดับปริญญาโท Tokyo institute of technology ปัจจุบันดำรงตำแหน่งนักวิจัย ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
	รศ.ดร.วิสุทธิ์ สุทธิรุ่งเรือง จบการศึกษามหา Doctor of Engineering (Solid State Electronics) จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





# EENET2016

**Innovation for Sustainability Entrepreneur**  
25-27 May 2016, Duangjit Resort & Spa,  
Patong Beach, Phuket



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

**The 8th Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology**



**Conference Topics**

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

















เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

A Model of Photovoltaic Module using Matlab/Simulink

เอกวัฒน์ บุทธิ<sup>1</sup> ทรงเกียรติ กิตติสารวิรัช<sup>1\*</sup> พรหมศักดิ์ คารวีย์<sup>1</sup> วิไลลักษณ์ ศิริวงษ์รังสรรค์<sup>1</sup> กอบศักดิ์ ศรีประภา<sup>1</sup> และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง aekkwat.bupi@outlook.com

<sup>2</sup>สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

<sup>3</sup>วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>4</sup>ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จากวงจรพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอาศัยวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด โดยดัดแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ามาตรฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 W พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันค่าใกล้เคียงกันมากโดยคลาดเคลื่อนเพียง 0.001% และ โมเดลทำการเปรียบเทียบข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในช่วง 25.57 - 28.38 % โดยในอนาคตแบบจำลองนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการคาดการณ์การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการบริหารจัดการพลังงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์, อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์, Matlab/Simulink

Abstract

This paper proposed model of energy production in Photovoltaic module using Matlab/Simulink. This model was implement base on single diode equivalent circuit. The energy production of Photovoltaic module that is affected by irradiance and module temperature are included in model. In addition, the simulation result were compared to the Photovoltaic with standard test condition (STC) 250 W, it was shown that there is good agreement between the simulation results and STC values. The error only 0.001%. The model compared with actual production of electricity from photovoltaic systems. Found a discrepancy in the 4.33 to 11.58%. In the future these models are advantageous for forecasting the energy production of PV system and implement in energy efficiency management.

Keywords: Solar cell, Irradiance, Module temperature, Matlab/Simulink

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทางเลือกเช่นพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการสนับสนุนจากนโยบายภาครัฐ ดังจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานที่เพิ่มการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีศักยภาพโดยพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยของประเทศไทย อยู่ที่ประมาณ 5 kWh/m<sup>2</sup> จึงได้มีการคิดจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งขนาดเล็ก (Solar Rooftop) และขนาดใหญ่ (Solar farm) เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งในอนาคตการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าโครงข่ายเป็นเรื่องสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ทางซึงก็คือการไฟฟ้าผลิต จำเป็นต้องควบคุมปริมาณไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าระบบสายส่งให้เพียงพอกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า อีกทั้งเพื่อให้การเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นหากสามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่าใด จะช่วยไปการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าทั้งระบบ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพด้วย

แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าออกมาเท่าใด ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างคืบเนื่อง ตั้งแต่แบบจำลองที่ใช้วงจรสมมูลแบบที่นำค่า R<sub>s</sub> มาคำนวณ แต่ไม่ได้นำค่า R<sub>sh</sub> มาคำนวณ [1] ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองเป็นอย่างมาก ต่อมาได้พัฒนาเป็นแบบจำลองแบบหนึ่งไดโอด [2-4] ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่มีตัวแปรไม่มากนักก็ยังมีทั้งความแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองอย่างคืบเนื่องเพื่อให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เช่นแบบจำลองสองไดโอด [5-7]

แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้บทความนี้ใช้วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและแม่นยำ โดยซึ่งสามารถพัฒนาและนำไปใช้คาดการณ์การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และคอมพิวเตอร์บริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต

ES03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

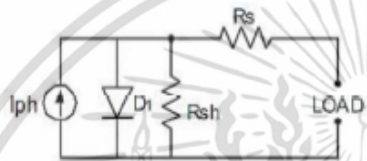
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

2. แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย รอยต่อพีเอ็น (p-n) ของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ซึ่งแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแสในวงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้เกิดประจุพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อและเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณขั้วทั้งสอง และ เมื่อต่อโหลดก็จะมีการไหลในวงจร ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยสมการซึ่งแสดงคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังสมการที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + I R_s)}{N_s k T} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

เมื่อ  $I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (A),  $I_0$  คือ กระแสในอัตรซิมด้วยย้อนกลับของไดโอด (A),  $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน มีค่า  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $N_s$  คือ Ideal factor,  $k$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/Kelvin,  $T$  คืออุณหภูมิที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ (K),  $V$  คือแรงดันตกคร่อมไดโอด (V),  $R_s$  คือความต้านทานอนุกรมของเซลล์ (Ω) และ  $R_{sh}$  คือความต้านทานขนานของเซลล์ (Ω)

โดยค่า Ideal factor จะขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังตารางที่ 1

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	Ideal factor
Si mono	1.2
Si poly	1.5
a-Si:H	1.0
a-Si:H random	2.5
a-Si:H triple	3
CdTe	1.5
CIS	1.9
AuGe	1.2

โดยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (V) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 2

$$V = V_{oc} - B (T_n - T_c) \quad (2)$$

เมื่อ  $V_{oc}$  คือ ค่าแรงดันสูงของเซลล์แสงอาทิตย์,  $B$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของแรงดัน (V/°C),  $T_n$  คือ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ (°C) และ  $T_c$  คือ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C)

ค่า  $I_{ph}$  มีความสัมพันธ์โดยแปรผันตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิ แสดงดังสมการที่ 3

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{ph,ref} + \mu_n (T - T_{ref}) \right] \quad (3)$$

เมื่อ  $G$  คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m<sup>2</sup>),  $G_{ref}$  คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC (Standard test condition),  $\mu_n$  คือ สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของกระแสตัววงจร,  $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC และ  $I_{ph,ref}$  คือ กระแสที่เกิดจากค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC ค่า  $I_0$  มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นไปดังสมการที่ 4

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \exp \left[ \left( \frac{E_g}{k} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (4)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Energy band gap) และ  $I_{0,ref}$  มีค่าดังสมการที่ 5

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp \left( \frac{q(V_{oc,ref})}{N_s k T} \right) \quad (5)$$

ค่า  $R_s$  และ  $R_{sh}$  สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$R_{sh} = \frac{V_{oc} (I_{sc,ref} R_s)}{I_{sc,ref} - I_{sc} \left( \exp \left[ \frac{q(V_{oc,ref} + I_{sc,ref} R_s - V_{oc})}{N_s k T} \right] - 1 \right) + I_{sc,ref} \left( \exp \left[ \frac{q(V_{oc,ref})}{N_s k T} \right] - 1 \right) \left( \frac{P_{in}}{V_{oc,ref}} \right)} \quad (6)$$

2.2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

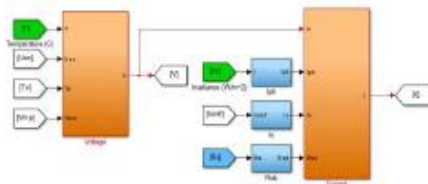
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สร้างด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยมีพารามิเตอร์หลักอยู่ 4 ค่าคือ  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  และ  $R_{sh}$  นำมาสร้างแบบจำลองการผิบัติไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

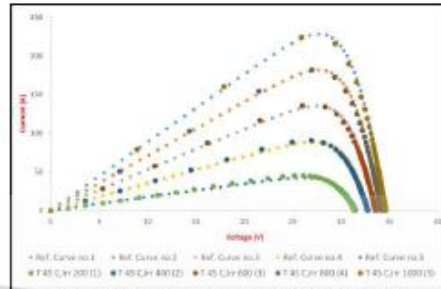
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

