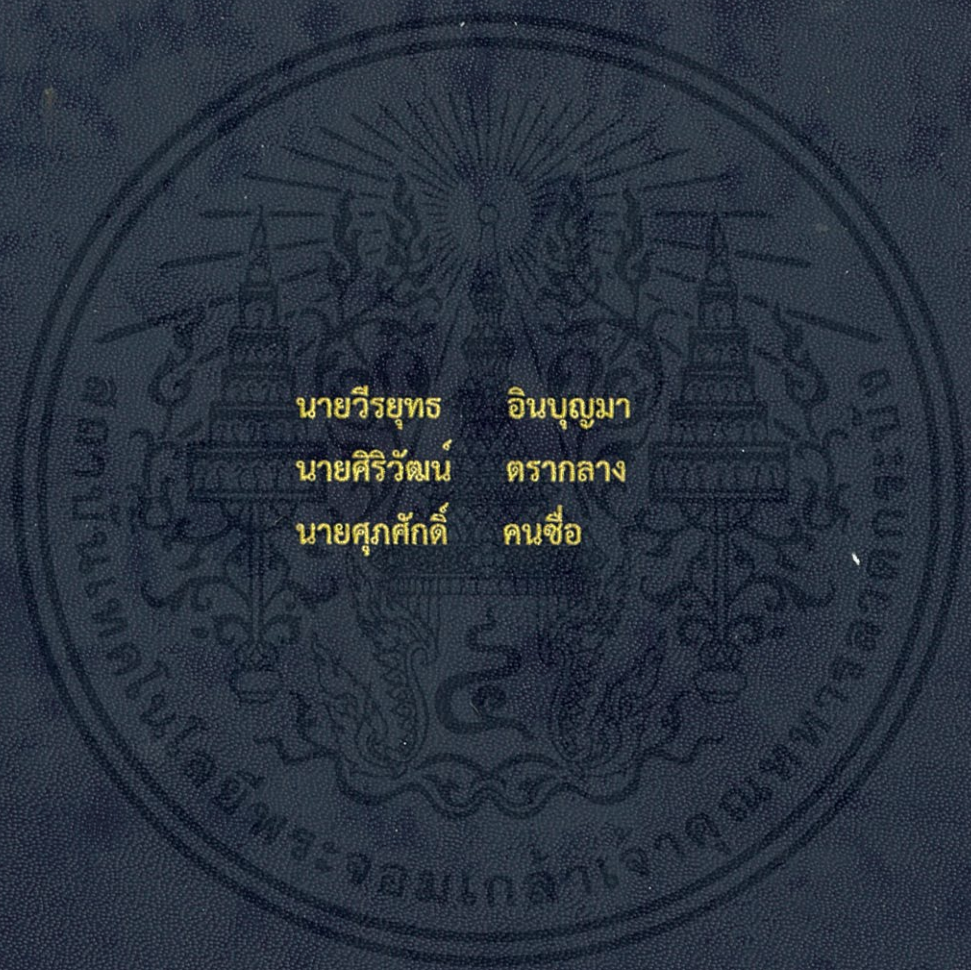


การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูง
และอุณหภูมิต่ำ

STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS UNDER
LOW AND HIGH TEMPERATURE



นายวีรยุทธ อินบุญมา
นายศิริวัฒน์ ตรากลาง
นายศุภศักดิ์ คนเชื้อ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูง
และอุณหภูมิต่ำ
STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS UNDER
LOW AND HIGH TEMPERATURE



นายวีรยุทธ อินบุญมา
นายศิริวัฒน์ ตรากลาง
นายศุภศักดิ์ คนชื่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS
UNDER LOW AND HIGH TEMPERATURE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ
STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS UNDER LOW AND HIGH TEMPERATURE

ชื่อนักศึกษา นายวีรยุทธ อินบุญมา รหัสนักศึกษา 54050598
นายศิริวัฒน์ ตรากลาง รหัสนักศึกษา 54050602
นายศุภศักดิ์ คนชื่อ รหัสนักศึกษา 54050604

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข	
ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ
ชื่อนักศึกษา	นาย วีรยุทธ อินบุญมา รหัสนักศึกษา 54050598 นาย ศิริวัฒน์ ตรากลาง รหัสนักศึกษา 54050602 นาย ศุภศักดิ์ คนชื้อ รหัสนักศึกษา 54050604
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและชนิดอะมอร์ฟัส จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสภาวะที่มีแสง โดยทำการวัดและกำหนดตัวแปรเบื้องต้นของอุปกรณ์ ได้แก่ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด และฟิลล์แพกเตอร์ ผลการทดลองเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสเพิ่มสูงขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส โดยที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟิลล์แพกเตอร์เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.25% และ 0.79% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดลดลง 19.45% สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวจะมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.08% แต่แรงดันไฟฟ้าวงจรถัดและฟิลล์แพกเตอร์ลดลงจาก 23.76% และ 10.09% ตามลำดับ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวที่ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิต่ำ จะได้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลง 46.61% เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 25 องศาเซลเซียส ถึง -70 องศาเซลเซียส เมื่อแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเพิ่มสูงขึ้น 17.40% และฟิลล์แพกเตอร์เพิ่มสูงขึ้น 35.10%

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส กระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ฟิลล์แพกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS UNDER LOW AND HIGH TEMPERATURE
Students	Mr. WEERAYUT INBOONMA 54050598 Mr. SIRIWAT TRAKANG 54050602 Mr. SUPHASAK KONSUE 54050604
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2014
Advisor	Asst.Prof.Dr. Pattareeya Damrongsak

ABSTRACT

This special project studied effects of temperature on electrical properties of monocrystalline silicon solar cell (c-Si) and amorphous silicon solar cells (a-Si). The I-V curves under dark and illuminated conditions were measured and used to determine the basic parameters of the devices such as Short circuit current (I_{sc}), Open circuit voltage (V_{oc}) and Fill factor (FF). Experimental results revealed that when the temperature of the a-Si cells was raised from 30 °C to 70 °C, the I_{sc} and FF of the devices increased approximately by 1.25% and 0.79% respectively. The V_{oc} , however, decreased by 19.45%. For the c-Si, the I_{sc} of the devices increased approximately by 1.08% but the V_{oc} and FF decreased by 23.76% and 10.09% respectively. The I-V curves of c-Si cells under low temperature were also investigated. It was found that, the I_{sc} of the devices decreased by 46.61% as the temperature dropped from 25 °C to -70 °C. The V_{oc} increased approximately by 17.40% and the FF by 35.10%

Keywords : Monocrystalline silicon solar cell, Amorphous silicon solar cells, Short circuit current, Open circuit voltage, Fill factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง “สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ” ประกอบการศึกษาวิชาโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงโดยได้รับความอนุเคราะห์จาก

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ และคณะอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำแนะนำให้ข้อมูลและอุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพี่ๆและเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจมาโดยตลอดและสุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา

นาย วีรยุทธ อินบุญมา
นาย ศิริวัฒน์ ตรากลาง
นาย ศุภศักดิ์ คนชื่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	4
2.2 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	4
2.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	4
2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว	4
2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี	4
2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน	5
2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.5 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.6 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.6.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน	6
2.6.2 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	6
2.6.3 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	7
2.6.4 พิลล์แพกเตอร์	8
2.7 ข้อจำกัดของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.7.1 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	10
2.7.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	11
2.7.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ	12
2.8 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์	13
2.8.1 การสูญเสียยกกระแสไฟฟ้าลัดวงจร	13
2.8.1.1 การสะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสง	13
2.8.1.3 โฟตอนบางตัวไม่ถูกดูดกลืน	14
2.8.1.4 การสูญเสียเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกัน	14
2.8.2 การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	14
2.8.3 การสูญเสียฟิลล์แพกเตอร์	15
2.8.3.1 เกิดจากค่าแพกเตอร์ n และ V_{oc}	15
2.8.3.2 เกิดจากค่าความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขั้ว	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์การ	17
3.1.1 แหล่งกำเนิดแสงเฮโลเจน ขนาด 100 W	17
3.1.2 มัลติมิเตอร์ UT55	17
3.1.3 Hot Plate รุ่น IKA C-MAG HS 4	18
3.1.4 สายเทอร์โมคัปเปิล	18
3.1.5 เครื่อง Agilent U2722A source measure unit	19
3.1.6 ขาดัง	19
3.1.7 บีม	20
3.1.8 วาล์ว	20
3.1.9 แคมเบอร์	21
3.1.10 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำ	21
3.1.11 ไนโตรเจนเหลว	22
3.1.12 ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว	22
3.1.13 หลอดไฟ BED Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W	23
3.1.14 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว	23
3.1.15 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส	24
3.1.16 เซลล์เดี่ยวชนิดที่เป็นผลึกเดี่ยว	24
3.1.17 คอมพิวเตอร์	25
3.2 วิธีการทดลอง	25
3.2.1 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิสูงในที่มืด	25
3.2.2 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิสูงในที่แสง	26
3.2.3 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิต่ำ	26
3.3 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	28
3.3.1 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	28
3.3.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	28
3.3.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุด	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 3.3.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุด หาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 ฟিলต์แพกเตอร์	29
3.3.5 กระแสไฟฟ้าย้อนอิมพัลส์	29
3.3.6 ความต้านทานชั้นดีและความต้านทานอนุกรม	29
3.3.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	30
3.3.8 ความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูง	31
4.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว	31
4.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส	42
4.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิต่ำ	52
4.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	2
4.1 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	34
4.2 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	35
4.3 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	36
4.4 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	37
4.5 แสดงผลค่ากระแสย้อนอ้อมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	38
4.6 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	39
4.7 แสดงผลค่าความต้านทานขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	40
4.8 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	45
4.9 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	46
4.10 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	47
4.11 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	48
4.12 แสดงผลค่ากระแสย้อนอ้อมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	49
4.13 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	50
4.14 แสดงผลค่าความต้านทานขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	51
4.15 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	55
4.16 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	56
4.17 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากพบข้อผิดพลาดหรือข้อสงสัย กรุณาแจ้งให้ทราบเพื่อปรับปรุงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	58
4.19 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	59
4.20 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	60
4.21 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดีของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	61
ก.1 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	69
ก.2 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	70
ก.3 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอรืของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	70
ก.4 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	71
ก.5 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	72
ก.6 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	73
ก.7 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดีของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิสูง	74
ก.8 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	78
ก.9 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	79
ก.10 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอรืของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	80
ก.11 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	81
ก.12 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	82
ก.13 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ภายใต้ลิขสิทธิ์ของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.14 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดีของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง	84
ก.15 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	88
ก.16 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	89
ก.17 แสดงผลค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	90
ก.18 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	91
ก.19 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	92
ก.20 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	93
ก.21 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดีของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เซลล์แสงอาทิตย์	1
2.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป	7
2.3 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป	8
2.4 แผนภูมิการสูญเสียพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน	9
2.5 สเปกตรัมแจกแจงความเข้มของพลังงานของแสงอาทิตย์	10
2.6 สเปกตรัมของโฟตอนฟลักซ์ของแสงอาทิตย์	11
2.7 ผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดในอุดมคติที่สารกึ่งตัวนำจะสามารถผลิตได้	11
2.8 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดและความหนาของสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs และ Si ที่ใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์	13
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามืดและแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อ p-n โดยพิจารณากรณีมีการรวมตัวของพาหะในชั้นปลอดพาหะ	15
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด	16
2.11 (ก) อิทธิพลของความต้านทานอนุกรม (ข) อิทธิพลของความต้านทานชั้นดีที่มีต่อลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์	16
3.1 การตั้งค่าโปรแกรม Agilent U2722A source measure unit	26
3.2 วิธีการต่ออุปกรณ์ในการทดลองส่วนที่เป็นอนุกรมมีต่ำ	27
3.3 ลำดับการใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำ	27
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์	28
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V ของเซลล์แสงอาทิตย์	29
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง (แกน x หรือแรงดันไฟฟ้า = 0)	30
4.1 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1	31
4.2 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1	32
4.3 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2	32
4.4 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2	33
4.5 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 3	33
4.6 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3	34
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอนุกรม	35
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอนุกรม	36
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์กับอนุกรม	37
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอนุกรม	38
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมิต์กับอนุกรม	39
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอนุกรม	40
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดีกับอนุกรม	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์กับอุณหภูมิ	71
ก.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ	72
ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ	73
ก.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ	74
ก.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานขนัต์กับอุณหภูมิ	75
ก.14 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 1	75
ก.15 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1	76
ก.16 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 2	76
ก.17 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2	77
ก.18 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 3	77
ก.19 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3	78
ก.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ	79
ก.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิ	80
ก.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์กับอุณหภูมิ	81
ก.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ	82
ก.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ	83
ก.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ	84
ก.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานขนัต์กับอุณหภูมิ	85
ก.27 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1	85
ก.28 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1	86
ก.29 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2	86
ก.30 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2	87
ก.31 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 3	87
ก.32 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3	88
ก.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ	89
ก.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิ	90
ก.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์กับอุณหภูมิ	91
ก.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ	92
ก.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ	93
ก.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ	94
ก.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานขนัต์กับอุณหภูมิ	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์

η

P_{max}

P_{in}

I_{sc}

I_0

n

V_{oc}

V_{max}

I_{max}

FF

ความหมาย

ประสิทธิภาพของเซลล์

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด

กำลังของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

กระแสย้อนอิมิตัว

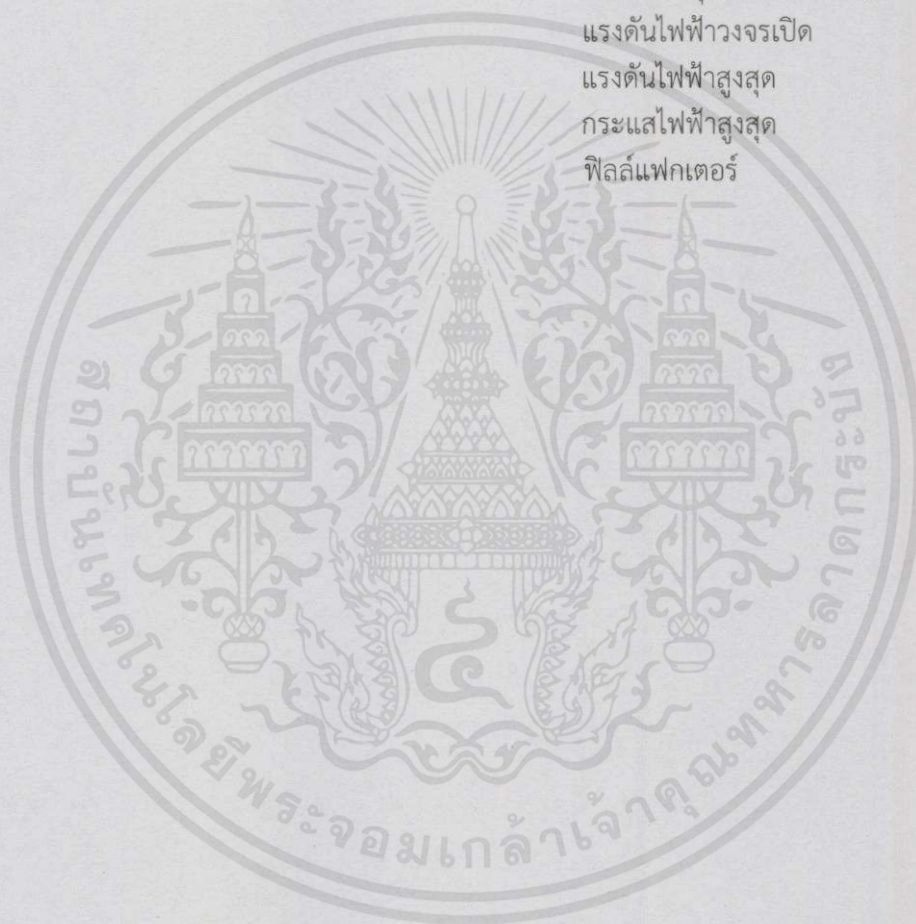
แฟกเตอร์อุณหภูมิของไดโอด

แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

แรงดันไฟฟ้าสูงสุด

กระแสไฟฟ้าสูงสุด

ฟิลล์แฟกเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

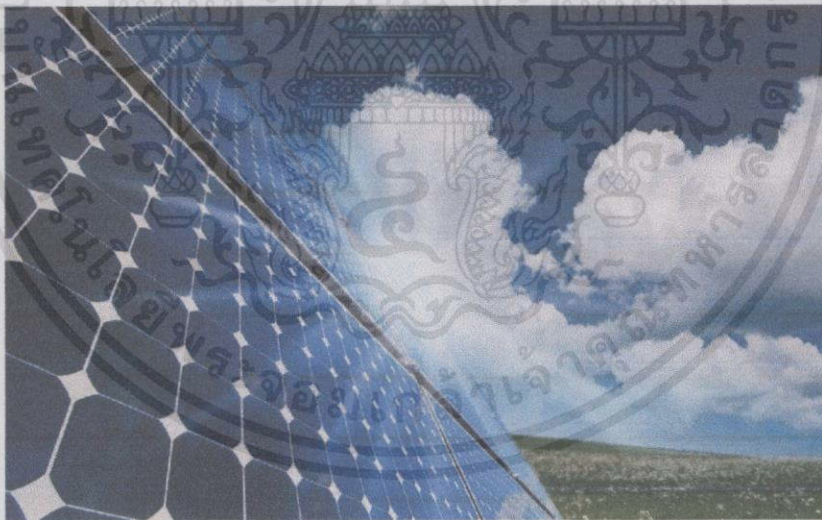
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากในแต่ละพื้นที่ ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีความแตกต่างกัน มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของแสงแดด อุณหภูมิของเซลล์ การสะท้อนที่ผิวหน้าของเซลล์ และสภาพภูมิอากาศ ซึ่งตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่มีบทบาทอย่างมากกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้แก่ อุณหภูมิของเซลล์ ถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าวางจรมีค่าสูงขึ้นขณะที่แรงดันไฟฟ้าวางจรเปิดจะมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการแปลงพลังงาน

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยผู้วิจัยจะทำการจัดเตรียมระบบเพื่อทดลองเพื่อวัดหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่างๆและนำมาวิเคราะห์หาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์ คือ กระแสไฟฟ้าวางจรเปิด แรงดันไฟฟ้าวางจรเปิด พิลล์แพกเตอร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด กระแสย้อนอิมิตัว ความต้านทานอนุกรม และความต้านทานขนั้ด



