

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาลักษณะไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ภาวะมีแสงและไม่มีแสง
หน่วยกิต	42
ผู้เขียน	นายอนนท์ นำอิน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธีรยุทธ์ เจนวิทยา ดร.กฤษณพงศ์ กิรติกร
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

**บทคัดย่อ**

เซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันใช้กับวงจรและระบบที่มีการสวิตซ์ จึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์พลวัตหรือไดนามิกอิมพีแดนซ์ของเซลล์ พารามิเตอร์นี้เปลี่ยนตามจุดทำงาน การหาพารามิเตอร์ต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน IEC 60904-9 คือ ความสอดคล้องของสเปกตรัมแสง ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสง และความไม่เสถียรของความเข้มแสง แหล่งกำเนิดแสงเพื่อทดสอบจึงมีราคาแพง และใช้อุปกรณ์ราคาสูง เช่น อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปที่ผ่านมารวิเคราะห์พารามิเตอร์ใช้รูปแบบวงจรสมมูลไดนามิกโดยเทคนิค 1-พอร์ต สัญญาณขาเข้าและขาออกเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่พอร์ตเดียวกัน ใช้หาไดนามิกอิมพีแดนซ์

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ มีความคิดริเริ่มใหม่ สองประการคือ ประการที่หนึ่ง การออกแบบ สร้างและทดสอบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมแบบใหม่ราคาถูกลง ด้วยการพัลส์แรงดันสูงให้ไดโอดเปล่งแสง ได้ความเข้มสูงกว่าที่เคยมี ประการที่สอง การวิเคราะห์รูปแบบวงจรสมมูลไดนามิกใช้เทคนิค 2 – พอร์ต (2- port analysis) หาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อมโหลดต่อกระแสแสง งานวิจัยได้พัฒนาเทคนิคการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 3 ลักษณะ คือ (ก) การพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมไดโอดเปล่งแสง 5 แบบที่พัลส์ด้วยแรงดันสูง ให้ความเข้มแสงสูงและสเปกตรัมเดี่ยว (ข) การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่มีราคาถูกลงด้วยไดโอดเปล่งแสง ผสมกับหลอดทังสเตนฮาโลเจน อีก 2 แบบ ทำให้ได้สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง ได้ทดสอบโซล่าเซลล์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวภายใต้แสงอาทิตย์เทียม 7 แบบ (ค) การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์ โดยป้อนแสงสีต่างๆ ที่ความเข้มถูกมอดูเลตด้วยคลื่นกระแสสลับแบบมีคาบ รูปแบบคลื่นและความถี่ต่างๆ

การศึกษานี้ สร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงสีเดียว คือ สีแดง สีเขียว สีนํ้าเงิน และสีขาว และสีผสม (แดง – เขียว – นํ้าเงิน) ที่ให้ความเข้มสูง โดยการพัลส์แรงดันสูงที่ป้อนเข้าแผงไดโอดเปล่งแสง ได้ค่าความเข้มแสงระดับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ค่าความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงอยู่ในชั้นคุณภาพ Class B และความไม่เสถียรความเข้มแสงอยู่ในชั้นคุณภาพ Class B แต่ไดโอดเปล่งแสงให้สเปกตรัมเดี่ยวต่างไปจากสเปกตรัมต่อเนื่องของแหล่งกำเนิดแสงทั่วไป จึงไม่สามารถกำหนดชั้นคุณภาพของสเปกตรัมได้ แหล่งกำเนิดแสงที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ทดสอบพารามิเตอร์ของเซลล์ เมื่อปรับแก้ค่าผลทดสอบนอกสภาวะมาตรฐานสู่สภาวะมาตรฐานด้วยวิธีการตาม มาตรฐาน IEC 60891 ค่าพารามิเตอร์และความต้านทานไดนามิกภายในภายใต้แสงอาทิตย์เทียมสีแดงและสีนํ้าเงิน เทียบกับผลทดสอบในสภาวะมาตรฐานด้วยแสงอาทิตย์เทียม Class AAA มีความสอดคล้องกัน