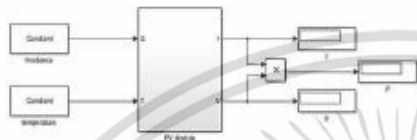
Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)



รูปที่ 2 2-V module whole parameters



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบกราฟ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 4 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Simulink

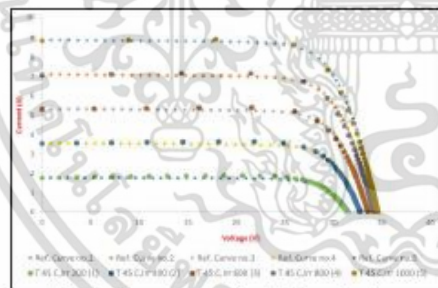
จากการทดลองพบว่า ค่าที่ได้อาจแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับค่าของเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงาน ที่ทุกค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

3. ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองข้างต้น โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าของสมมติฐานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

3.1.1 ผลการจำลองกราฟ P-V และ P-V ที่ความเข้มแสงต่างกัน

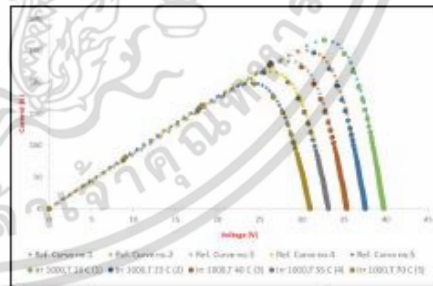
ทำการเปรียบเทียบกราฟที่กระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงาน โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง ตั้งแต่ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 W/m<sup>2</sup> และกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ (45 °C) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 เปรียบเทียบกราฟ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงต่างกัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกราฟ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 7 เปรียบเทียบกราฟ P-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

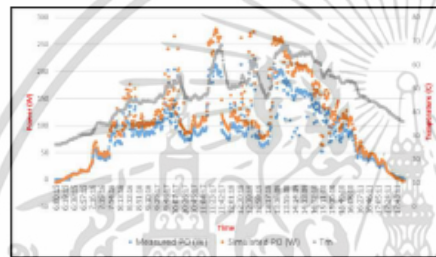
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

จากการทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงานพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ค่า STC พบว่าแบบจำลองให้ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 250.007 W โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในแบบจำลองมีค่า 250.000 W โดยค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 0.001 %

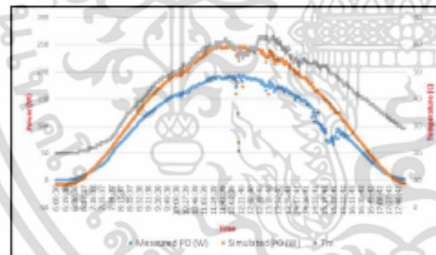
3.1.3 ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการวัดของกำลังไฟฟ้า

ทำการเปรียบเทียบกราฟกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา ของเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองกับค่าของเซลล์แสงอาทิตย์จากการวัดที่ประเทศกัมพูชา โดยทำการวัดค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิจากการวัดค่าความเข้มแสงของ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองและการวัดมีพฤติกรรมเป็นไปตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาที่กำหนด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 เปรียบเทียบกราฟกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา (แสดงแค่ไม่ติด) ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดสอบพบว่าค่าเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของทั้งสองแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 28.38 %



รูปที่ 9 เปรียบเทียบกราฟกำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และเวลา (แสดงพอดี) ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดสอบพบว่าค่าเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของทั้งสองแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 25.57 %

จากการทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบค่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการวัดพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่าค่ากำลังไฟฟ้า