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อจัดเตรียมระบบสำหรับวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ
2. เพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
3. เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน 2 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยวและอะมอร์ฟัส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดลักษณะกราฟของเซลล์แสงอาทิตย์
2. จัดเตรียมระบบวัดเพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
3. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและอะมอร์ฟัส
4. สรุปผลการวัดและอภิปรายผลการศึกษา

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัย

- ขั้นตอนที่ 1 เก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อสร้างข้อมูลวิจัยของการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ไม่ฉายแสงและฉายแสงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
- ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมระบบเพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
- ขั้นตอนที่ 3 ทดลองการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสและชนิดผลึกเดี่ยวที่อุณหภูมิต่างๆ
- ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสและชนิดผลึกเดี่ยวในขณะที่ไม่ฉายแสงและฉายแสงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
- ขั้นตอนที่ 5 จัดเตรียมเล่มโครงงานพิเศษ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
2. มีความรู้ความเข้าใจหลักการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
3. ได้ระบบวัดเพื่อศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน [2]

2.2 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 (พ.ศ. 2497) โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephon) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็น (P-N) แบบใหม่โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอนจนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ซึ่งปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 15% แล้วในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศก็ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ต่อมาจึงได้มีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลก เช่นในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่างๆกันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม [3]

2.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก คือ

2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell)

ลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนแข็งและบางมาก ซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่งสามารถถลุงได้จากหินและทราย เรานิยมใช้ธาตุซิลิกอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์ ไอซี และเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี c-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะ ได้แก่ ในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก [4]

2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี (Polycrystalline)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาด้านต้นทุนสูงของเซลล์แสงอาทิตย์

แบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอนแบบหลายผลึกก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ (ขนาดระดับไมโครเมตร-มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน รูปที่ 3 เป็นการแสดงขั้นตอนการผลิตของโพลีซิลิคอน ด้านบนของรูปแสดงการผลิตแบบ cast โดยจะเทซิลิคอนที่หลอมละลายเข้าไปใน crucible แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ ซึ่งก็จะได้ก้อน ingot ของซิลิคอนหลายผลึกที่มีรูปร่างตาม crucible ที่ใช้ หลังจากนั้นการนำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะคล้ายกับกรณีของแบบผลึกเดี่ยว คือนำไปตัดเป็นเวเฟอร์หนาขนาด 300 ถึง 400 ไมโครเมตร แล้วก็ทำ p-n junction ต่อไป ด้านล่างของรูปเป็นการสร้างแผ่นซิลิคอนหลายผลึกที่จะใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจากสารหลอมเหลวของซิลิคอน เรียกว่า ribbon โดยวิธีนี้จะช่วยลดขั้นตอนที่จะต้องหั่นเป็นแผ่นเวเฟอร์ในกรณีที่ใช้ ingot [5]

2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) ใช้น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10% เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่จะไม่ใช่ผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ a-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น [4]

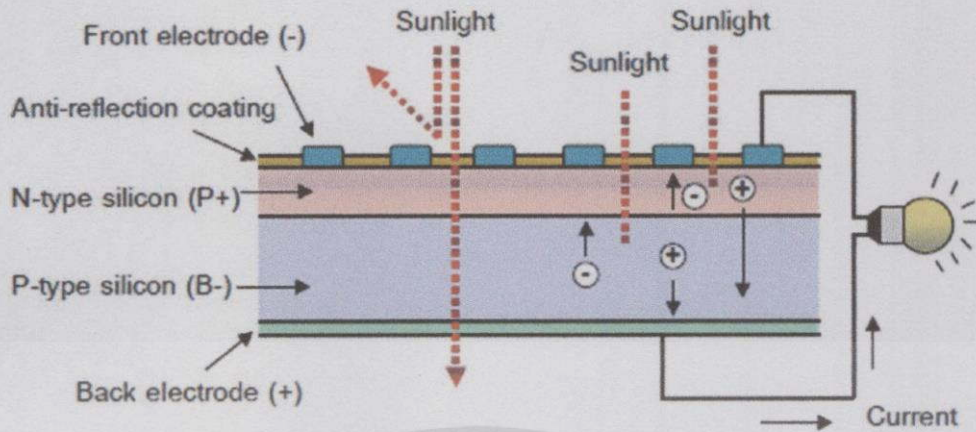
2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุด และมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปน เพื่อสร้างรอย ต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้ารับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว [8]

2.5 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าง่ายๆ ไปใช้งานได้ ตามรูปที่ 2.1 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

n-type ซิลิคอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือด้วยธาตุหมู่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส อะเซนิก มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ [7]

p-type ซิลิคอน คือ สารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือด้วยธาตุหมู่ 3 เช่น โบรอน แกลเลียม ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน [9]

2.6 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะสมบัติเอาต์พุต (output characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

2.6.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อาจเรียกสั้นๆว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และใช้สัญลักษณ์ว่า η เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด} * 100\%}{\text{กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์}}$$

$$\eta = \frac{P_{\max} (W)}{P_{in} (W)} * 100\% \quad (1)$$

2.6.2 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจร เราเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current: I_{sc})

รูปที่ 5 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสงความเข้ม พันธะระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด I และแรงดันไฟฟ้า V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพมืดจะมีรูปเหมือนกับสมการของไดโอด กล่าวคือ

$$I = I_0[\exp(qv/nkT) - 1] \quad (2)$$

โดยที่ I_0 เรียกว่า กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัว และ n คือค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิของไดโอด

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลออกสู่วงจรภายนอกจะเท่ากับผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด I และกระแสไฟฟ้าโฟโต $I_{ph}(=I_{sc})$ ดังนี้

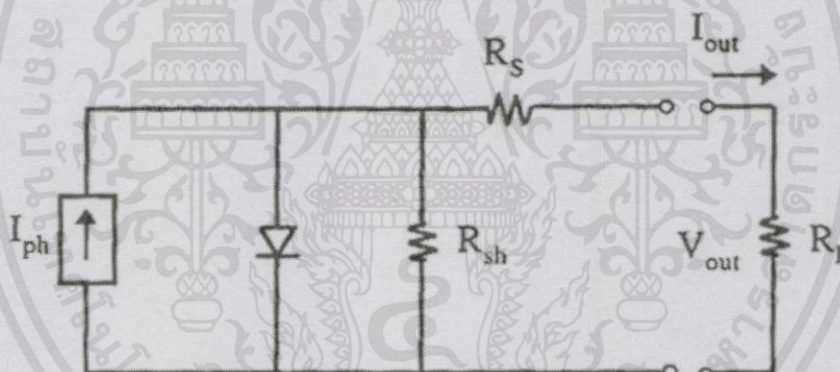
$$I_{out} = I - I_{ph} \quad (3)$$

ในที่นี้ $I_{ph}(=I_{sc})$ และถ้าให้ A คือพื้นที่รับแสง จะได้ว่า

$$I_{sc} = qA \int_0^{\infty} F(\lambda\lambda)_{ext}(\lambda\lambda) d \quad (4)$$

ถ้าพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม R_s และความต้านทานขนั้ด R_{sh} ด้วย จะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{out} มีค่าดังนี้

$$I_{out} = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (5)$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

2.6.3 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรเปิด (open circuit) แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage: V_{oc}) ค่า V_{oc} โดยแทนค่า $I_{out} = 0$ ดังนั้นจึงได้ว่า

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (6)$$

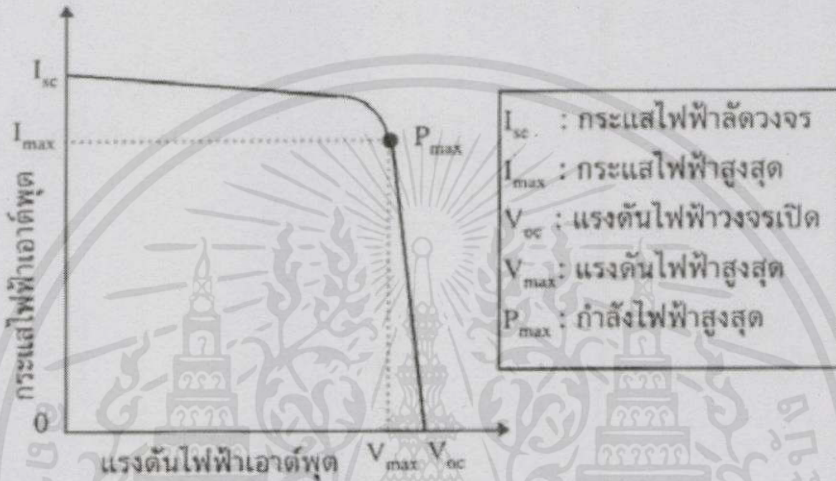
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้าคือกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{max} (maximum power) ที่เราจะได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟลักษณะสมบัตินี้ซึ่งแสดงด้วยเส้นไข

ปลาในรูปที่ 2.3 ถ้าให้ V_{max} (maximum voltage) และ I_{max} (maximum current) คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (7)$$

เราสามารถคำนวณหาค่า V_{max} ได้ด้วยการหาค่าอนุพันธ์ของ P_{max} เทียบกับ V_{max} และกำหนดให้

$$\frac{\partial P_{max}}{\partial V_{max}} = 0 \text{ ผลลัพธ์คือ}$$



รูปที่ 2.3 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

$$\exp\left(\frac{qV_{max}}{nkT}\right)\left(1 + \frac{qV_{max}}{nkT}\right) = \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (8)$$

ด้วยวิธีการคำนวณในทำนองเดียวกัน I_{max} จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{max} = \frac{(I_{sc} + I_0) \frac{qV_{max}}{nkT}}{1 + \frac{qV_{max}}{nkT}} \quad (9)$$

สมการที่ (8) และ (9) ซึ่งให้เราทราบว่า P_{max} จะมีค่ามากเมื่อ I_0 มีค่าน้อย (นั่นก็คือ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำควรมีค่ากว้างพอสมควร) และ n มีค่าน้อย

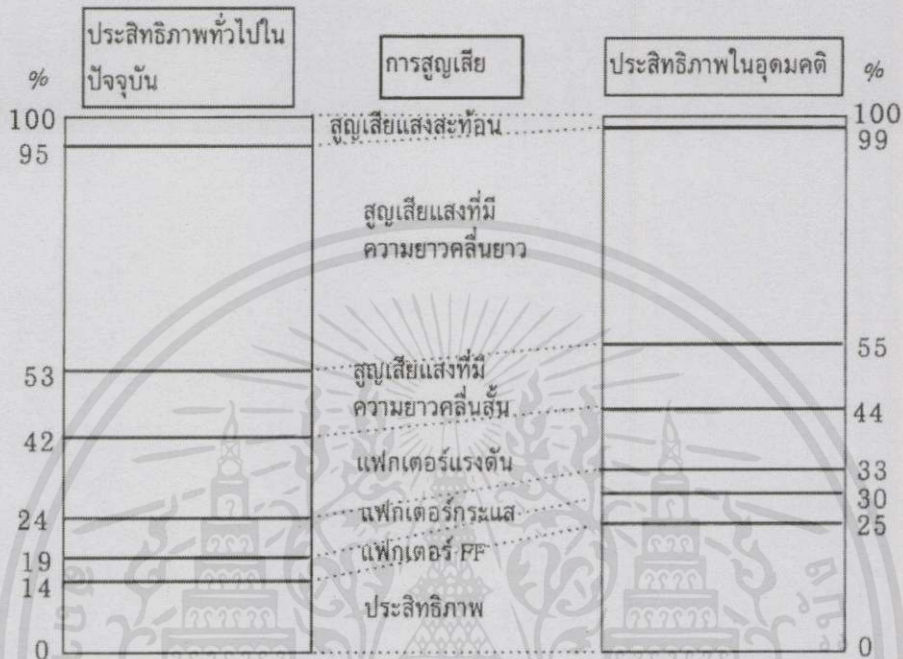
2.6.4 ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)

เอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) เขียนย่อว่า FF นิยามของ FF คืออัตราส่วนของพื้นที่ของ $V_{max} * I_{max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} * I_{sc}$ และเขียนเป็นสูตรได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก FF = $\frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{oc} * I_{sc}}$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (10)

$$P_{\max} = \frac{V_{\max}}{V_{oc}} \left[1 - \frac{\exp(qV_{\max}/nkT) - 1}{\exp(qV_{oc}/nkT) - 1} \right] \quad (11)$$



รูปที่ 2.4 แผนภูมิการสูญเสียพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน

ในปัจจุบันประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่ผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 12~19% พลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์บางส่วนถูกนำไปใช้ประโยชน์ บางส่วนสูญเสียไม่ได้ใช้เป็นประโยชน์ เช่น แสงบางส่วนสะท้อนกลับ รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิการสูญเสียพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนทั่วไป เนื่องจากผลึกเดี่ยวซิลิคอนมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.1 eV ดังนั้นแสงที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่า 1.1 eV จึงจะถูกดูดกลืนและเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ผลการคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนคือ 25 %

2.7 ขีดจำกัดของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1.2.2 แล้วว่าลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 6 ชนิด คือ

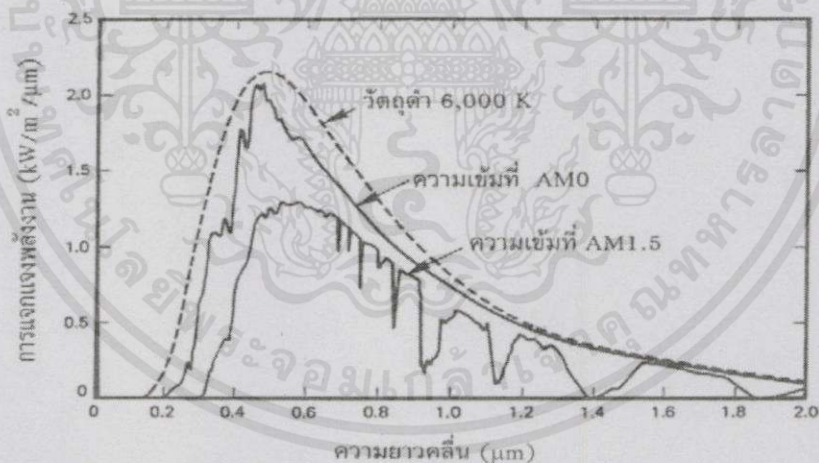
- 1) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})
- 2) แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc})
- 3) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max})
- 4) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max})
- 5) ฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF) และ
- 6) ประสิทธิภาพ (η)

เอกสารนี้เป็นเอกสารในจำนวนพารามิเตอร์เหล่านี้ I_{sc} และ V_{oc} เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการกำหนดต้นทุนการกักขัง ขีดจำกัดของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ในหัวข้อนี้เราจะวิเคราะห์หัวข้อขีดจำกัดของ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างไรบ้าง

2.7.1 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

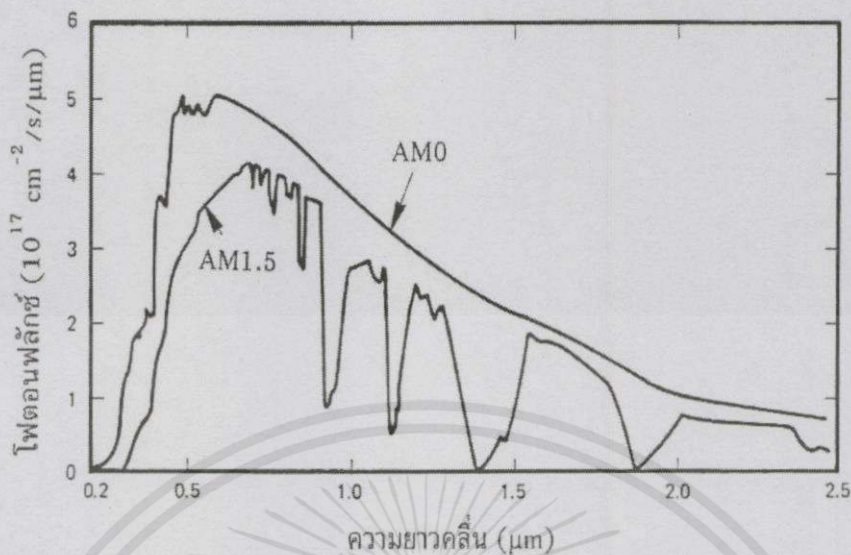
การคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งที่ไม่ยาก ในเงื่อนไขอุดมคติ เราอาจสมมติให้ว่า เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ โฟตอนทุกตัวจะสามารถกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล และอิเล็กตรอนทุกตัวสามารถไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปสู่วงจรภายนอกได้ การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เช่นนี้ เราต้องทราบโฟตอนฟลักซ์ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ รูปที่ 2.5 จากรูปนี้โฟตอนฟลักซ์คำนวณได้โดยการหารค่าความเข้มแสงในตารางด้วยค่าพลังงานโฟตอน ($\frac{hc}{\lambda}$) ณ ที่ความยาวคลื่นแสงนั้น ผลการคำนวณสเปกตรัมของโฟตอนฟลักซ์ของแสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 2.6 หน่วยของโฟตอนฟลักซ์คือ $\text{cm}^2/\text{sec}/\mu\text{m}$

จากรูปที่ 2.5 กระแสไฟฟ้าลัดวงจรสามารถคำนวณได้โดยการหาค่าปริพันธ์ของสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่นต่ำสุดไปจนถึงความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำที่เราสนใจจะดูดกลืนแสงได้ ตัวอย่างกรณีของ Si ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.1 eV ดังนั้นจึงหาปริพันธ์จากความยาวคลื่น 1.13 μm ไปถึงประมาณ 0.2 μm รูปที่ 2.7 แสดงผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดในอุดมคติที่สารกึ่งตัวนำจะสามารถผลิตได้ โดยที่แกนในแนวนอนคือช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si จากรูปนี้ทำให้เราทราบว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดมีค่าประมาณ $35 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ที่แสงอาทิตย์ ความเข้ม AM1.5 และถ้าสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างพลังงานแคบ จะผลิตกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้มากขึ้น