นอกจากนั้นได้สร้างแหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดทั้งสแตนฮาโลเจน อย่างเดียว และแบบผสมหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสงสีนํ้าเงิน วัตต์ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกสภาวะมาตรฐาน การเพิ่มระดับแรงดันสูงให้กับทั้งหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนและการพัลส์แผงไดโอดเปล่งแสง เป็นแนวทางใหม่ ทำให้ได้ความเข้มแสงสูงกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ เมื่อปรับแก้ความสัมพันธ์กระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดนอกสภาวะทดสอบมาตรฐานและสู่สภาวะมาตรฐาน ลักษณะกระแส – แรงดัน รวมทั้งพารามิเตอร์ของเซลล์ที่วัดภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสองชนิดนี้ มีค่าสอดคล้องกับการวัดด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม Class AAA

ในการหาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ปรับแรงดันไบอัสเซลล์และความถี่ของสัญญาณมอดูเลตระหว่าง 10 Hz-10 kHz วัดทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟาสต์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเพื่อกำหนดอิมพลีจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์ ผลการศึกษาเมื่อมอดูเลตด้วยรูปคลื่นและสเปกตรัมที่ต่างไป ความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์คาปาซิแตนซ์ กับความถี่ เหมือนกัน เมื่อเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ที่วิเคราะห์จากทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ กับจากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีในภาวะสว่างพบว่า ความสัมพันธ์เหมือนกัน

การพล็อต “มอด – ซอดก็ พล็อต” แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของคาปาซิแตนซ์ยกกำลังสองกับค่าแรงดัน ( $1/C^2$  vs  $V$ ) แสดงให้เห็นว่าสโลปของกราฟแบ่งเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรงดันต่ำสโลปมีค่าต่ำและคงที่ แสดงให้เห็นอิทธิพลของดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์ และในช่วงแรงดันสูงสโลปมีค่าล้นมาก เกิดจากผลของทรานส์อิมพีแดนซ์ในรอยต่อแบบเปลี่ยนกระหนั้น

**คำสำคัญ :** เซลล์แสงอาทิตย์/ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์/โฟโตโวลตาอิก/แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม

Dissertation Title	Study of Dynamic Characteristic of Solar Cells under Illumination and Dark Conditions
Dissertation Credits	42
Candidate	Mr. Anon Namin
Dissertation Advisors	Dr. Dhirayut Chenvidhya Dr. Krissnapong Kirtikara
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment, and Materials
B.E.	2555

### **Abstract**

Solar cells are normally connected with switching circuits and systems, their dynamic parameters are required in solar cell system design. Characteristics of these dynamic parameters depend on operating frequencies and voltages. Determination of parameters employ solar simulators whose light quality is specified by the IEC 60904-9 Standard. There are three specifications on light characteristics, namely, spectral quality, uniformity and stability of light intensity. These requirements entail high cost solar simulators. Moreover, expensive analytical equipment such as impedance spectroscopy is needed. Current techniques in analyzing parameters are based on a 1-port analysis of a dynamic or AC equivalent circuit of solar cells. In the 1-port analysis the input signal is the load current and the output signal the load voltage at the same port are used to determine dynamic impedance of solar cells.

Two original works could be claimed in the research work of the thesis. First, the designs, construction and characterization of low cost solar simulators using high luminosity LEDs under pulse operation. High intensity has been achieved while LEDs are not destroyed. Secondly, the analysis of solar cell dynamic equivalent circuits based on a 2-port analysis to yield a transfer impedance. The transfer impedance is the ratio of the load voltage at the output port to the photocurrent at the input port. Three techniques on solar cell testing are undertaken in the thesis. First, development of LED solar simulators with pulse operation yielding simulators having high intensity and line spectra. Secondly, development of low cost simulators using tungsten-halogen

lamps in conjunction with LEDs to obtain continuous spectra. Testing of an X-Si solar cell is done under these simulators. Thirdly, a transfer impedance determination of the solar cell under incident light of various colors. Light amplitude is modulated with periodic waves of different waveforms and frequencies. The cell is under different biased voltages.