ของทั้งสอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยอ้างอิงจากวงจรสมมูลแบบหนึ่งโหนดของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแสและแรงดันที่ได้จากแบบจำลองกับค่าของเซลล์แสงอาทิตย์จากโรงงานพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยคลาดเคลื่อนเพียง 0.001 % และ ไม่คลาดทำการเปรียบเทียบข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จริง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในช่วง 25.57 - 28.38 % ซึ่งจากโมเดลยังไม่ครอบคลุมถึงผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Capture loss, Wiring loss และ System loss เป็นต้น เข้ามาในการคำนวณ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวยังสามารถพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเพิ่มจำนวนแผง และ เพิ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Walker, Geoff, "Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, 2001, 21(1).
- [2] Alkayid, B., Jalbad, J., "Modeling and simulation of photovoltaic cells/modules/array," *Int. J. Res. Comput. Sci. (IJRCS)*, 2011, 2(6).
- [3] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1244-1254.
- [4] A. Chatterjee, A. Keyhani, and D. Kapoor, "Identification of Photovoltaic Source Models," *Energy Conversion, IEEE Transaction*, 2011, vol. PP, pp. 4-7.
- [5] X. Weidong, W. G. Dunford, and A. Csepel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," *Power Electronics Specialist Conference*, 2004, Vol. 3, pp. 1950-1956.
- [6] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *Electric Power Application*, 1999, *IEE Proceeding*, Vol. 146, pp. 193-200.
- [7] Z. Salam, K. Ishaque, and H. Tabeti, "An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system," *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, 2010, pp. 1-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## ใบอนุญาตในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์



**National Science and Technology Development Agency**  
111 Thailand Science Park, Paholyothin Rd., Klong 1  
Klong Luang , Pathumthani 12120 Thailand  
Tel: (662) 564-7000 Ext.1479 Fax: (662) 564-7004

## PURCHASE ORDER

The following P.O. number must appear on all related correspondence, shipping papers, and invoices.

**P.O. NUMBER: 1022490097**

Vendor code: 22299 UNIVERSITY OF GENEVA Centre comptable Uni 2 CH-1211 Geneve 4 (GENEVA) Switzerland Switzerland TEL. +41 22 379 74 60	Ship to: National Science And Technology Development Agency 111 Thailand Science Park, Paholyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120 TEL. (662) 564 7000 FAX. (662) 564 7004
---	---

P.O. Date	Ship Via	Incoterms	Payment term	Tracking NO.
18/05/2006			Payment within 30 days	3400036849

ITEM	DESCRIPTION	QTY/UOM	UNIT PRICE	AMOUNT
1	PVSUST software, version 3.41 Full license Delivery of the user's code: On request of the final user, which has to yield the "Local Number" established by the software. Max 48H. (may be asked at any time, from now)  ****QUOTATION No.010506 Geneva, May 11th, 2006*	1 SET	800.00	800.00
***EIGHT HUNDRED CHF ONLY			Total(CHF)	800.00

## REMARK:

- Please sign for acknowledgement and fax to us.
- Please send two copies of your invoice.
- Enter this order in accordance with the prices, terms, delivery method, and specifications listed above.
- Please notify us immediately if you are unable to ship as specified.

 (Sunee Makwisai) Purchaser 6/16/06	 ( Dr.Porponth Sichanugrist ) Assistant to the president of NSTDA Approved by 6, JUN 2006	For vendor _____ ( _____ ) Accepted by ____/____/____
--	---	---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งรหัสนุญาตในการใช้โปรแกรม Matlab ได้รับการอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) รหัสในการใช้โปรแกรม คือ ID : license 626055 Matlab version 2013



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเอกวัฒน์ บุพิ
วัน เดือน ปีเกิด	8 ธันวาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดอุดรธานี
ที่อยู่	467 หมู่ 7 ตำบลหมู่น อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) 2.) โปรแกรม Matlab/Simulink 3.) โปรแกรมภาษา C

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] เอกวัฒน์ บุพิ, ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “การประเมินแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองขนาดกำลังไฟฟ้า 250 W ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7, pp. 319-322 (2015).
- [2] เอกวัฒน์ บุพิ, ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์, พรหมพัชร์ ดาวลัย, วิไลลักษณ์ ศิริวงค์รังสรรค์, กอบศักดิ์ ศรีประภา และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, pp. 585-588 (2016).