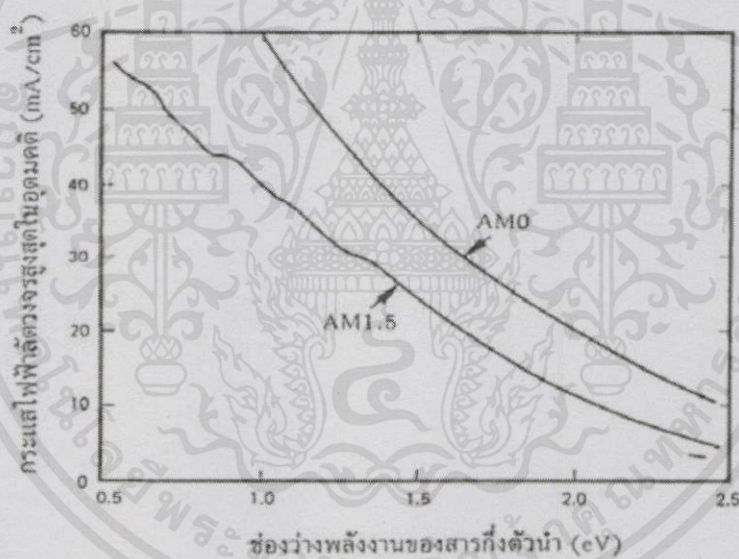


รูปที่ 2.5 สเปกตรัมการแผ่รังสีพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของโฟตอนฟลักซ์ของแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.7 ผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดในอุดมคติที่สารกึ่งตัวนำจะสามารถผลิตได้

2.7.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด

ข้อจำกัดพื้นฐานที่เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด V_{oc} ยังไม่เป็นที่ทราบชัดเจน อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ (5) เราเคยทราบแล้วว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด V_{oc} มีค่าเท่ากับ

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (12)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_0 คือกระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัว และมีค่าเท่ากับ

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \quad (13)$$

I_0 ควรมีค่าต่ำที่สุดจึงจะทำให้ได้ V_{oc} สูงสุด ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si ผลการคำนวณค่าสูงสุดของ V_{oc} ได้ผลประมาณ 700 mV และค่าสูงสุดของฟิลล์แพกเตอร์ได้ประมาณ 0.84 ใน สมการที่ (13) พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ความหนาแน่นของพาหะ (n_i) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดบรี สุทธิ n_i มีค่าเท่ากับ

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง I_0 และ ช่องว่างพลังงาน E_g ที่พอจะเป็นที่ยอมรับกันมีค่าดังนี้

$$I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad \text{A/cm}^2 \quad (15)$$

สมการที่ (12) และ (15) ซึ่งให้เราทราบว่าถ้าช่องว่างพลังงานมีค่ามาก จะทำให้ V_{oc} มีค่ามากด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้เป็นสิ่งที่ตรงข้ามกับกรณีของ I_{sc} (ถ้าช่องว่างพลังงานมีค่ามาก จะทำให้ I_{sc} มีค่าลดลง)

2.7.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่เรานำไปวางรับแสงอาทิตย์ไว้ตลอดทั้งวันนั้น จะได้รับอิทธิพลจากแสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นมาก และการใช้งานนั้น บางครั้งอาจต้องไปติดตั้งในบริเวณที่สภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงมาก เช่น บริเวณที่มีหิมะ หรือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมาก เช่น ในทะเลทราย อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มาก ซึ่งผู้ใช้งานควรจะทราบดังต่อไปนี้เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น จะทำให้

1. กระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะสูงขึ้น แต่เพิ่มไม่มากนัก
2. แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและฟิลล์แพกเตอร์จะลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดคือ

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (16)$$

ถ้าเราไม่พิจารณาพจน์ที่มีค่าน้อย เราจะได้ค่าใกล้เคียงของ I_{sc} ว่า

$$I_{sc} = AT^\gamma e^{-E_{g0}/kT} e^{qV_{oc}/kT} \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โดยที่ A : พจน์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

E_{g0} : ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ : พจน์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเป็นพจน์ที่มีอิทธิพลต่อ I_0 และมีค่าประมาณ 1-4

ผลการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (18) คือ

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = A\gamma T^{-1} e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} + AT^\gamma \left(\frac{q}{kT} \right) \left[\frac{dV_{oc}}{dT} - \left(\frac{V_{oc}-V_{g0}}{T} \right) \right] e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} \quad (19)$$

เนื่องจากพจน์ dI_{sc}/dT มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจากสมการที่ (19) จึงได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma(kT/q)}{T} \quad (20)$$

สมการที่ (20) นี้บอกให้เราทราบว่า V_{oc} แปรผกผันกับอุณหภูมิในลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้น นั่นคือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น V_{oc} จะลดลง

2.8 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์

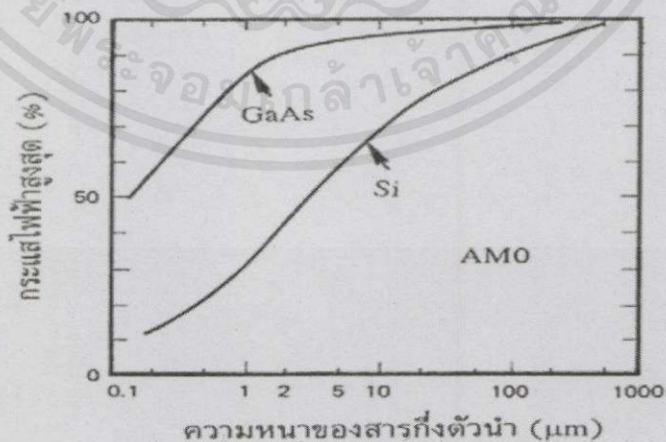
ในหัวข้อก่อนหน้านี ได้กล่าวถึงขีดจำกัดของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วว่าควรมีค่าเท่าไรแต่อย่างไรก็ตาม ในทางความเป็นจริงจะมีแพ็คเกจอื่น ๆ อีกมากมายที่เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงไปจากค่าในอุดมคติ ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

2.8.1 การสูญเสียกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

การสูญเสียกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีสาเหตุดังต่อไปนี้

2.8.1.1 การสะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากผิวที่รับแสงของสารกึ่งตัวนำนั้น โดยทั่วไปมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่สูงมาก ดังนั้นโฟตอนจำนวนมากจึงถูกสะท้อนกลับ โดยไม่ได้เดินทางเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ วิธีการลดการสะท้อนแสงวิธีหนึ่ง ได้แก่ การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง เช่น SiO_2 และ Si_3N_4

2.8.1.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสง เช่น การเคลือบขั้ว Al เป็นลายเส้นด้านผิวรับแสง ทำให้เกิดการบังแสงพื้นที่ที่บังแสงมีประมาณ 5-15% ของพื้นที่ทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 2.8 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดและความหนาของสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs และ Si ที่ใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

2.8.1.3 โฟตอนบางตัวไม่ถูกดูดกลืน แต่สามารถเดินทางทะลุสารกึ่งตัวนำออกไปทางด้านหลังของ เซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้เพราะสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าไม่มาก วิธีการแก้ไขคือการใช้ผลึกที่มีความหนาที่เพียงพอ สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานชนิดไม่ตรงต้องใช้ความหนามากกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานชนิดตรง รูปที่ 2.8 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและความหนาของสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs และ Si ที่ใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

2.8.1.4 มีการสูญเสียเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันก่อนที่จะออกสู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ การรวมตัวเกิดขึ้นมากที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำและในชั้นที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายใน ปกติพาหะโฟโตที่สามารถเดินทางออกสู่ภายนอกได้ดีได้แก่พาหะโฟโตที่เกิดขึ้นในย่านปลอดพาหะซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) ช่วยพัดพาให้พาหะโฟโตไหลด้วยสนามไฟฟ้า

2.8.2 การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

กระบวนการที่เป็นตัวกำหนดการสูญเสียของ V_{oc} โดยพื้นฐานได้แก่ กระบวนการรวมตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำ การรวมตัวของพาหะทำให้กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัวเพิ่มขึ้นดังที่แสดงในสมการที่ (12) การรวมตัวอาจเกิดขึ้นได้ทั้งภายในสารกึ่งตัวนำและที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ระดับแตร็ป (trap levels) ในย่านปลอดพาหะมีอิทธิพลมากต่อการรวมตัวของพาหะ อัตราการรวมตัวของพาหะที่ระดับแตร็ปแสดงได้ด้วยสมการ

$$U = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h0}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)} \quad (21)$$

การรวมตัวที่ระดับแตร็ปในย่านปลอดพาหะ จะทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นตามสมการดังนี้

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) + I_w(e^{qV/2kT} - 1) \quad (22)$$

โดยที่ I_w มีค่าเท่ากับ

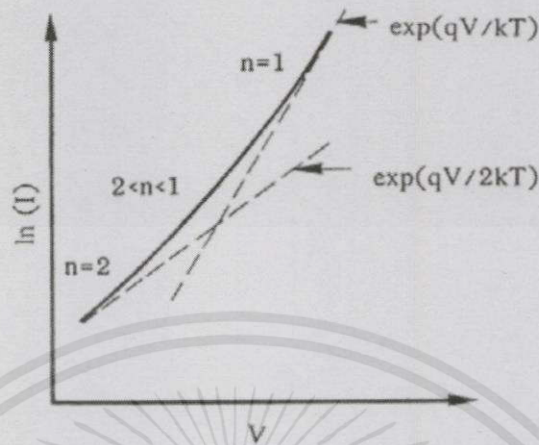
$$I_w = \frac{qAn_i\pi}{2\sqrt{\tau_{e0}\tau_{h0}}} \frac{kT}{q\xi_{max}} \quad (23)$$

โดยที่ ξ_{max} คือสนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อ p-n

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามีดและแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อ p-n โดยการพิจารณากรณีมีการรวมตัวของพาหะในชั้นปลอดพาหะ พจน์ที่สองในสมการที่ (22) จะมีอิทธิพลมาก ในขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย (ทำให้ $n=2$) และพจน์ที่หนึ่งในสมการที่ (22) จะมีอิทธิพลมากในขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่ามาก (ทำให้ $n=1$) เพื่อความสะดวก เราอาจจะเขียนสมการที่ (22) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $I = I_0(e^{qV/kT} - 1)$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (24) ใช้

โดยที่ แฟกเตอร์ n มีค่าอยู่ระหว่าง 1-2



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามีดและแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อ p-n โดยพิจารณากรณีที่มีการรวมตัวของพาหะในชั้นปลอดพาหะ

จากการที่กระแสไฟฟ้ามีดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมของพาหะดังกล่าว จึงทำให้ V_{oc} มีค่าลดลง

2.8.3 การสูญเสียฟิลล์แฟกเตอร์

การสูญเสียฟิลล์แฟกเตอร์มีสาเหตุหลายข้อดังต่อไปนี้

2.8.3.1 เกิดจากค่าแฟกเตอร์ n และ V_{oc}

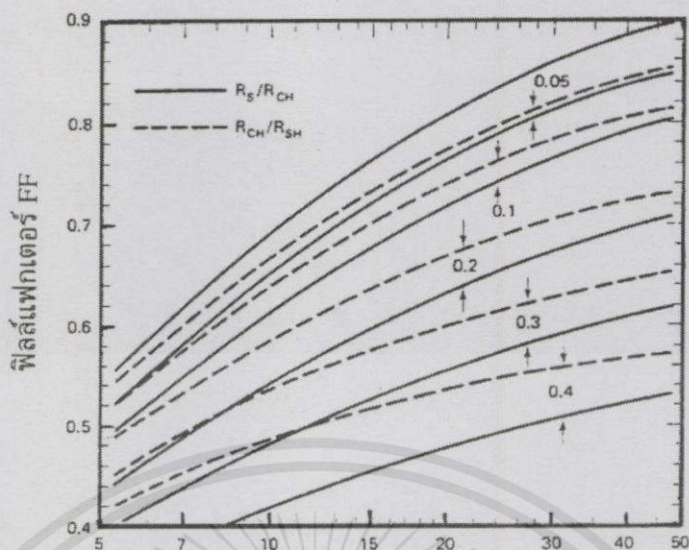
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์และแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด จะเห็นได้ว่า ถ้าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดลดลง ก็จะทำให้ฟิลล์แฟกเตอร์ลดลงด้วย และจากการที่เราได้วิเคราะห์มาแล้วว่าถ้าแฟกเตอร์ n เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ V_{oc} ลดลง ดังนั้นค่าฟิลล์แฟกเตอร์ในรูปที่ 2.9 ก็จะต้องลดลงด้วยถ้า n มีค่าเพิ่มขึ้นถ้าเราให้นิยามว่า $V_{oc} = V_{oc} / (nkT/q)$ ดังนั้นเราจะสามารถเขียนสมการของฟิลล์แฟกเตอร์ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ว่า

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (25)$$

2.8.3.2 เกิดจากค่าความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขั้ว

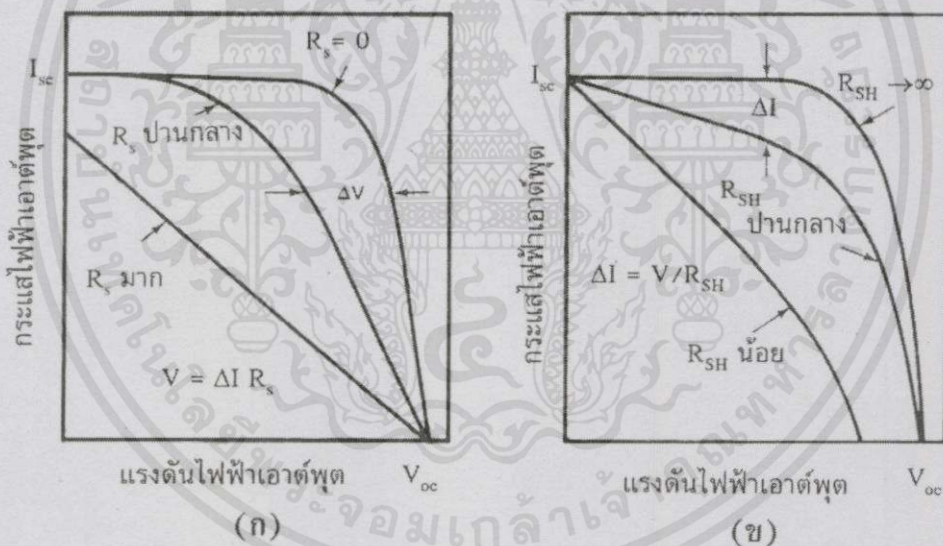
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีความต้านทานอนุกรม (series resistance) R_s น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติความต้านทานอนุกรมนี้อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความต้านทานอนุกรมของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานของรอยต่อ p-n ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า ความต้านทานที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าอนอร์แมลไลซ์ของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ($V_{oc}/\ln kT/q$)

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด



รูปที่ 2.11 (ก) อิทธิพลของความต้านทานอนุกรม และ (ข) อิทธิพลของความต้านทานขนั้ดที่มีต่อ ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีความต้านทานขนั้ด (shunt resistance) R_{sh} มากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติความต้านทานขนั้ดนี้อาจมีค่าลดลง อันเนื่องจากการเกิดรั่วของกระแสไฟฟ้าที่ขอบของเซลล์แสงอาทิตย์หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข) แสดงอิทธิพลของความต้านทานอนุกรมและอิทธิพลของความต้านทานขนั้ดตามลำดับที่มีต่อลักษณะสมบัติเอาต์พุตของ

เอกสารนี้ เซลล์แสงอาทิตย์นั้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและชนิดอะมอร์ฟัส โดยกำหนดช่วงของอุณหภูมิในการศึกษาตั้ง -70 ถึง 70 °C โดยมีแหล่งกำเนิดแสง , แหล่งกำเนิดความร้อนที่ปรับค่าได้ (hot plate) และไนโตรเจนเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ

3.1 อุปกรณ์การ

3.1.1 แหล่งกำเนิดแสงเฮไลเจน ขนาด 100 w



3.1.2 มัลติมิเตอร์ UT55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ปรับค่าได้ (hot plate รุ่น IKA C-MAG HS 4)

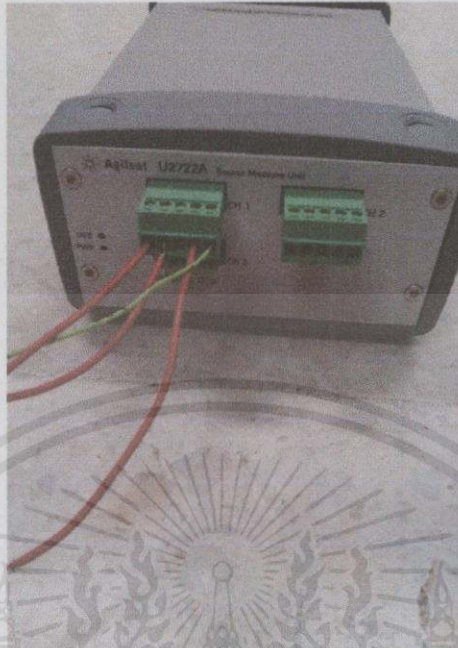


3.1.4 สายเทอร์โมคัปเปิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เครื่อง Agilent U2722A source measure unit

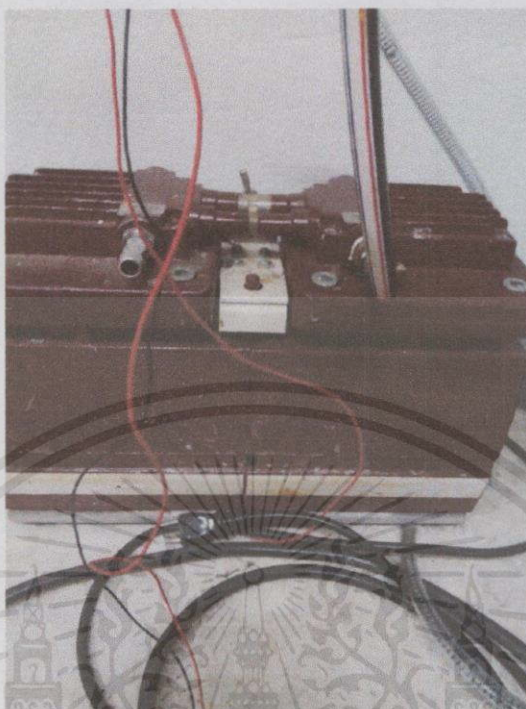


3.1.6 ขาตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 ปุ่ม



3.1.8 หม้อแปลงไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานพิเศษเท่านั้นเป็นเอกสารให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 แคมเบอร์

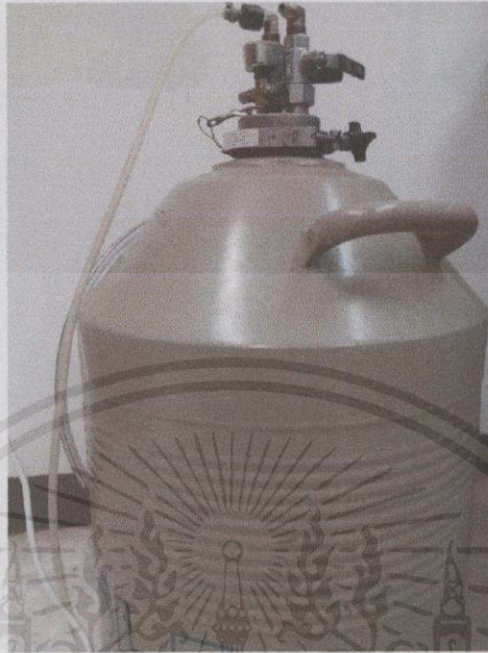


3.1.10 เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 ไนโตรเจนเหลว



3.1.12 ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.13 หลอดไฟ BED Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W