Construction and testing of 5 LED based solar simulators are done, i.e. red, green, blue, white and combined red-green-blue. Under pulse operation, intensity up to  $1,000 \text{ W/m}^2$  is achieved. Light uniformity and light stability, as specified by the IEC 60904-9, of Class B are attained. Spectral quality class cannot be made due to line spectral nature of LED. These simulators are used to determine solar cell parameters of the cell, at non Standard Test Condition- STC. Corrections to the STC are made according to the IEC 60891. It is found that solar cell parameters obtained from the red and blue LED simulators are in good agreement with results obtained from a Class A simulator.

Simulators are also constructed from tungsten-halogen lamps and combined tungsten-halogen lamps and blue LEDs. Elevated voltage operation of lamps and LEDs under pulse operation provide a new avenue to obtain high intensity, never before achieved. Testing of the solar cell is also made under these simulators, and corrections are made. Again, results from the simulators and a Class AAA simulator are in good agreement.

In a transfer impedance measurement, we vary cell bias voltages and modulating frequencies between 10 Hz and 10 kHz. The transfer impedance is determined through a Fast Fourier Transform technique of measured load voltage and photo-current. Under different waveforms and spectra of incident light, relationship between amplitude of the transfer impedance and capacitance of cell with frequencies are similar. Transfer impedance analysis and measurement using an impedance spectroscopy also yield a relationship between capacitance of cell with frequencies of the same nature.

A Mott-Schottky Plot, showing the relationship between the reciprocal of the square of capacitance and the voltage across a cell, shows two-slope regions. At low voltage, the slope is small and constant, indicating dominance of diffusion capacitance. At high voltage, the slope is negative and of large magnitude, due to dominance of transition capacitance of an abrupt junction across the cell.

Keywords : Intensity Modulation/Photovoltaic/Solar Cell/Solar Simulator/ /Transfer Impedance

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านอาจารย์ ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร และท่านอาจารย์ ดร.ธีรยุทธ เจนวิทยา ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ท่านอาจารย์ชาย ชีวะเกตุ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา และอาจารย์ ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.วีรพล โมนยะกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. กรกฎ วัฒนวิเชียร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ บ่มเพาะวิชาความรู้ ตลอดจนแนวทางในการศึกษาวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์เพราพรรณ เปลี่ยนภู ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและวิจัยใน โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยทั้งสอง ขอขอบพระคุณ ศูนย์พัฒนามาตรฐานและทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ (มจช.) ห้องวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ (สวทช.) และ ดร.จรัญ ศรีธาราธิคุณ ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบและเอื้อเฟื้อเครื่องมือการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ ดร.ฐนกร เจนวิทยา คุณชานาญ ลิ้มสกุล คุณเยาวณี แสงพวงพานนท์ คุณบัลลังก์ หมั่นพินิจ คุณมานิตย์ ศรีแปน คุณนิติกรณ์ ศิลป์ศิริวานิชย์ คุณสาริสา เชื้อกุล คุณพนม ปริญญา คุณวัชรกร เกตุเรน คุณบัณฑิต เวียงมูล และคุณอาปีติน จิเหลา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ครูอาจารย์ ที่ได้สั่งสอน อบรมให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ พี่น้อง ญาติมิตร และเพื่อนนักศึกษา ที่คอยเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษาครั้งนี้ และขอบคุณคุณรัญชนา คุณวีรภัทร และคุณธัญลักษณ์ ครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง บุคคลผู้อยู่เบื้องหลังคอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนให้ข้าพเจ้าศึกษาจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีทุกประการ

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๖
กิตติกรรมประกาศ	๗
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๘
รายการรูปประกอบ	๘
รายการสัญลักษณ์	๘
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๘
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขต	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>8</b>
2.1 สมบัติเชิงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.1.1 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.1.2 พารามิเตอร์ในภาวะคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.1.3 การปรับแก้ค่ากระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลการทดสอบ	
นอกภาวะมาตรฐาน	11
2.1.4 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม	14
2.2 ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.2.1 ความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.2.2 คาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์	19
2.2.3 การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ใน โดเมนความถี่	21
2.3 แนวคิดที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้	28