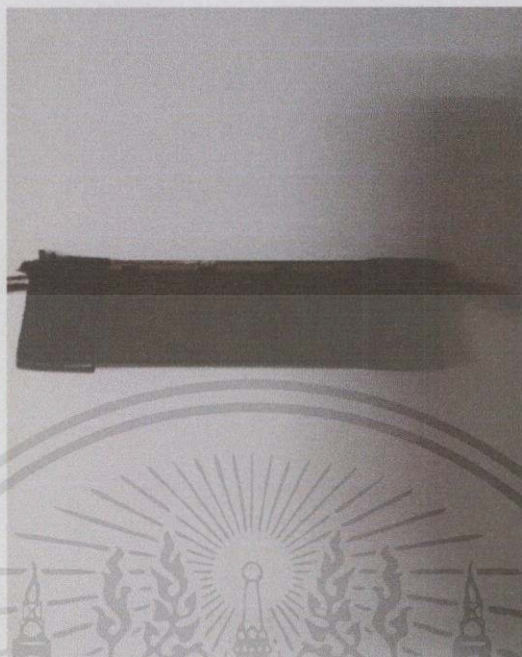


3.1.14 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.15 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส



3.1.16 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว (ขนาดเล็ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.17 คอมพิวเตอร์



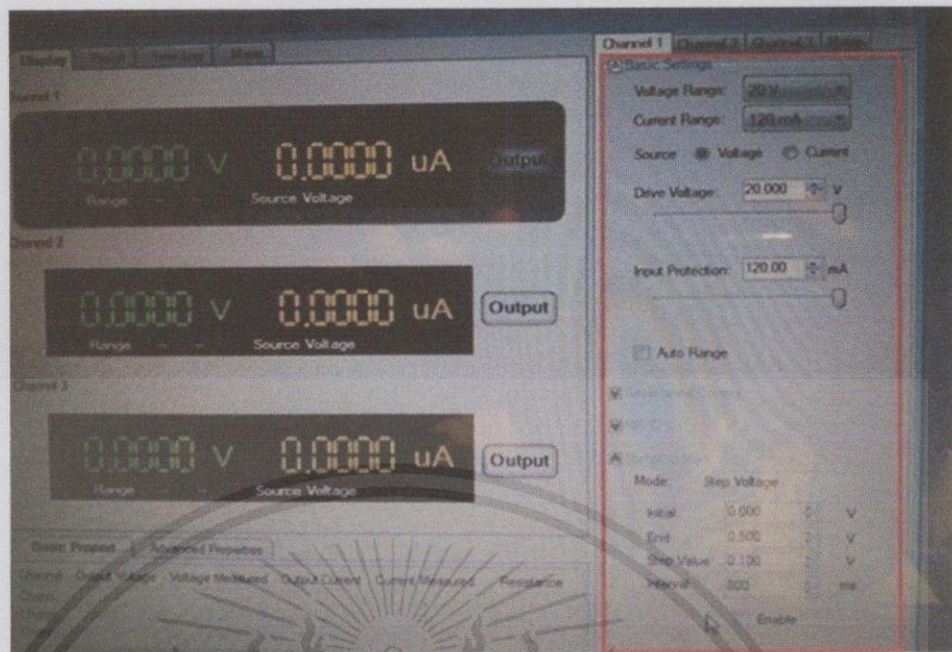
3.2 วิธีการทดลอง

ในส่วนของวิธีการทดลองนี้เราได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยในส่วนของอุณหภูมิสูงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุณหภูมิสูงในที่มืดและอุณหภูมิสูงในที่ฉายแสง ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว 3 เซลล์ และเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิด อะมอร์ฟัสอีก 2 เซลล์ ดังนี้

3.2.1 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิสูงในที่มืด

1. ทำการจัดอุปกรณ์ในแอมเบอร์ที่เตรียมไว้ ดังต่อไปนี้
2. นำสายเทอร์โมคัปเปิลมาแปะไว้ที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวแล้ว นำกระดาษฟอยล์มาครอบที่เซลล์แสงอาทิตย์ให้ติดไว้กับเครื่องกำเนิดความร้อนที่ปรับค่าได้
3. ต่อสายไฟของเซลล์เข้ากับเครื่อง Agilent U2722A source measure unit และ นำสายที่เหลืออีกข้างของเทอร์โมคัปเปิลมาต่อเข้ากับดิจิตอลมัลติมิเตอร์
4. ต่อเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ากับเครื่อง Agilent U2722A source measure unit
5. นำเซลล์ไปวางไว้ใต้แหล่งกำเนิดแสงเฮโลเจน ขนาด 100w ที่ติดอยู่กับขาตั้งภายใน แอมเบอร์แล้วปิดแอมเบอร์ให้เรียบร้อย
6. ตั้งค่าโปรแกรม Agilent U2722A source measure unit โดยกำหนดให้จ่าย Voltage พร้อมกำหนดค่าต่างๆดังรูปพร้อมทั้งกดปุ่ม Enable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การตั้งค่าโปรแกรม Agilent U2722A source measure unit

7. การเปิดแหล่งกำเนิดแสงรอให้อุณหภูมิถึงระดับที่สนใจ จึงกดปุ่ม output เพื่อบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์ โดยเราจะทำการบันทึกค่าที่ อุณหภูมิ 30 °C , 40 °C , 50 °C, ...70 °C
8. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเซลล์ที่ทดลองเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวที่เหลือและเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสจนครบ

3.2.2 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิสูงในที่มืด

1. ทำการจัดอุปกรณ์เหมือนในข้อ 3.2.1 แต่เปลี่ยนจากทำในแชมเบอร์ มาทำในห้องมืด
2. ต่ออุปกรณ์เหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็น BED Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W
3. ปรับแหล่งกำเนิดความร้อนที่ปรับค่าได้ เพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30 °C , 40 °C , 50 °C , ...70 °C ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.2.1 ข้อ 6-8

3.2.3 วิธีการทดลองส่วนของอุณหภูมิต่ำ

ในส่วนของอุณหภูมิต่ำเราเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว 3 เซลล์ มาทำการทดลองซึ่งวิธีการทดลองมีดังนี้

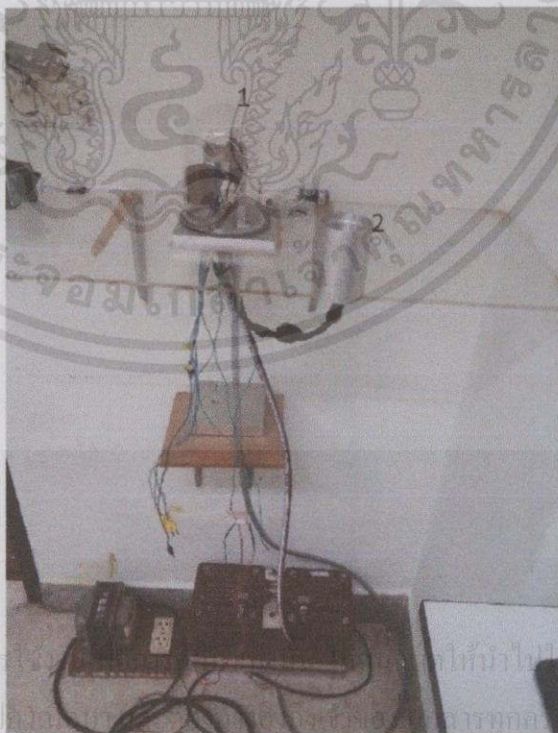
1. จัดอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วิธีต่ออุปกรณ์ในการทดลองส่วนที่เป็นอุณหภูมิต่ำ

2. นำเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว มาใส่ในเครื่องวัดคุณสมบัติทางฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำบริเวณทองแดง ที่มีเข็มสองเข็มเป็นขั้วบวกและขั้วลบ (หมายเลข 1) จากนั้นนำไนโตรเจนเหลวที่ใส่ภาชนะบรรจุเรียบร้อยแล้วมาเติมลงในกระบอกอลูมิเนียม (หมายเลข 2)



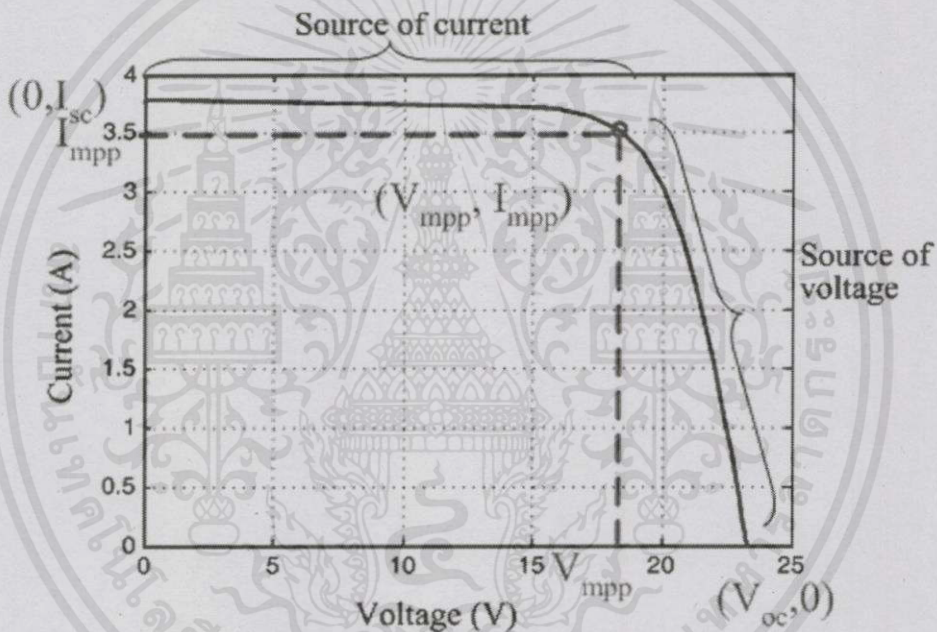
รูปที่ 3.3 ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำภายใต้อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ให้บริการไปรษณีย์ การบริการลูกค้า
 การบริการลูกค้าที่มีการนำไปใช้

3. ต่อเครื่อง Agilent U2722A source measure unit เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยตั้งค่าเหมือนการทดลองที่ผ่านมารอให้อุณหภูมิถึงค่าที่สนใจแล้วจึงกดปุ่ม output บันทึกค่า โดยครั้งนี้ช่วงอุณหภูมิที่เราสนใจอยู่ที่ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,... $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ
4. ทำการทดลองแบบเดิมซ้ำโดยเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว (ขนาดเล็ก) มาเป็นที่เหลืออีกสองเซลล์

3.3 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนของการหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , I_0 , R_{sh} และ R_s มีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

3.3.1 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})

การหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากตัวอย่างรูปที่ 3.4 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรคือค่ากระแสที่วัดได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

3.3.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (V_{oc})

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากตัวอย่างรูปที่ 3.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืดคือค่าแรงดันที่วัดได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})

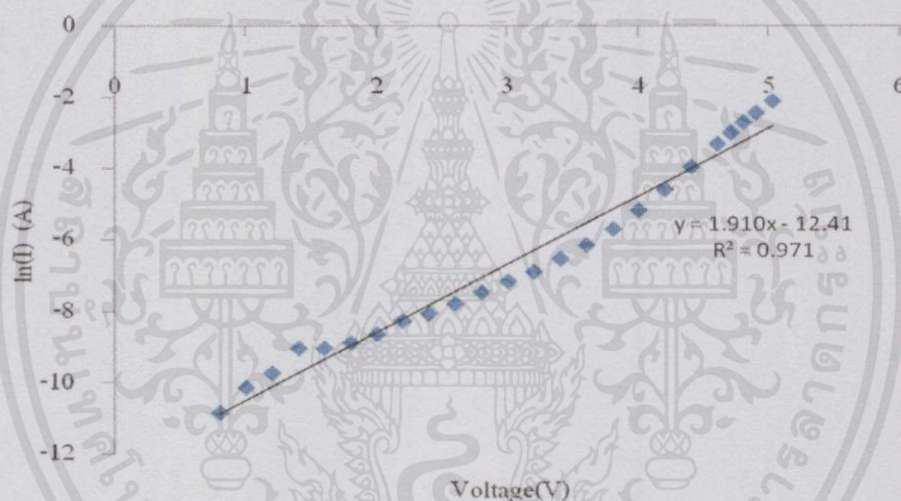
การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากตัวอย่างรูปที่ 3.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือค่าผลคูณของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดกับกระแสไฟฟ้าสูงสุด

3.3.4 ฟิสิกส์แพกเตอร์ (FF)

การหาค่าฟิสิกส์แพกเตอร์สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (10) ในบทที่ 2

3.3.5 กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัว (I_0)

การหาค่ากระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัวสามารถหาได้โดยการนำสมการที่ (2) ในบทที่ 2 มาเขียนในรูปของ logarithm จะได้ $\ln(I) = \frac{qV}{nkT} + \ln(I_0)$ และนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ (แกน y) กับ V (แกน x) ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งค่า $\ln(I_0)$ หาได้จากจุดตัดแกน y ถูกนำมาหาค่า I_0

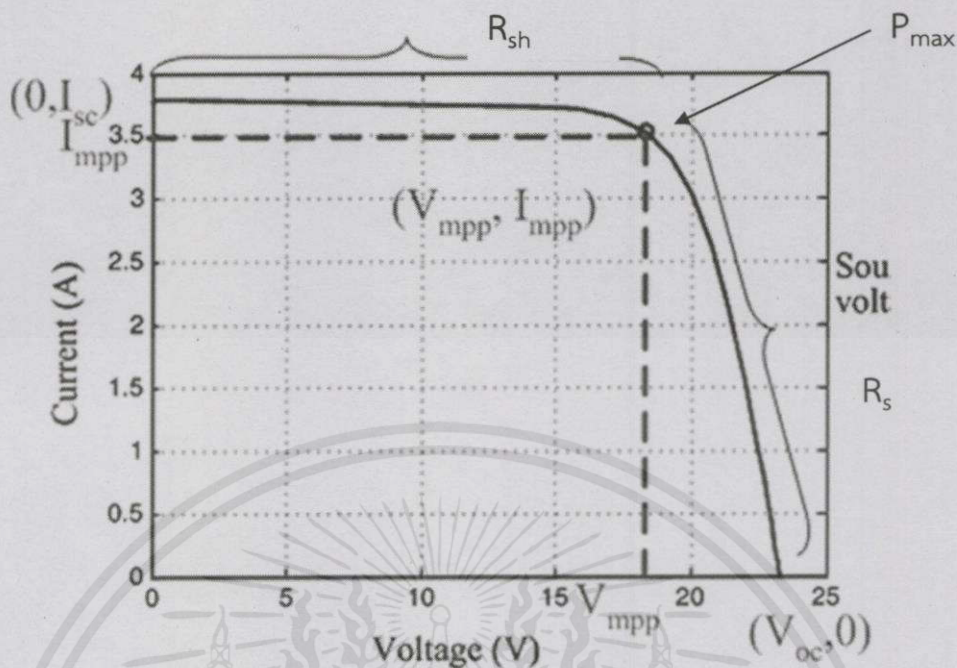


รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V ของเซลล์แสงอาทิตย์

3.3.6 ความต้านทานขั้ว (R_{sh}) และความต้านทานอนุกรม (R_s)

การหาค่าความต้านทานขั้วและความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยพล็อตกราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง (แกน x หรือแรงดันไฟฟ้า = 0) และหาค่าความชันของกราฟในแต่ละส่วนดังรูปที่ 3.6 โดยในการแบ่งช่วงเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานจะพิจารณาจากจุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง (แกน x หรือแรงดันไฟฟ้า = 0)

3.3.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหาออกมาแล้วมีค่ามากนั้นหมายความว่า ข้อมูลชุดนั้นมีการกระจายกันมาก เช่น ถ้าเป็นคะแนนสอบของนักเรียนก็บ่งบอกว่านักเรียนได้คะแนนต่างกัน แต่ถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหาออกมาแล้วมีค่าน้อยนั้นหมายความว่า ข้อมูลชุดนั้นเป็นข้อมูลที่เกาะกลุ่มกันอยู่ เป็นข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมี

วิธีการหาได้ดังสมการ
$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

3.3.8 ความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ย (Standard error of the mean)

ค่า SEM เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างไปยังค่าเฉลี่ยของประชากร ถ้า SEM มีค่าน้อย การประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างไปยังค่าเฉลี่ยของประชากรจะมีโอกาสถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นค่าเฉลี่ยของประชากรจะมีค่าอยู่ระหว่าง $\bar{X} - SEM$ จนถึง $\bar{X} + SEM$

ค่า SEM นี้จะมีค่าสวนทางกับจำนวนของกลุ่มตัวอย่าง ถ้า n มีจำนวนมาก ค่า SEM จะมีค่าลดน้อยลง ดังนั้นจำนวนกลุ่มตัวอย่างยิ่งมาก การประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างไปยังค่าเฉลี่ยของประชากรยิ่งมีโอกาสถูกต้องมากขึ้น ซึ่งมีวิธีการหาโดยใช้สมการ
$$SEM = \frac{S}{\sqrt{n-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

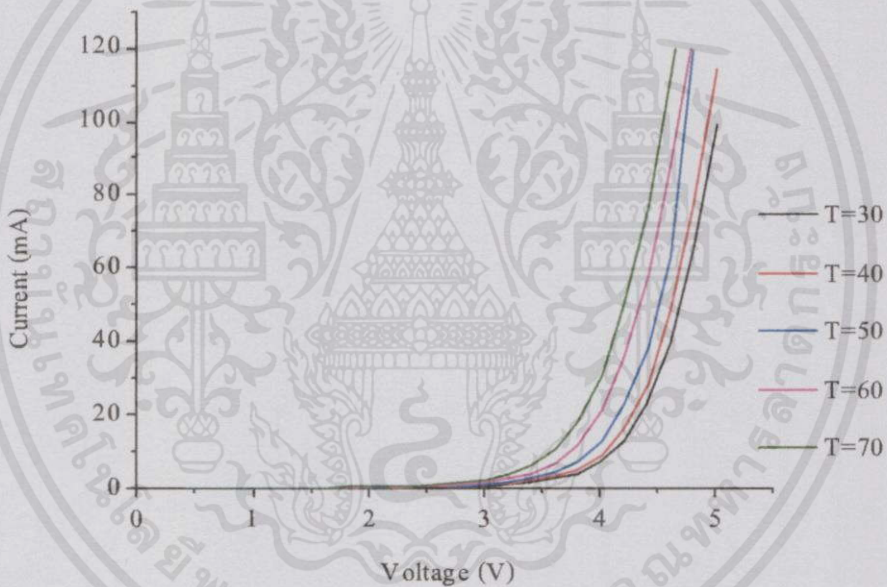
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูง

ผู้ทดลองได้ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์อาทิตย์ชนิดซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและอะมอร์ฟัสภายใต้อุณหภูมิสูง โดยอาศัยระบบวัดที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 โดยได้ทำการวัดทั้งในสภาวะมืดและสภาวะที่มีแสง แต่ละเซลล์จะทดลองซ้ำ 3 ครั้งและทำการบันทึกผลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.1-4.6 และรูปที่ 4.14-4.19

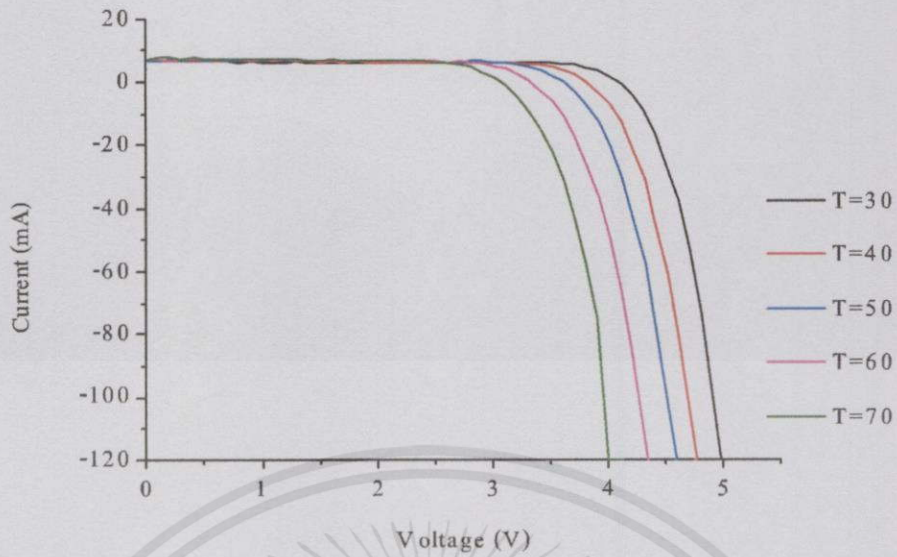
4.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว

ครั้งที่ 1

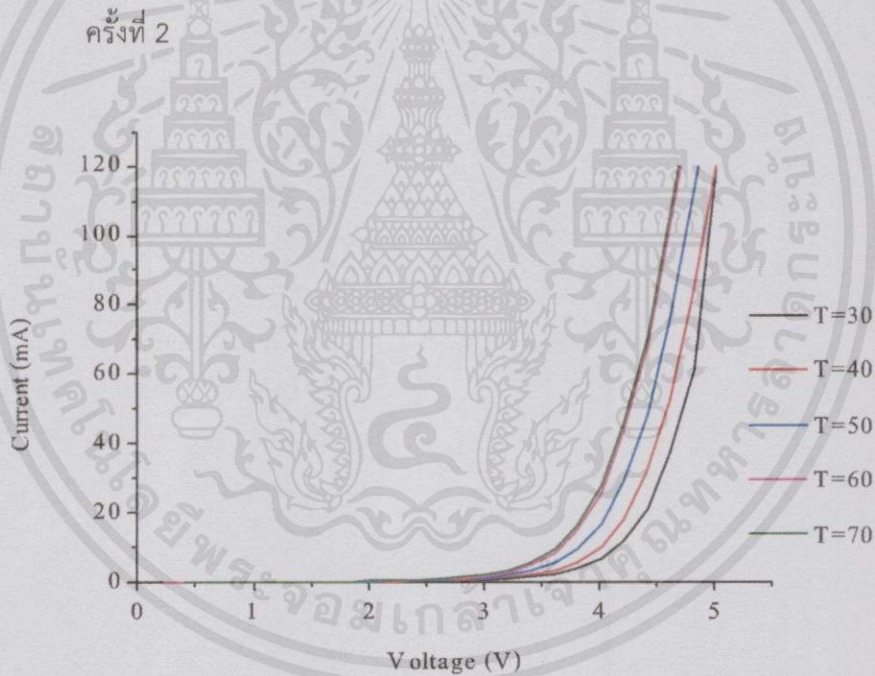


รูปที่ 4.1 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

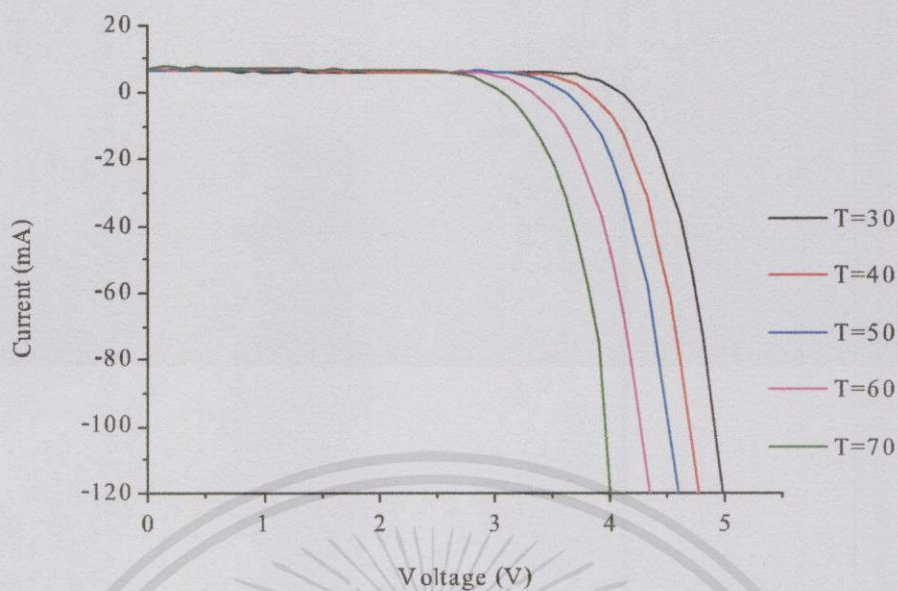


รูปที่ 4.2 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1

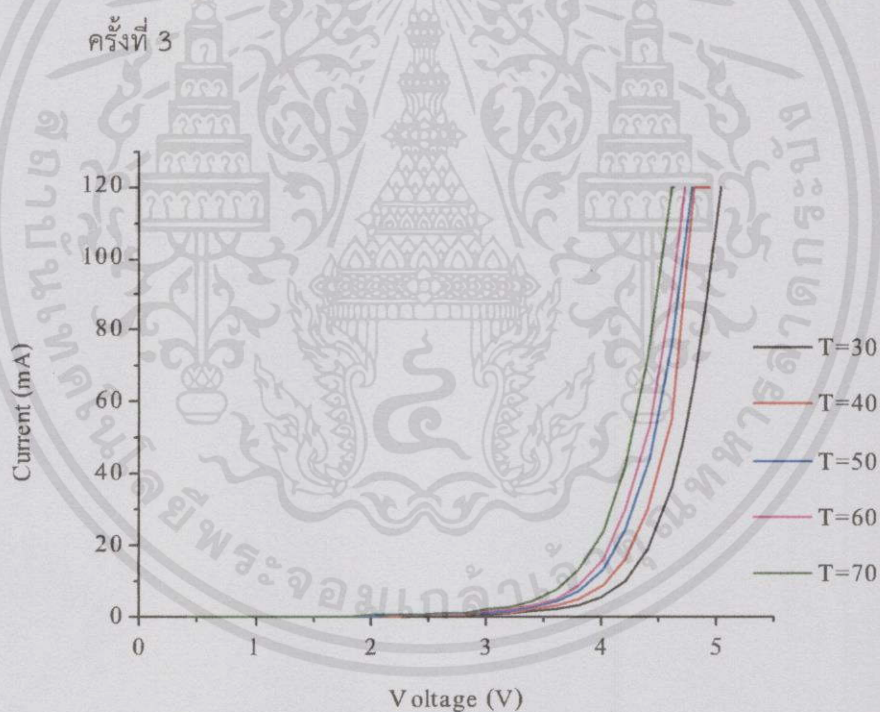


รูปที่ 4.3 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

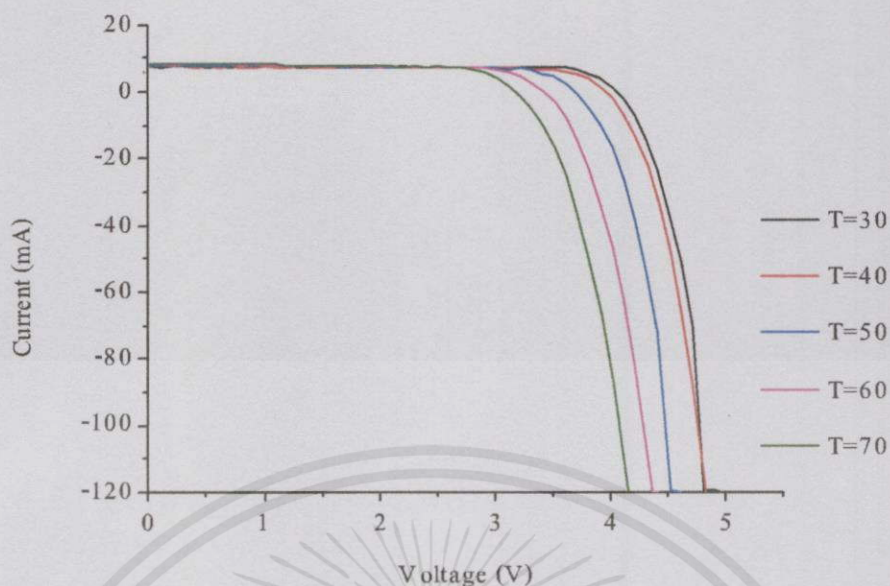


รูปที่ 4.4 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.5 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



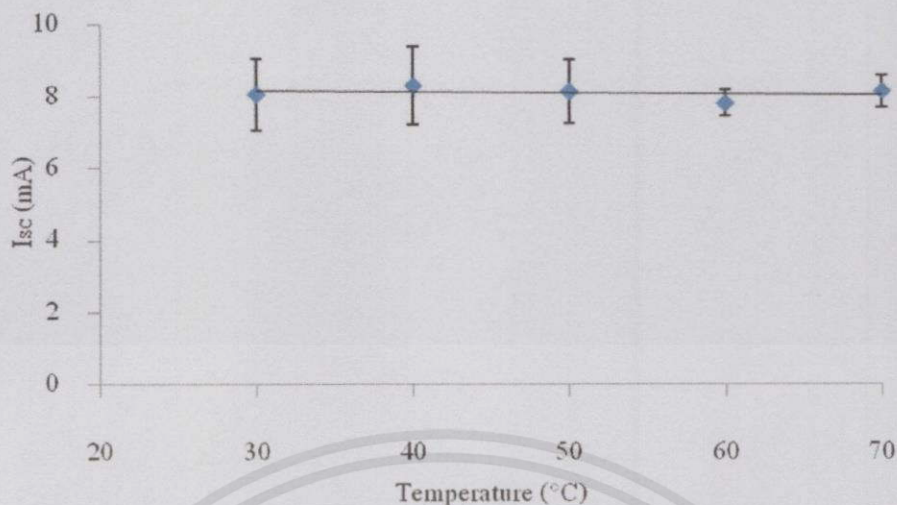
รูปที่ 4.6 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3

จากกราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ในสภาวะมืดจะถูกนำวิเคราะห์ I_0 และในสภาวะที่ที่เซลล์ได้รับแสงจะถูกนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , R_{sh} และ R_s ซึ่งให้ผลตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	6.560	9.920	7.680	8.050	1.710	0.990
40	6.780	10.360	7.740	8.290	1.850	1.070
50	6.880	9.840	7.680	8.130	1.530	0.880
60	7.100	8.160	8.180	7.810	0.620	0.360
70	7.280	8.820	8.310	8.137	0.780	0.450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



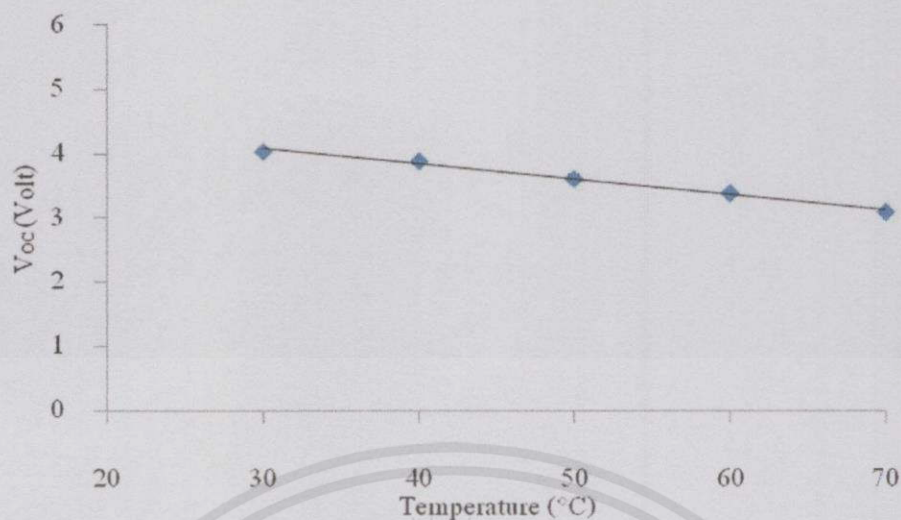
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีแนวโน้มแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นอยู่ 1.08% สอดคล้องกับสมการที่ (12) ในบทที่ 2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	4.010	4.110	4.010	4.040	0.057	0.033
40	3.810	3.917	3.911	3.880	0.061	0.035
50	3.513	3.720	3.611	3.614	0.103	0.060
60	3.314	3.412	3.414	3.380	0.057	0.033
70	3.011	3.110	3.112	3.080	0.058	0.033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



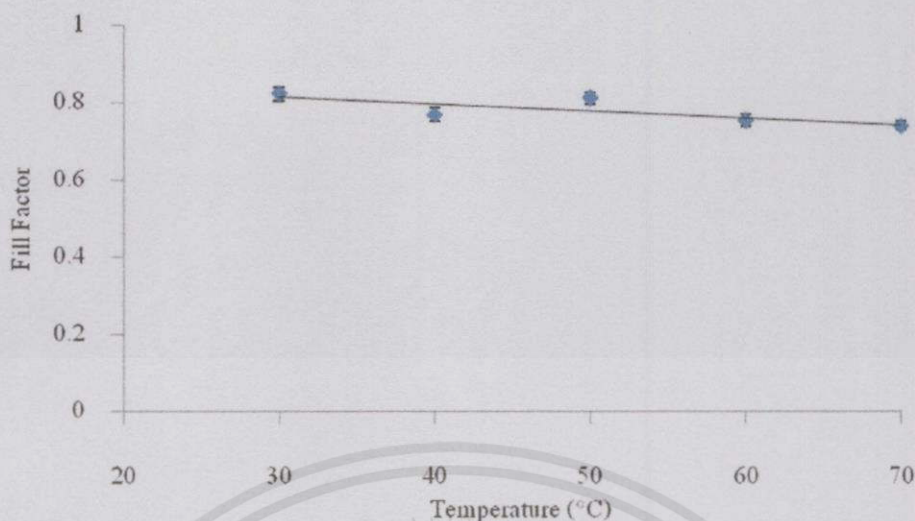
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจะมีแนวโน้มลดลงแบบเป็นเชิงเส้นซึ่งเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงอยู่ที่ 23.76% สอดคล้องกับสมการที่ (12) ในบทที่ 2

ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

ฟิลล์แฟกเตอร์						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	0.790	0.850	0.830	0.823	0.031	0.018
40	0.731	0.783	0.790	0.770	0.032	0.019
50	0.782	0.830	0.823	0.812	0.026	0.015
60	0.733	0.790	0.742	0.754	0.030	0.017
70	0.720	0.740	0.760	0.740	0.020	0.012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



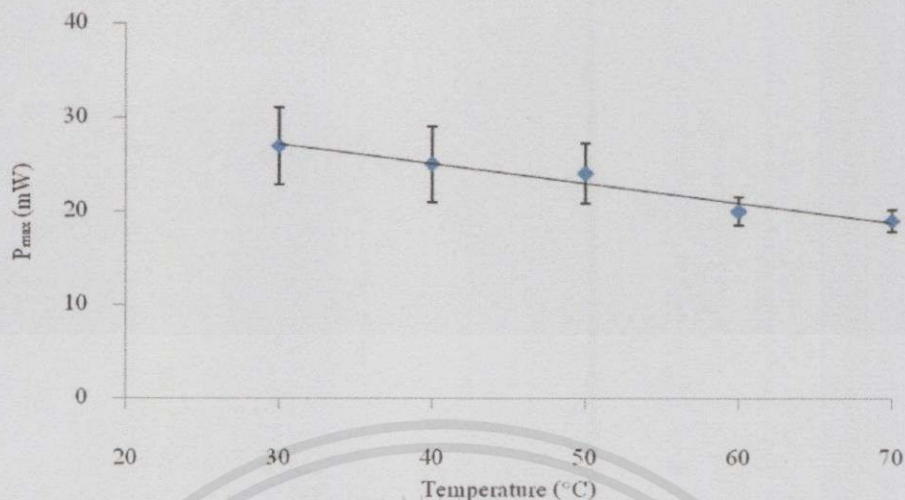
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าฟิลล์แพกเตอร์จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของค่าฟิลล์แพกเตอร์ลดลงอยู่ 10.09% ทั้งนี้เนื่องจากค่าของฟิลล์แพกเตอร์แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ดังแสดงในสมการที่ (25) ในบทที่ 2

ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	21.000	35.000	26.000	27.000	7.100	4.100
40	18.000	32.000	24.000	25.000	7.024	4.060
50	19.000	30.000	23.000	24.000	5.600	3.215
60	17.000	22.000	21.000	20.000	2.650	1.530
70	16.000	20.000	19.000	19.000	2.100	1.200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