## สารบัญ

	หน้า
2.3.1 การผลิตสไลด์โอดเปล่งแสงด้วยแรงดันสูงสำหรับแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม	28
2.3.2 การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมราคาถูกลง สำหรับศึกษาลักษณะกระแส – แรงดัน และพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	29
2.3.3 การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์	30
<b>3. วิธีดำเนินงาน</b>	<b>38</b>
3.1 การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	39
3.1.1 การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	39
3.1.2 คุณสมบัติทางความร้อนและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	41
3.1.3 การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดพัลส์ไดโอดเปล่งแสง	42
3.2 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен	43
3.2.1 การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен	43
3.2.2 ความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен	44
3.2.3 การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен	45
3.3 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен – ไดโอดเปล่งแสง	46
3.3.1 ความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен – ไดโอดเปล่งแสง	47
3.3.2 การวัดลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาลोजен – ไดโอดเปล่งแสง	48
3.4 การทดสอบลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง	49
3.5 การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์	52
3.5.1 ระดับของสัญญาณมอดูเลต	55
3.5.2 การควบคุมแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	56
3.5.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์และคาปาซิแตนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์	56

## สารบัญ

	หน้า
<b>4. ผลและอภิปราย</b>	<b>58</b>
4.1 สมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงพัลส์แรงดันสูง	58
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสง	58
4.1.2 สมบัติทางอุณหภูมิจากแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสง	60
4.1.3 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสง	61
4.1.4 เสถียรภาพของความเข้มแสงพัลส์ของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสง	62
4.1.5 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ไดโอดเปล่งแสงพัลส์แรงดันสูง	63
4.2 สมบัติของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง	64
4.2.1 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน และชนิดแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง	65
4.2.2 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนฮาโลเจน และชนิดแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง	67
4.3 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง	70
4.3.1 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐาน	70
4.3.2 การปรับแก้ค่าลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานไปสู่ภาวะมาตรฐาน	78
4.4 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์	82
4.4.1 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังงานสูงสุด	82
4.4.2 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดทำงานอื่น	87
4.4.3 ตัวแบบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และคาปาซิแตนซ์ที่พิจารณาอิมพีแดนซ์ในสาย	89
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์เมื่ออุณหภูมิต่างกัน	90
4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะสว่าง	92

**การบัญชี**

	<b>หน้า</b>
<b>5. สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>95</b>
5.1 สรุป	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>99</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>112</b>
ก. บทความในการประชุมทางวิชาการ ITC-CSCC 2010	112
ข. บทความในการประชุมทางวิชาการ GMSTEC 2010	117
ค. บทความในวารสาร International Journal of Photoenergy	122
ง. ประสิทธิภาพวัน曇้มของเซลล์แสงอาทิตย์และผลตอบสนองความยาวคลื่น ของโฟโตไดโอด	132
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>138</b>

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 กระบวนการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันนอกภาวะมาตรฐาน ไปสู่ภาวะมาตรฐาน	12
2.2 สัดส่วนของความเข้มแสงอาทิตย์เทียม	15
2.3 การจำแนกชั้นคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม	16
2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	17
2.5 การวิเคราะห์ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการมอดูเลตความเข้มแสง	27
3.1 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมที่พัฒนาขึ้นและการใช้งาน	48
3.2 จุดทำงานในการมอดูเลตความเข้มแสงของแผงไดโอดเปล่งแสง	55
4.1 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงของแผงไดโอดเปล่งแสง	61
4.2 ความไม่สม่ำเสมอและความไม่เสถียรของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน	66
4.3 ความไม่สอดคล้องสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมทั้งสแตนฮาโลเจน	68
4.4 คุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดแสงผสมทั้งสแตนฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง	69
4.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานเทียบกับในภาวะมาตรฐาน (ไม่ได้ปรับแก้ค่า)	76
4.6 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานเทียบกับในภาวะมาตรฐาน (ปรับแก้ค่าแล้ว)	81

## รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง	9
2.2 วงจรสมมูลแบบคงตัว ของเซลล์แสงอาทิตย์ โมเดลไดโอดหนึ่งตัว	10
2.3 วงจรสมมูลแบบพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.4 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.5 การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์	30
3.1 การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง	38
3.2 โครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	40
3.3 การวัดและคำนวณพารามิเตอร์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	43
3.4 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์แอลโงน	44
3.5 ไดอะแกรมแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์แอลโงน – ไดโอดเปล่งแสง	46
3.6 ภาพถ่ายแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์แอลโงน – ไดโอดเปล่งแสง	47
3.7 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส	51
3.8 ลักษณะเชิงเส้นหรือสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิกำลังเปิดวงจร และค่ากระแสลัดวงจร	51
3.9 วงจรสมมูลไดนามิกของโซล่าเซลล์เมื่อถูกแสง	52
3.10 การทดลองเพื่อหาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์	53
4.1 ลักษณะกระแส – แรงดันของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง	58
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง – กระแสของไดโอดเปล่งแสง	59
4.3 แผ่นระบายความร้อน ก) ด้านหลังไดโอดเปล่งแสงสีแดง ข) ที่ทำงานต่อเนื่อง และค) แบบพัลส์	60
4.4 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ชนิดไดโอดเปล่งแสงสีแดง	61
4.5 ความไม่เสถียรของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าแหล่งกำเนิดแสง ชนิดไดโอดเปล่งแสงสีแดง	62
4.6 ความไม่เสถียรของความเข้มแสงบนพื้นงานของแหล่งกำเนิดแสง ชนิดไดโอดเปล่งแสงสีแดง	63
4.7 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง	64

รูป (ต่อ)	หน้า
4.8 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ทั้งสแตนด์ฮาโลเจน	65
4.9 ความไม่เสถียรของความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ชนิดทั้งสแตนด์ฮาโลเจน	66
4.10 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดทั้งสแตนด์ฮาโลเจนที่ระดับ แรงดันต่าง ๆ	67
4.11 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดผสมทั้งสแตนด์ฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน	69
4.12 ลักษณะกระแส – แรงดันที่วัดด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม Class AAA	70
4.13 ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้แสงสีแดง ความเข้มแสง 925 และ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร	71
4.14 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน และสีผสม	72
4.15 ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสง ความเข้ม 400 วัตต์ต่อตารางเมตร	72
4.16 ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้แสงไดโอดเปล่งแสงที่มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากัน	73
4.17 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงทั้งสแตนด์ฮาโลเจน ที่แรงดันต่างกัน	74
4.18 ลักษณะกระแส – แรงดันของเซลล์ภายใต้แสงผสมทั้งสแตนด์ฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง เทียบกับแสงธรรมชาติ แสงไดโอด และแสงมาตรฐาน	75
4.19 ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดัน ภายใต้ความเข้มและสเปกตรัมแสง ต่างกัน	77
4.20 ลักษณะความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดัน ที่ภาวะกระแสลัดวงจรเท่ากัน	78
4.21 ลักษณะกระแส – แรงดันในภาวะมีด ภาวะทดสอบมาตรฐาน และแสงทั้งสแตนด์ ฮาโลเจนที่แก้ค่าแล้ว	79
4.22 ลักษณะกระแส – แรงดันในภาวะมีด ภาวะทดสอบมาตรฐาน และภายใต้แสง ไดโอดเปล่งแสงสีแดงและน้ำเงิน ความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่แก้ค่าไปสู่ ภาวะมาตรฐานแล้ว	79
4.23 ลักษณะกระแส – แรงดันภายใต้ไดโอดเปล่งแสงสีแดง 925 วัตต์ต่อตารางเมตร (ไม่ปรับแก้ค่า)	80

รูป (ต่อ)	หน้า
4.24 ความต้านทานไดนามิกภายใน – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ หลังปรับแก้ค่า	80
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัมปรีจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อมอดูเลตแสงสีขาวยุคสั้น ไซนูซอยดอลและคลื่นสี่เหลี่ยม	83
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อมอดูเลตแสงสีขาวยุคสั้น ไซนูซอยดอลและคลื่นสี่เหลี่ยม	83
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัมปรีจูดของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อมอดูเลตแสงสีขาวยุคสั้น น้ำเงิน เขียว แดง เป็นคลื่น ไซนูซอยดอล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม และคลื่นฟันเลื่อย	84
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ของเซลล์กับความถี่ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่อมอดูเลตแสงสีขาวยุคสั้น น้ำเงิน เขียว แดง เป็นคลื่น ไซนูซอยดอล คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม และคลื่นฟันเลื่อย	85
4.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี	86
4.30 ความสัมพันธ์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจุดกำลังงานสูงสุด	87
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจุดกำลังงานสูงสุด เมื่อไบอัสเซลล์ที่แรงดันต่างกัน	88
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ – ความถี่ของโพลครวม	89
4.33 วงจรสมมูลกระแสสลับ (ปรับปรุงใหม่) สำหรับการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มอิมพีแดนซ์ของสายต่อวงจรและที่ความถี่สูง	90
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังงานสูงสุด เมื่ออุณหภูมิต่างกัน	91
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิต่างกัน	91
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ – แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังงาน สูงสุด ที่ช่วงแรงดันต่ำและแรงดันสูง แสดงอิทธิพลของคาปาซิแตนซ์ที่ต่างกัน	92
4.37 “ม็อต – ช็อตทกี พล็อต” (Mott – Schottky Plot) ของเซลล์แสงอาทิตย์	93

## รายการสัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่หน้าตัด [ $m^2$ ]
$a$	=	ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความเข้มแสงสำหรับแรงดันเปิดวงจร $a = 0.06$
$C_D$	=	คิฟิวชันคาปาซิแตนส์ (Diffusion capacitance) [F]
$C_P$	=	คาปาซิแตนส์ขนานระหว่าง $C_T$ กับ $C_D$ [F]
$C_T$	=	ทรานสิชันคาปาซิแตนส์ (Transition capacitance) [F]
$dQ$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า [C/s]
$dV$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า [V/s]
$E$	=	พลังงาน [eV], [ $W/m^2 \cdot nm$ ]
exp	=	ฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (Exponential function)
$f$	=	ความถี่ไฟฟ้า [Hz]
$G$	=	ความนำ (Conductance) [S]
$G_1$	=	ค่าความเข้มแสงที่วัดได้ด้วยเซลล์อ้างอิง [ $W/m^2$ ]
$G_2$	=	ค่าความเข้มแสงที่ภาวะมาตรฐาน หรือระดับอื่นที่ต้องการ [ $W/m^2$ ]
$G_m$	=	ค่าสูงสุดของความเข้มแสง [ $W/m^2$ ]
$G_{max}$	=	ค่าความเข้มแสงสูงสุด [ $W/m^2$ ]
$G_{min}$	=	ค่าความเข้มแสงต่ำสุด [ $W/m^2$ ]
$G_{ref}$	=	ความเข้มแสงของสเปกตรัมอ้างอิง [ $W/m^2$ ]
$G_\phi$	=	ความเข้มของการมอดูเลตสัญญาณแสง [ $W/m^2$ ]
$g$	=	ฟลักแสงโฟตอนที่ฉาย [ $Photon/s \cdot m^2$ ] หรือ [ $W/m^2$ ]
$g_a$	=	องค์ประกอบกระแสลับของกระแสที่เกิดจากแสงในแอดไดท [A]
$g_c$	=	องค์ประกอบกระแสลับของกระแสที่เกิดจากแสงในแคโทด [A]
$g_m$	=	ค่าสูงสุดของฟลักโฟตอนแบบไซนูซอยด์ [ $Photon/s \cdot m^2$ ], [ $W/m^2$ ]
$g_0$	=	ฟลักแสงโฟตอนที่ฉายแบบกระแสตรง [ $Photon/s \cdot m^2$ ], [ $W/m^2$ ]
$I$	=	ค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ [A]
$I_{ph}$	=	ค่ากระแสแสง (Photocurrent) [A]
$I_{sc}$	=	ค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์ทดสอบ ณ $G_1$ และ $T$ [A]
$I_0$	=	ค่ากระแสอิ่มตัวในภาวะไบอัสกลับ [A]
$I_{01}$	=	ค่ากระแสอิ่มตัวในภาวะไบอัสกลับ ของไดโอดตัวที่หนึ่ง [A]
$I_{02}$	=	ค่ากระแสอิ่มตัวในภาวะไบอัสกลับ ของไดโอดตัวที่สอง [A]

### รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$I_1$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าบนเส้นโค้งกระแส-แรงดัน ณ จุดที่ 1 [A]
$I_p, V_1$	=	ค่ากระแส-แรงดันที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน [A]
$I_2$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าบนเส้นโค้งกระแส-แรงดัน ณ จุดที่ 2 [A]
$I_2, V_2$	=	ค่ากระแส-แรงดันที่ปรับแก้ค่า [A]
$i$	=	ค่าชั่วขณะเวลาของกระแส [A]
$i_{cell}$	=	ค่าชั่วขณะเวลาของกระแสที่ไหลภายในเซลล์แสงอาทิตย์ [A]
$i_m$	=	ค่าสูงสุดของกระแส (Peak current) [A]
$i_{ph}$	=	ค่าชั่วขณะเวลาของกระแสแสง [A]
$i_{SC}$	=	ค่าชั่วขณะเวลาของกระแสลัดวงจร [A]
$k$	=	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant), $1.380 \times 10^{-23}$ [J/K]
$\ln$	=	ฟังก์ชันลอการิทึมฐานธรรมชาติ (Natural logarithm function)
$MM$	=	ความไม่สอดคล้องของความเข้มแสง
$n$	=	ค่าไอเดียมิตีแฟกเตอร์ (Diode ideality factor)
$q$	=	ค่าคงที่ความจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $1.6021765 \times 10^{-19}$ [C]
$R$	=	ค่าความต้านทาน [ $\Omega$ ]
$R_D$	=	ค่าความต้านทานไดนามิกภายนอก [ $\Omega$ ]
$R_d$	=	ค่าความต้านทานไดนามิกภายใน [ $\Omega$ ]
$R_p$	=	ค่าความต้านทานขนานระหว่าง $R_d$ กับ $R_{sh}$ [ $\Omega$ ]
$R_s$	=	ค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์ [ $\Omega$ ]
$R_{sh}$	=	ค่าความต้านทานขนานของไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์ [ $\Omega$ ]
$R'_S$	=	ค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์ทดสอบ [ $\Omega$ ]
$S$	=	ซัสเซปแตนซ์ (Susceptance) [S]
$SR$	=	ผลตอบสนองความยาวคลื่น (Spectral Response)
$T$	=	คาบเวลา [s]
$T$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์ [K]
$T_1$	=	ค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบ [K]
$T_2$	=	อุณหภูมิในภาวะมาตรฐาน หรือระดับอื่นที่ต้องการปรับแก้ค่า [K]
$t$	=	เวลา [s]
$V$	=	ค่าแรงดันที่ขั้วของไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์ [V]

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$V_D$	=	แรงดันดิฟฟิวชันในชั้นรอยต่อ (Diffusion voltage) [V]
$V_j$	=	ค่าแรงดันในรอยต่อของไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์ [V]
$V_{oc1}$	=	ค่าแรงดันเปิดวงจรในขณะทดสอบเซลล์ [V]
$V_1$	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าบนเส้นโค้งกระแส-แรงดัน ณ จุดที่ 1 [V]
$V_2$	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าบนเส้นโค้งกระแส-แรงดัน ณ จุดที่ 2 [V]
$W$	=	ระยะห่าง [m]
$X$	=	ค่ารีแอคแตนซ์ [ $\Omega$ ]
$Z_t$	=	ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ [ $\Omega$ ]
$\Delta I _{conduct-region}$	=	ค่าความต่างของค่ากระแสในช่วงที่ไดโอดนำกระแสเต็มพิกัด [A]
$\Delta I _{near\_zero-voltage\_regio}$	=	ค่าความต่างของค่ากระแสในช่วงที่ไดโอดนำกระแสเต็มพิกัด [A]
$\Delta V _{conduct-region}$	=	ค่าความต่างของแรงดันในช่วงที่ไดโอดนำกระแสเต็มพิกัด [V]
$\Delta V _{near\_zero-voltage\_regio}$	=	ค่าความต่างของแรงดันในช่วงที่ไดโอดนำกระแสเต็มพิกัด [V]
$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของกระแส [A/K]
$\alpha_{rel}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของกระแสที่ความเข้ม 1,000 W/m <sup>2</sup>
$\beta$	=	สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของแรงดัน [V/K]
$\beta_a$	=	อัตราลดทอนของพาหะที่เกิดจากแสง จากการคลายตัวในแอโนด
$\beta_c$	=	อัตราลดทอนของพาหะที่เกิดจากแสง จากการคลายตัวในแคโทด
$\beta_{rel}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของแรงดันที่ความเข้ม 1,000 W/m <sup>2</sup>
$\delta$	=	สัดส่วนการมอดูเลตสัญญาณกระแสสลับต่อกระแสตรง
$\delta\phi_0$	=	ฟลักแสงโฟตอนแบบกระแสสลับ [Photon/s·m <sup>2</sup> ], [W/m <sup>2</sup> ]
$\epsilon$	=	เปอิมิตติวิตี (Permittivity) [C/m]
$\varphi$	=	มุมต่างเฟส [Radian], [Degree]
$\kappa$	=	แฟกเตอร์ปรับแก้เส้นโค้ง (Curve correction factor) [ $\Omega/K$ ]
$\kappa'$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของความต้านทานภายใน $R_S$ [ $\Omega/K$ ]
$\lambda$	=	ความยาวคลื่น [nm], [micron]
$\lambda_j$	=	$\frac{q}{nkT}$
$\nu$	=	ค่าชั่วขณะเวลาของแรงดัน [V]
$\theta$	=	มุมต่างเฟส [Radian], [Degree]
$\tau$	=	ค่าเฉลี่ยอายุพาหะ (Mean life-time) [s]

**รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)**

$\tau_a$	=	เวลาคลายตัว (Relaxation time) ของประจุในแอโนด [s]
$\tau_c$	=	เวลาคลายตัว (Relaxation time) ของประจุในแคโทด [s]
$\tau_p$	=	ความกว้างพัลส์ [s]
$\omega$	=	ความถี่เชิงมุม [rad/s]

## ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	Ampere
Au	=	Gold
BSR	=	Back Surface Reflectance Solar Cell
BSFR	=	Back Surface Field Reflectance Solar Cell
C	=	Coulomb
CIGS	=	Copper Indium Gallium Selenide
CdTe/CdS	=	Cadmium Telluride/ Cadmium Sulfide Solar Cell
EVA	=	Ethylene-vinyl Acetate
FRA	=	Frequency Response Analyzer
GaAs/Ge	=	Gallium Arsenide/ Germanium Solar Cell
ITO	=	Indium Tin Oxide
J	=	Joule
K	=	Kelvin
MPP	=	Methyl Substituted Perylene Pigment
m	=	Meter
m <sup>2</sup>	=	Square meter
m <sup>3</sup>	=	Qubic meter
PV	=	Photovoltaic
ph	=	Photo
rad	=	Radian
STC	=	Standard Testing Conditions (AM 1.5G, 1,000 W/m <sup>2</sup> , and 25 °C)
s	=	Second
V	=	Volt
ZnPC	=	Zinc Phthalocyanine
Ω	=	Ohm