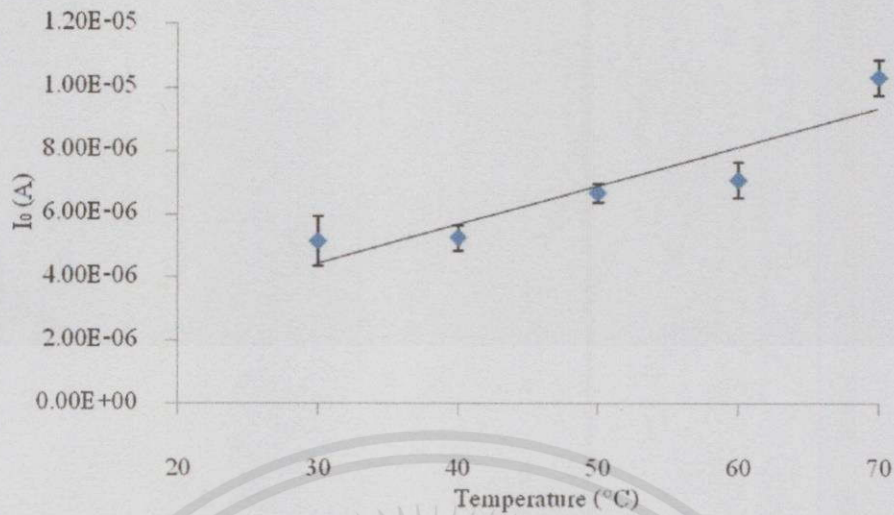
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงอยู่ 29.63% ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะแปรผันตรงกับฟิลล์แพกเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ (10) ในบทที่ 2

ตารางที่ 4.5 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสย้อนอิมิตัว (A)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	6.65E-06	4.660E-06	4.060E-06	5.120E-06	1.355E-06	7.820E-07
40	4.43E-06	5.710E-06	5.520E-06	5.220E-06	6.905E-07	4.000E-07
50	6.49E-06	6.230E-06	7.220E-06	6.650E-06	5.113E-07	2.950E-07
60	6.96E-06	8.060E-06	6.130E-06	7.050E-06	9.657E-07	5.600E-07
70	1.06E-05	1.100E-05	9.220E-06	1.030E-05	9.469E-07	5.470E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



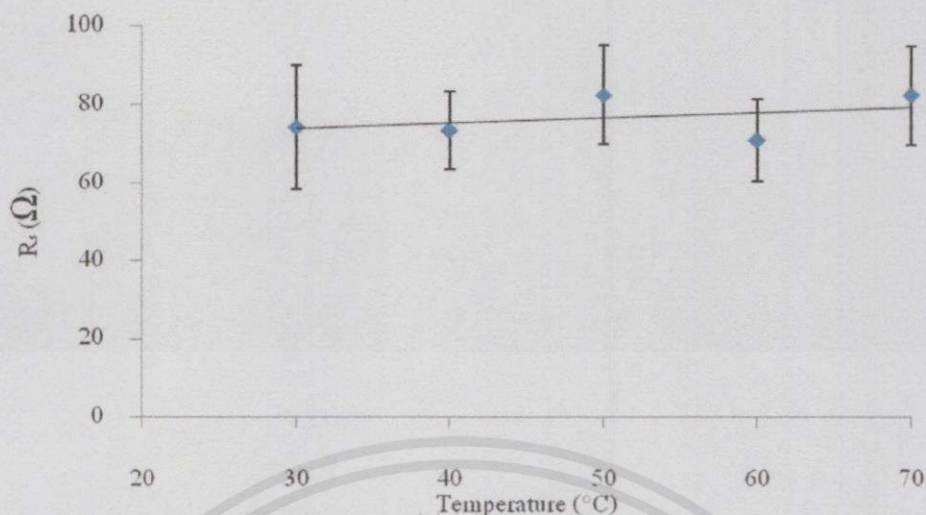
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอ้อมตัวกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.11 ค่ากระแสย้อนอ้อมตัวเกิดจากการที่มีพาหะบางส่วนสามารถข้ามกำแพงไฟฟ้าได้ที่บริเวณรอยต่อในสภาวะมืด จึงวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้เล็กน้อย ถ้าอุณหภูมิสูงของเซลล์สูงขึ้นเซลล์จะได้รับพลังงานความร้อนจึงทำให้พาหะมีโอกาสที่จะข้ามกำแพงศักย์ได้ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกระแสย้อนอ้อมตัวเพิ่มขึ้นอยู่ 50.30%

ตารางที่ 4.6 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิสูง

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	105.822	58.840	57.750	74.140	27.450	15.850
40	93.002	66.086	60.750	73.280	17.300	10.000
50	107.600	69.241	70.341	82.393	21.834	12.610
60	89.890	69.260	53.390	70.844	18.301	10.600
70	106.863	73.880	65.791	82.180	21.760	12.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



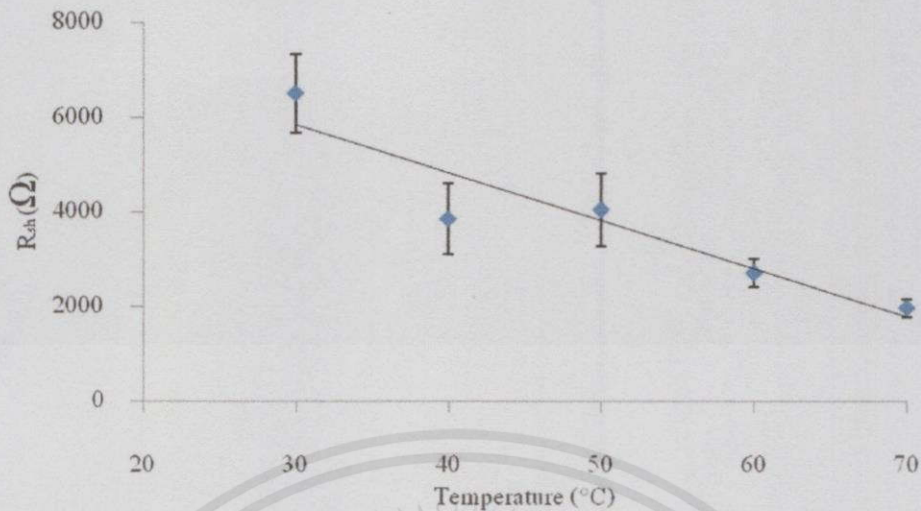
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานอนุกรม ทำโดยหาค่าความชันของกราฟซึ่งอาศัยหลักการที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.6 จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานอนุกรมจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นอยู่ 12.54%

ตารางที่ 4.7 แสดงผลค่าความต้านทานชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

ความต้านทานชนิด (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	5663.800	6526.990	7331.920	6507.600	834.230	481.643
40	3855.942	3084.710	4604.900	3848.520	760.124	438.860
50	4679.020	3174.810	4256.950	4036.924	775.870	447.950
60	3007.610	2704.750	2406.450	2706.270	300.583	173.540
70	2149.110	1762.210	1977.900	1963.100	193.874	111.930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



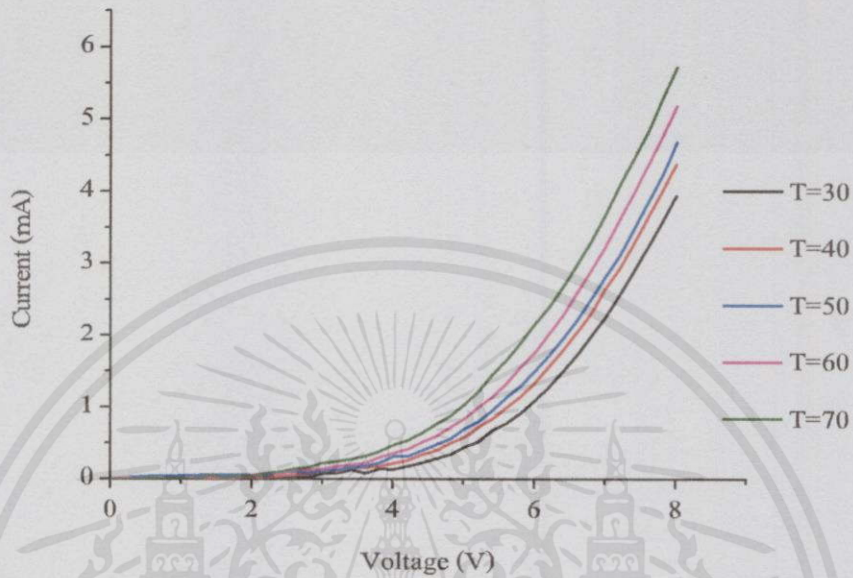
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดักกับอุณหภูมิ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานชั้นดัก ทำโดยหาค่าความชันของกราฟซึ่งอาศัยหลักการที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.6 จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานชั้นดักจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานชั้นดักลดลงอยู่ 69.83% ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ PriyankaSingh , S.N.Singh , M.Lal M.Husain [7]

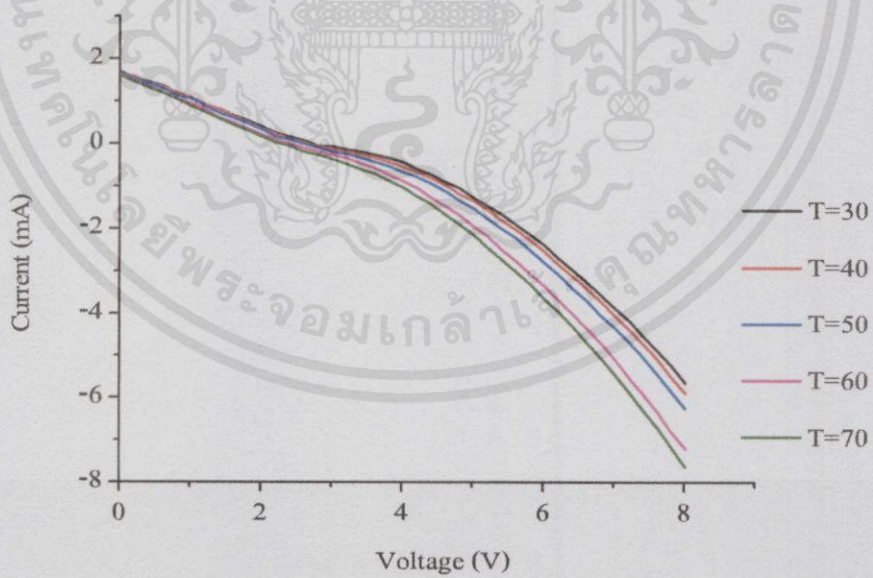
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส

ครั้งที่ 1



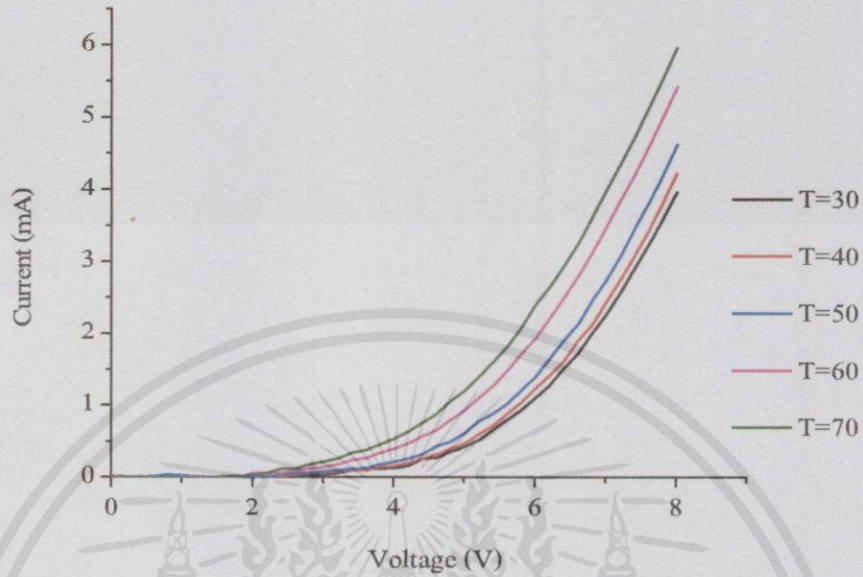
รูปที่ 4.14 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 1



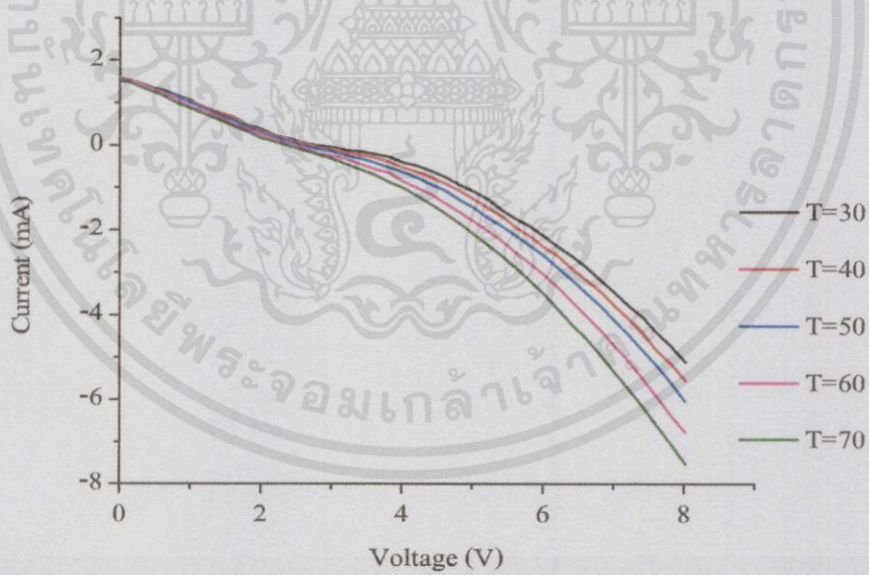
รูปที่ 4.15 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 1 กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 2



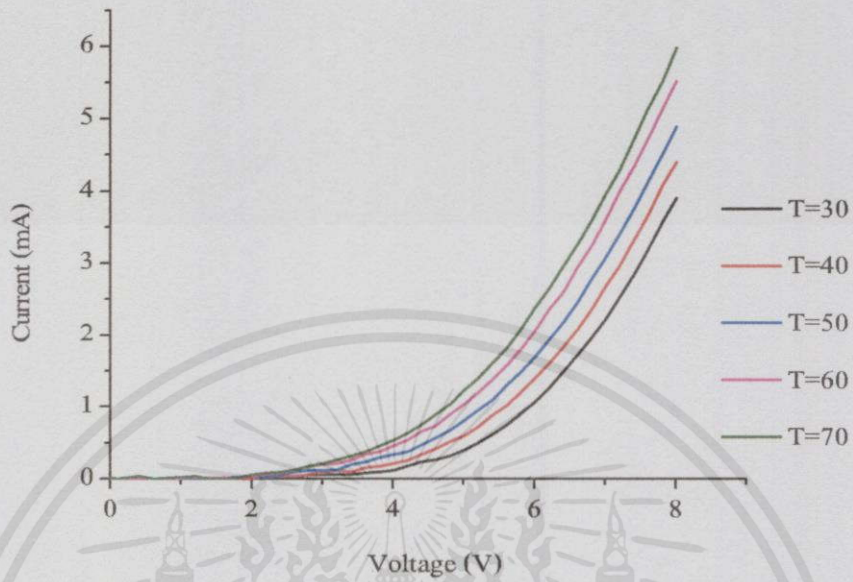
รูปที่ 4.16 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 2



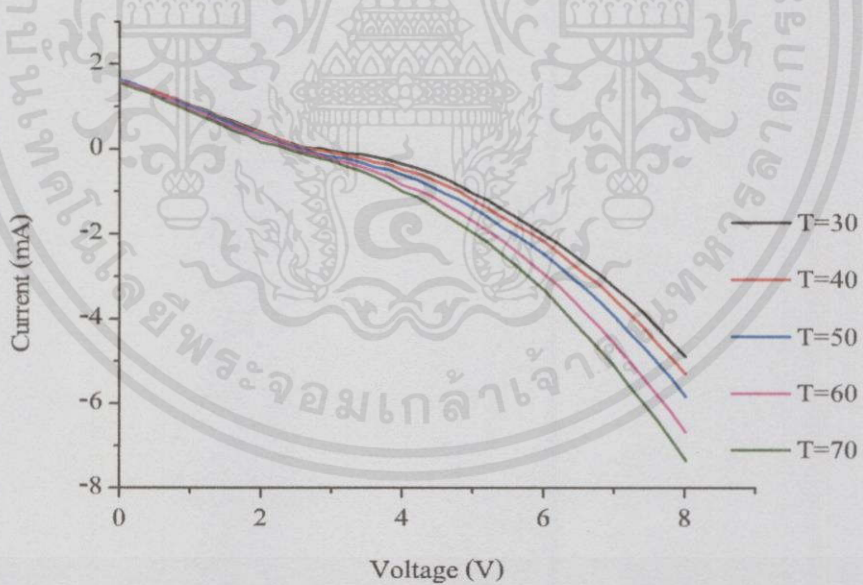
รูปที่ 4.17 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.18 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.19 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิส ในสภาวะมีดจะถูกนำวิเคราะห์ I_0 และในสภาวะที่ที่เซลล์ได้รับแสงจะถูกนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , R_{sh} และ R_s ซึ่งให้ผลตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิสภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	1.680	1.520	1.580	1.600	0.081	0.047
40	1.640	1.600	1.600	1.610	0.023	0.013
50	1.640	1.600	1.640	1.630	0.023	0.013
60	1.620	1.600	1.600	1.610	0.012	0.007
70	1.600	1.580	1.560	1.580	0.020	0.012



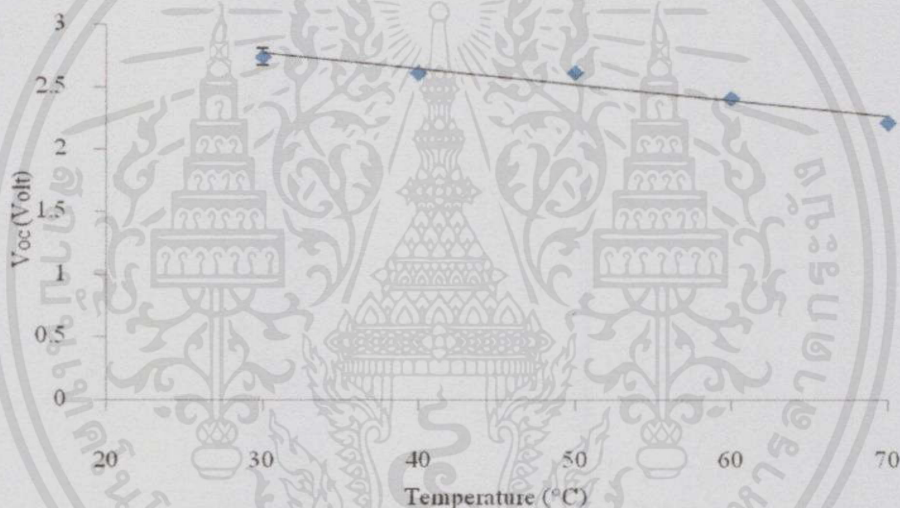
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิสมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นอยู่ 1.25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง

แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	2.610	2.807	2.807	2.741	0.114	0.066
40	2.607	2.607	2.608	2.607	0.001	0
50	2.610	2.612	2.606	2.610	0.003	0.002
60	2.407	2.407	2.407	2.407	0	0
70	2.207	2.210	2.207	2.208	0.001	0.001



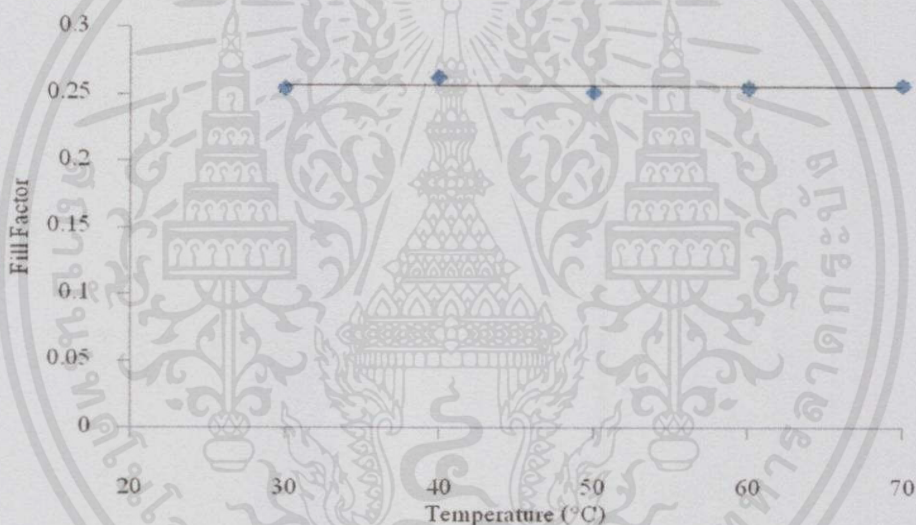
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจเปิดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสจะมีแนวโน้มลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าวงจเปิดลดลงอยู่ 19.45%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้ อุณหภูมิสูง

ฟิลล์แฟกเตอร์						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	0.257	0.256	0.250	0.254	0.004	0.002
40	0.263	0.263	0.260	0.262	0.002	0.001
50	0.250	0.254	0.250	0.251	0.003	0.002
60	0.248	0.257	0.257	0.254	0.005	0.003
70	0.253	0.256	0.260	0.256	0.004	0.002



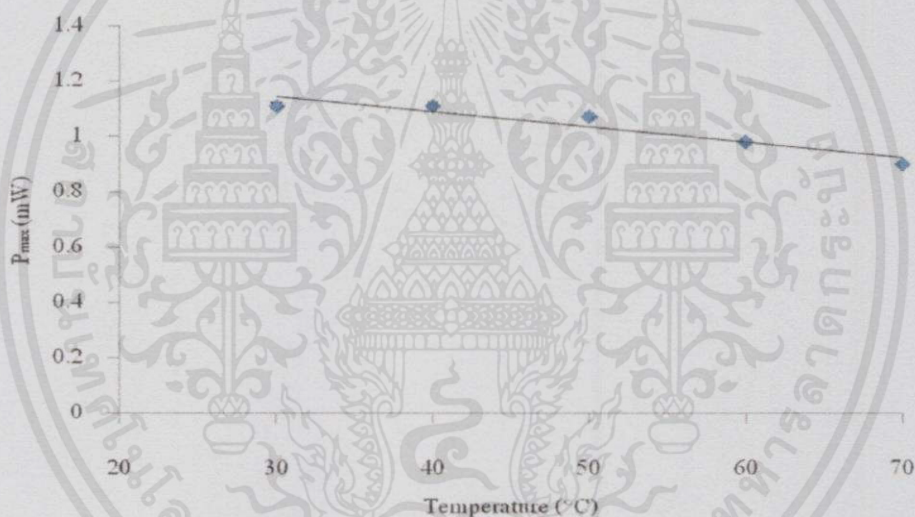
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าของฟิลล์แฟกเตอร์จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวที่จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของฟิลล์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้นอยู่ 0.79% ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Koc, M. Ito, M. Schubert [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิสภายใต้
อุณหภูมิสูง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	1.130	1.100	1.100	1.110	0.017	0.010
40	1.130	1.100	1.100	1.110	0.017	0.010
50	1.070	1.100	1.060	1.070	0.021	0.012
60	0.970	1.000	1.000	0.980	0.012	0.007
70	0.900	0.900	0.900	0.900	0	0



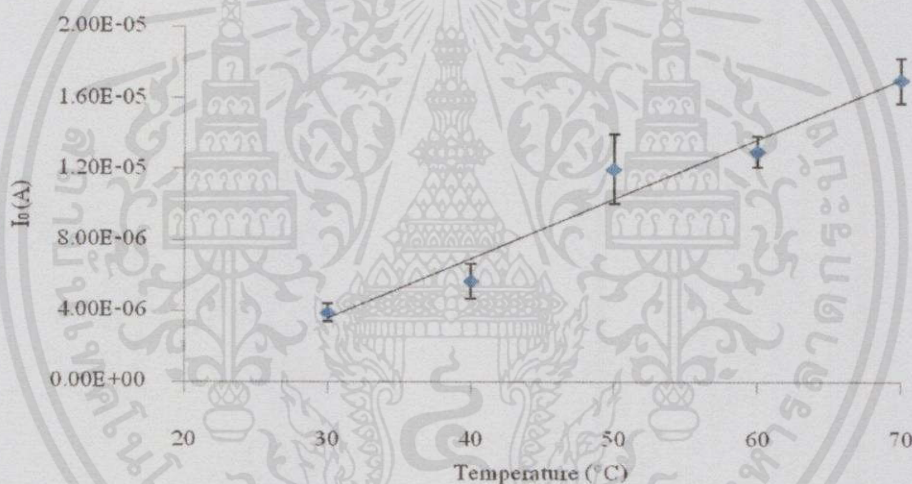
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลด ลงแบบเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงอยู่ 18.92%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงผลค่ากระแสย้อนอ้อมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสย้อนอ้อมตัว (A)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	5.000E-06	3.440E-06	3.400E-06	3.910E-06	9.000E-07	5.200E-07
40	7.280E-06	3.940E-06	5.800E-06	5.700E-06	1.700E-06	9.810E-07
50	1.600E-05	9.500E-06	1.040E-05	1.200E-05	3.410E-06	2.000E-06
60	1.400E-05	1.420E-05	1.140E-05	1.300E-05	1.500E-06	8.700E-07
70	1.480E-05	1.700E-05	1.920E-05	1.700E-05	2.200E-06	1.300E-06



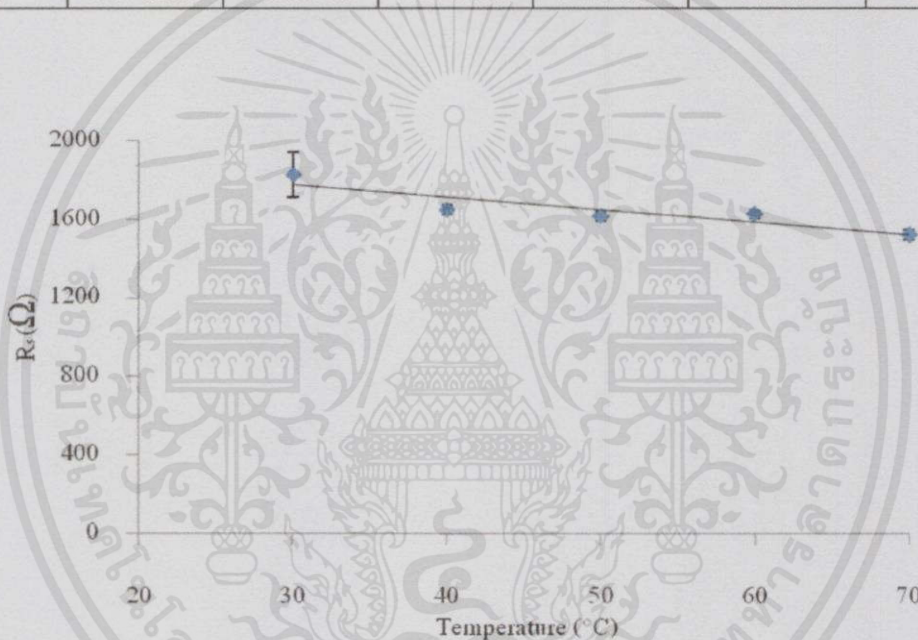
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอ้อมตัวกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่ากระแสย้อนอ้อมตัวจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว เพราะจากทฤษฎีตามสมการที่ (12) จะเห็นได้ว่าค่ากระแสย้อนอ้อมตัวจะแปรผกผันกับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นค่ากระแสย้อนอ้อมตัวจะมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งเปรียบ เทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกระแสย้อนอ้อมตัวเพิ่มขึ้นอยู่ 77%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัส ภายใต้อุณหภูมิสูง

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	1668.310	2047.292	1766.410	1827.340	196.702	113.600
40	1605.652	1690.674	1650.400	1648.900	42.530	24.600
50	1566.500	1652.780	1628.850	1616.041	44.600	25.750
60	1612.700	1591.600	1664.724	1623.000	37.653	21.740
70	1474.200	1518.900	1564.020	1519.030	44.920	26.000



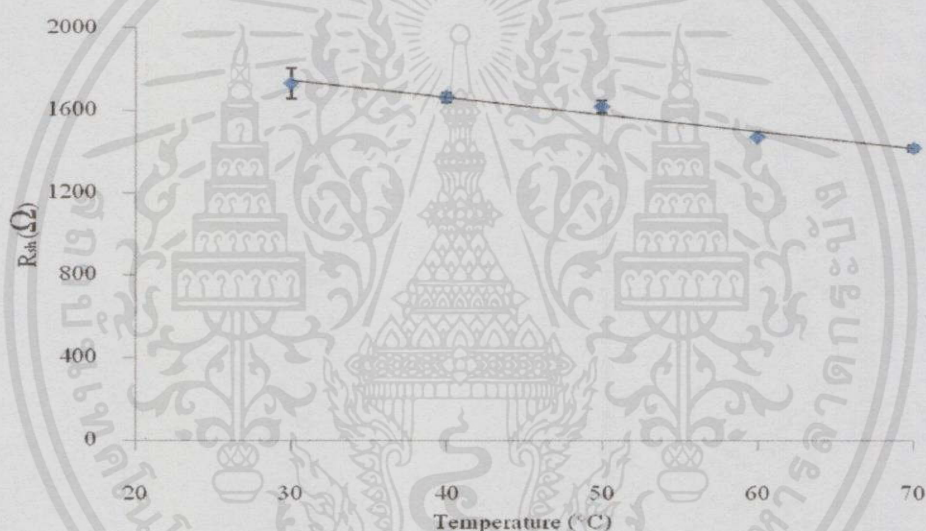
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานอนุกรม ทำโดยหาค่าความชันของกราฟซึ่งอาศัยหลักการที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.6 จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าค่าความต้านทานอนุกรมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้นแต่เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานอนุกรมลดลงอยู่ 16.86% ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุสารกึ่งตัวนำจะมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ PriyankaSingh , S.N. Singh , M.Lal M.Husain [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิภายใต้ อุณหภูมิสูง

ความต้านทานชั้นด (Ω)						
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	1591.600	1755.834	1849.660	1732.400	130.640	75.430
40	1619.200	1674.710	1693.300	1662.400	38.600	22.300
50	1645.700	1651.910	1559.800	1619.120	51.500	30.000
60	1459.920	1473.150	1480.823	1471.300	10.600	6.200
70	1390.100	1418.600	1439.000	1415.900	24.600	14.200



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดกับอุณหภูมิ

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานชั้นด ทำโดยหาค่าความชันของกราฟซึ่งอาศัยหลักการที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.6 จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานชั้นด จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 30 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานชั้นดลดลงอยู่ 18.27% ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ PriyankaSingh, S.N .Singh , M.Lal M.Husain [7]

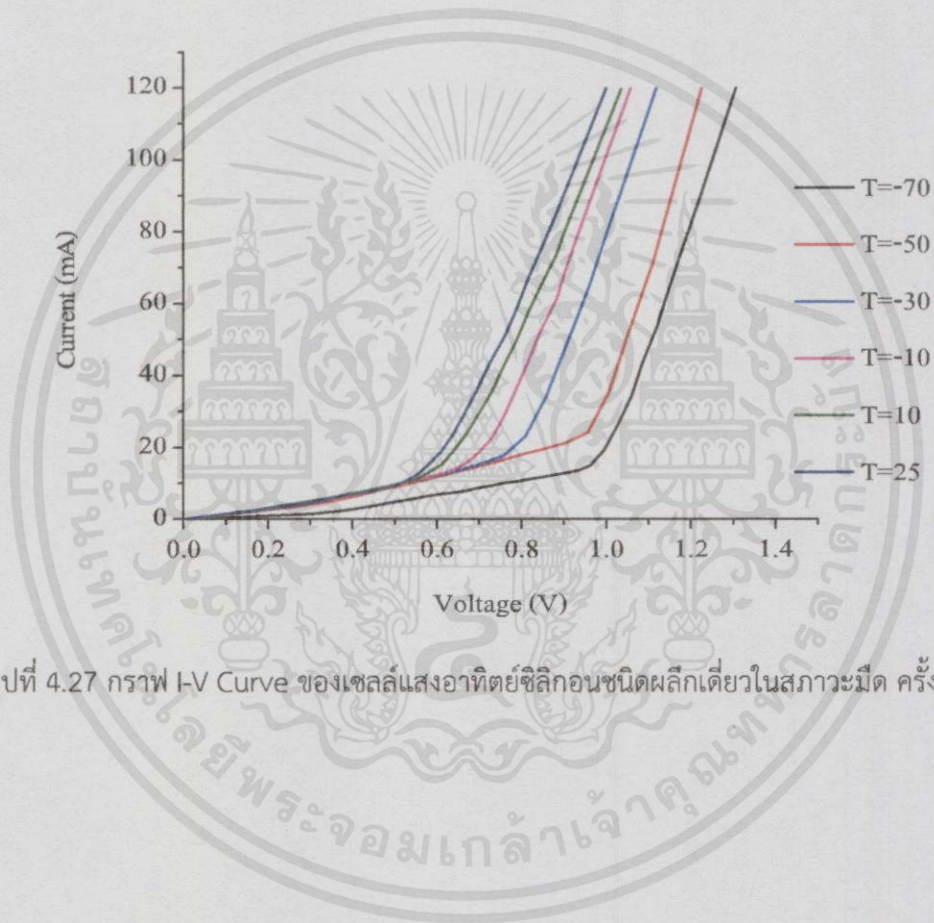
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิต่ำ

ผู้ทดลองได้ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์อาทิตย์ชนิดซิลิกอนภายใต้อุณหภูมิต่ำโดยอาศัยระบบวัดที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 โดยได้ทำการวัดทั้งในสภาวะมืดและสภาวะที่มีแสง แต่ละเซลล์จะทดลองซ้ำ 3 ครั้งและทำการบันทึกผลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.27-4.32

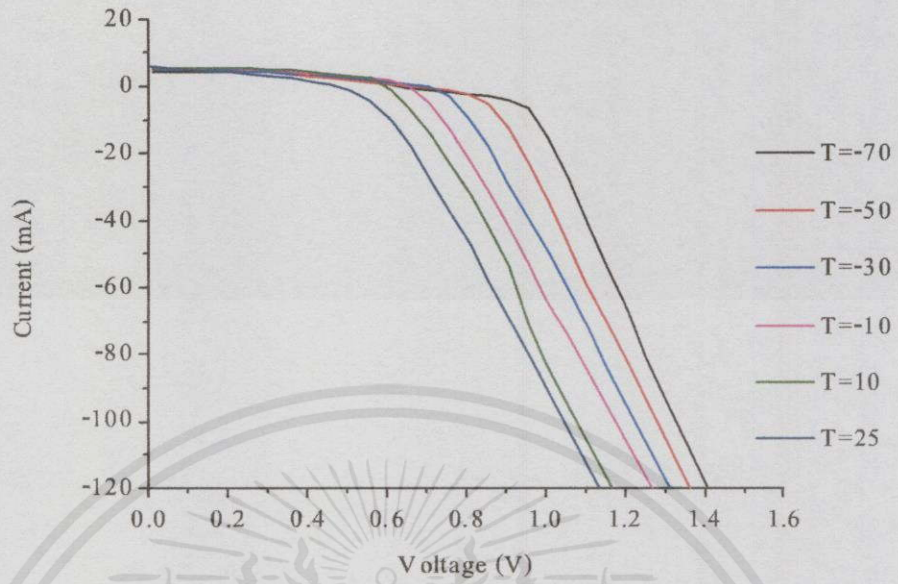
4.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว

ครั้งที่ 1

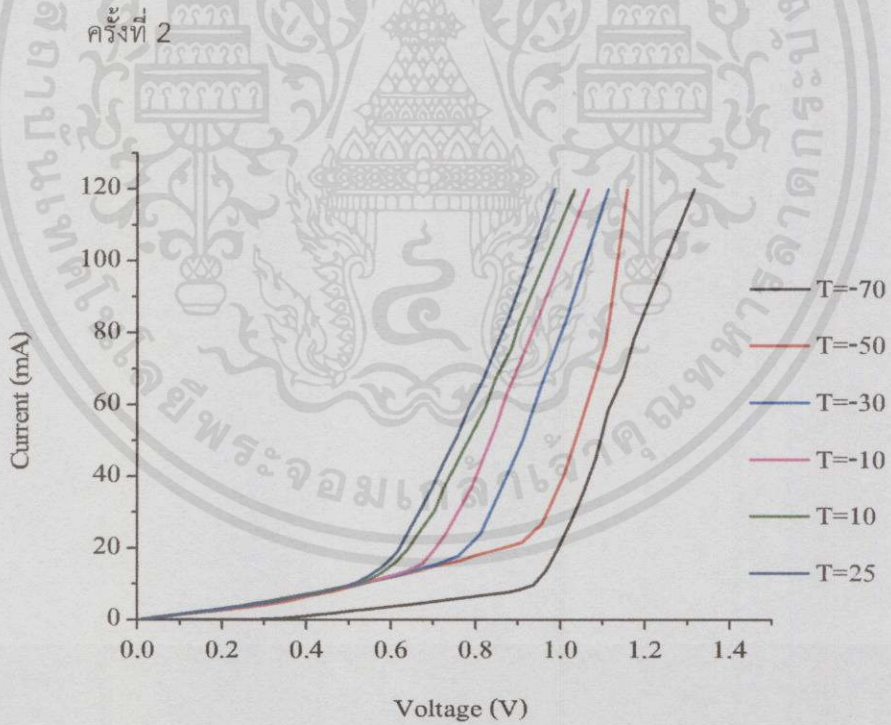


รูปที่ 4.27 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

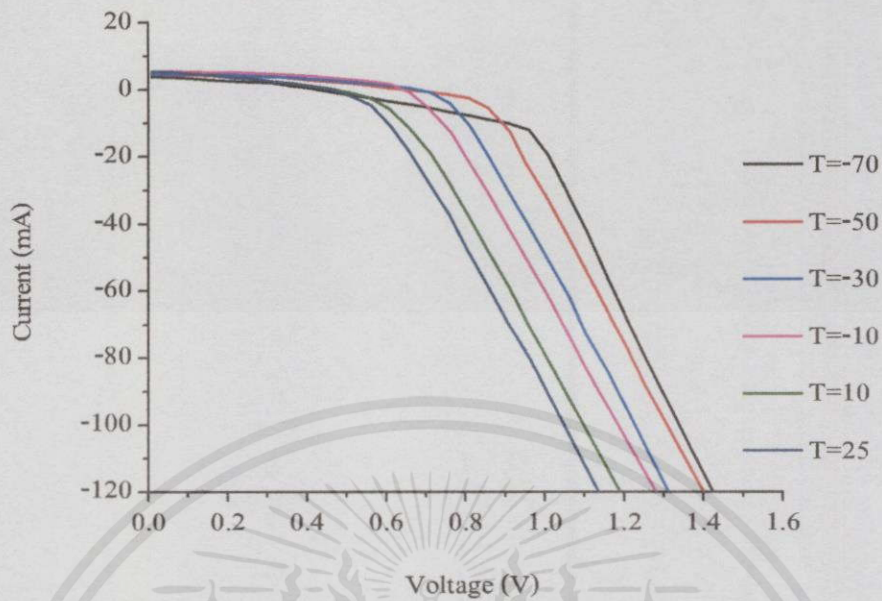


รูปที่ 4.28 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1

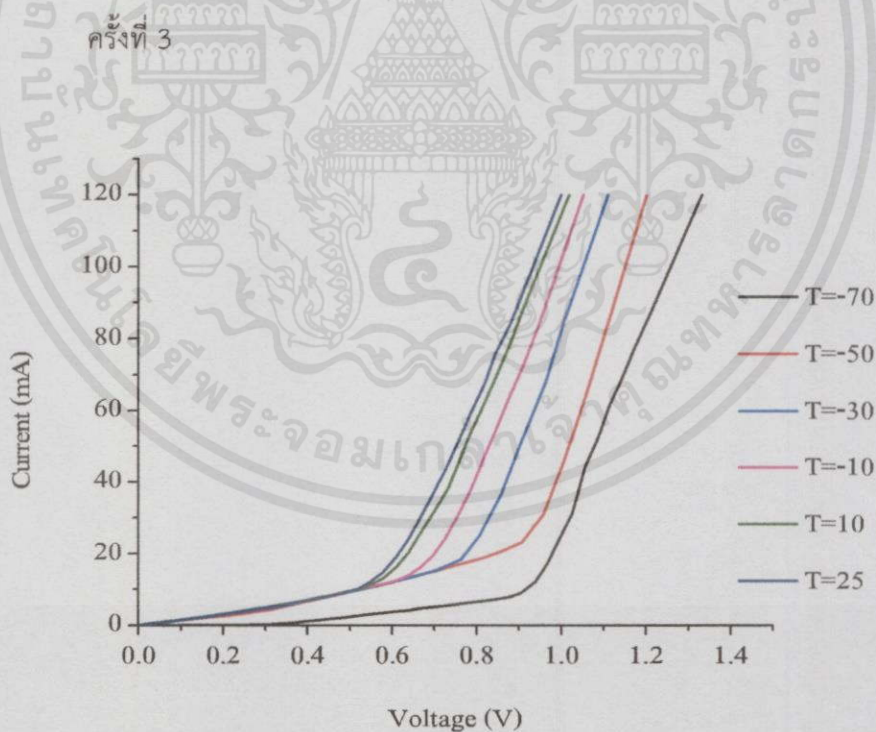


รูปที่ 4.29 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

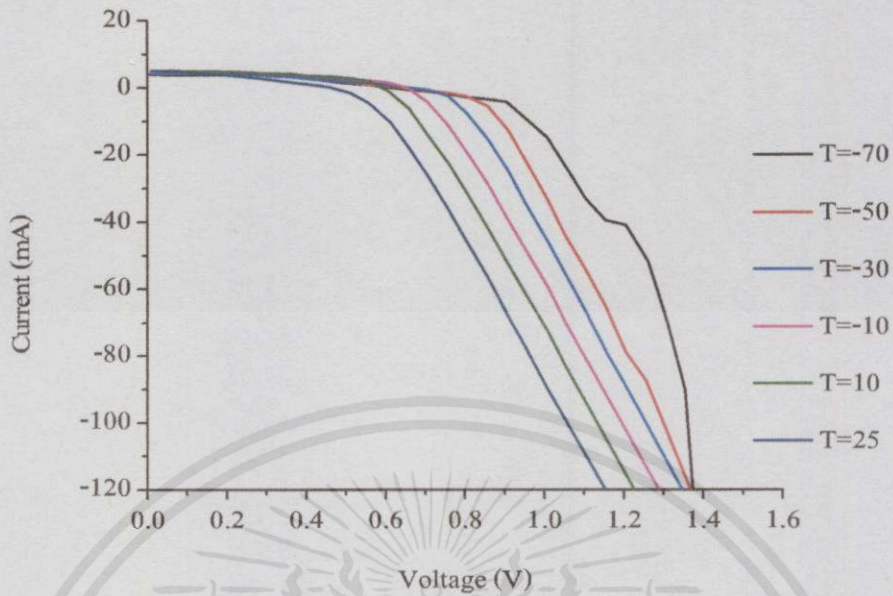


รูปที่ 4.30 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง
ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.31 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



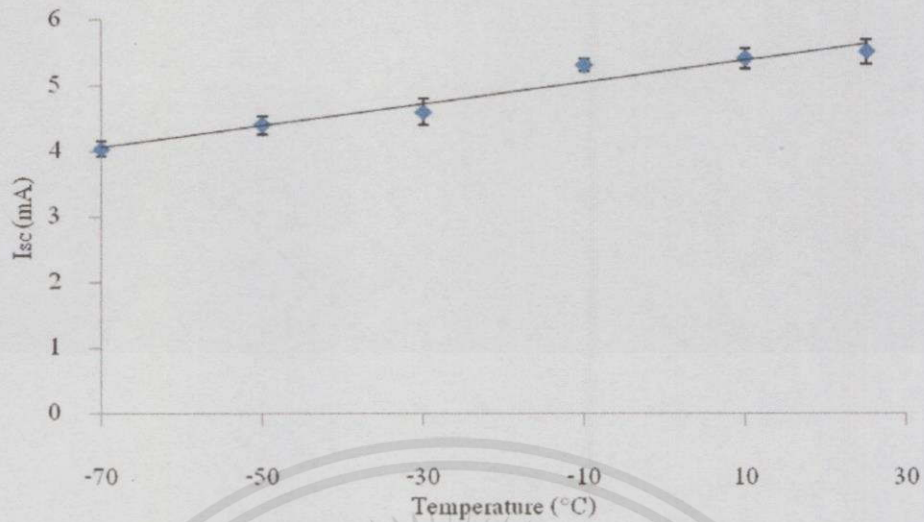
รูปที่ 4.32 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสงครั้งที่ 3

จากกราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ในสภาวะมืดจะถูกนำวิเคราะห์ I_0 และในสภาวะที่ที่เซลล์ได้รับแสงจะถูกนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , R_{sh} และ R_s ซึ่งให้ผลตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้อุณหภูมิต่ำ

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	5.800	5.500	5.120	5.500	0.330	0.200
10	5.620	5.400	5.110	5.400	0.260	0.150
-10	5.300	5.440	5.110	5.300	0.170	0.100
-30	4.900	4.720	4.200	4.600	0.350	0.202
-50	4.580	4.500	4.140	4.400	0.230	0.133
-70	4.260	3.900	4.000	4.040	0.200	0.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



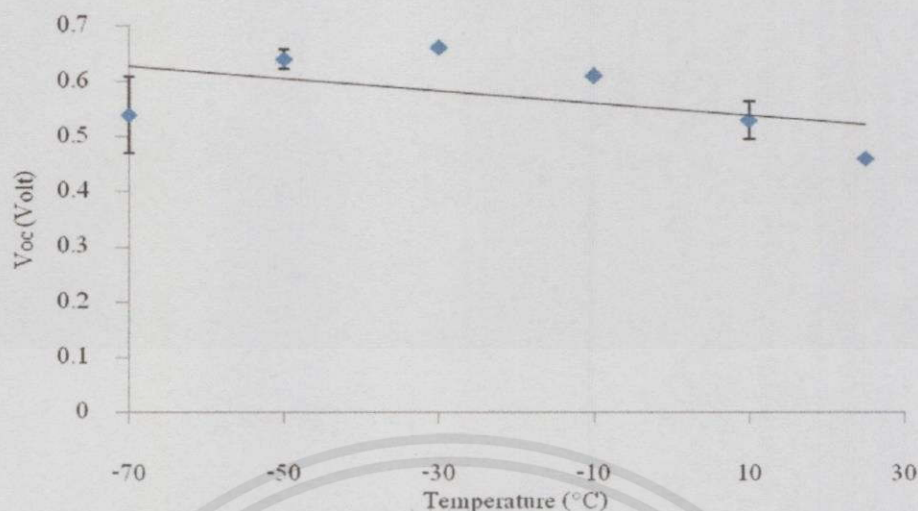
รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรก็มีค่าลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลงอยู่ 46.61%

ตารางที่ 4.16 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ

แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	0.460	0.460	0.460	0.460	0	0
10	0.560	0.460	0.562	0.530	0.060	0.035
-10	0.610	0.610	0.610	0.610	0.002	0.001
-30	0.660	0.660	0.660	0.660	0	0
-50	0.660	0.660	0.610	0.640	0.030	0.020
-70	0.610	0.404	0.610	0.540	0.120	0.070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



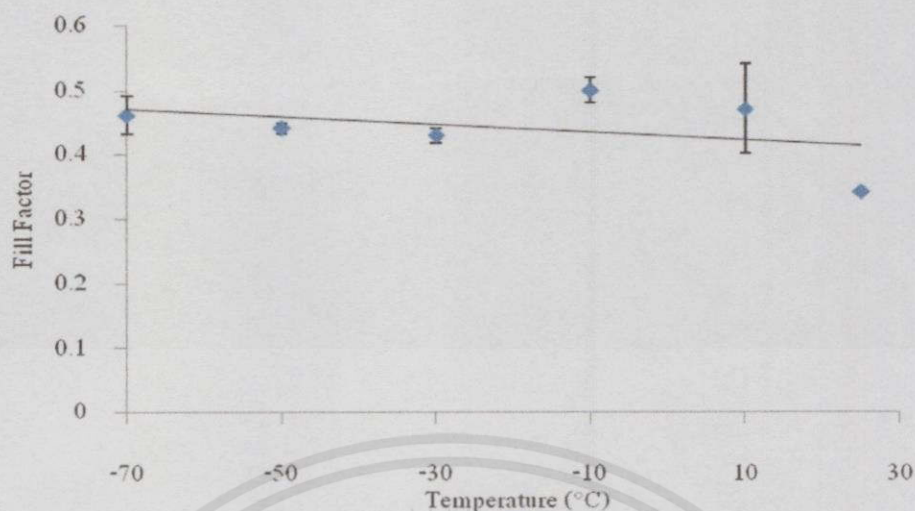
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และลดลงไปที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส โดยมีการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเพิ่มขึ้นอยู่ 17.40%

ตารางที่ 4.17 แสดงผลค่าฟิล์มแพ็คเกจเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	ฟิล์มแพ็คเกจเตอร์				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	0.340	0.350	0.341	0.342	0.006	0.003
10	0.550	0.333	0.533	0.470	0.120	0.070
-10	0.530	0.510	0.460	0.500	0.035	0.021
-30	0.451	0.420	0.422	0.430	0.020	0.012
-50	0.443	0.430	0.455	0.441	0.013	0.007
-70	0.504	0.405	0.480	0.462	0.051	0.030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



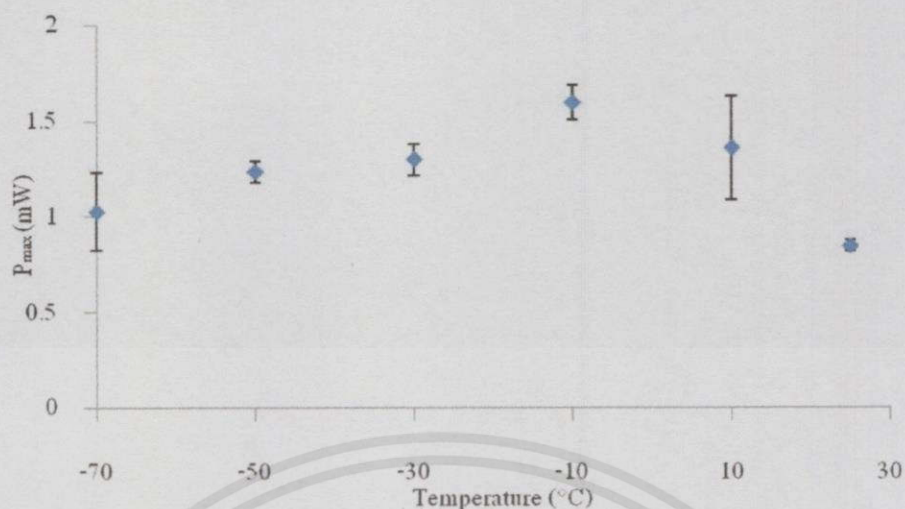
รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ค่าฟิลล์แพกเตอร์จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่เมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งไม่สามารถสรุปได้ว่าฟิลล์แพกเตอร์มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของฟิลล์แพกเตอร์เพิ่มขึ้นอยู่ 35.10% ทั้งนี้เนื่องจากค่าของฟิลล์แพกเตอร์แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

ตารางที่ 4.18 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	0.900	0.880	0.800	0.850	0.053	0.031
10	1.710	0.820	1.530	1.360	0.470	0.271
-10	1.700	1.700	1.430	1.600	0.156	0.100
-30	1.440	1.300	1.160	1.300	0.140	0.080
-50	1.330	1.250	1.140	1.240	0.095	0.055
-70	1.300	0.630	1.150	1.030	0.351	0.203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



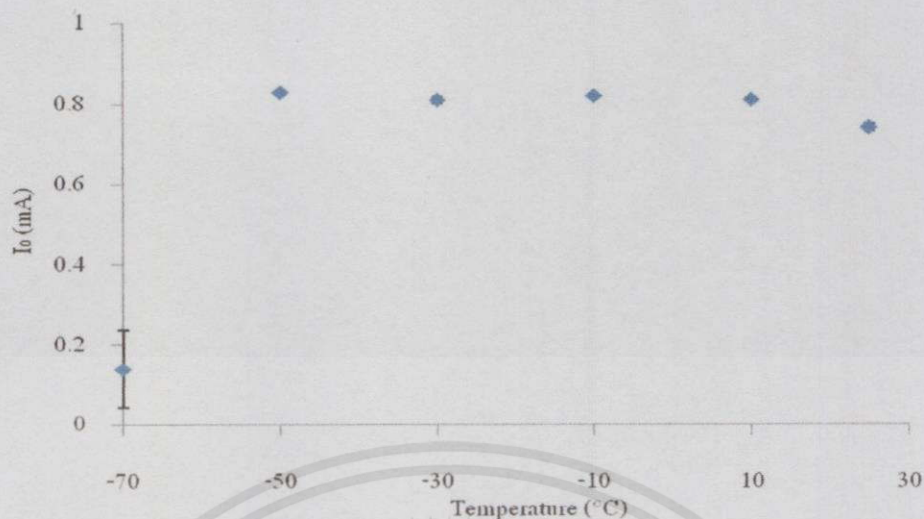
รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดก็เหมือนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง -10 °C และลดลงในช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง -70 °C ซึ่งไม่สามารถดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 21.18%

ตารางที่ 4.19 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	กระแสย้อนอิมิตัว (mA)				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	0.750	0.720	0.740	0.740	0.015	0.009
10	0.810	0.810	0.800	0.810	0.006	0.003
-10	0.820	0.820	0.820	0.820	0	0
-30	0.830	0.800	0.820	0.810	0.015	0.009
-50	0.830	0.820	0.840	0.830	0.01	0.006
-70	0.330	0.043	0.042	0.140	0.166	0.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมิต์กับอุณหภูมิ

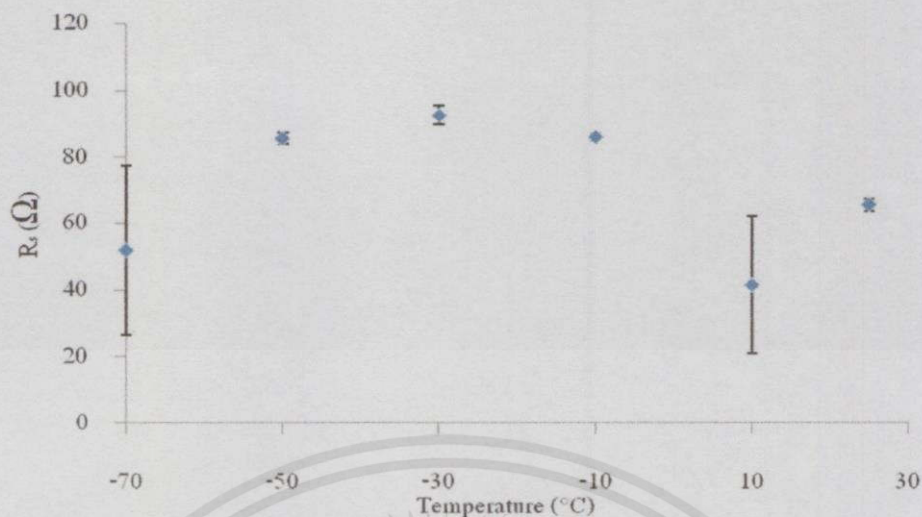
จากรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสย้อนอิมิต์จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งถึง -50 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ามีค่าลดต่ำลงอย่างมาก ทั้งนี้เกิดจากความคลาดเคลื่อนของระบบที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.20 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว

ภายใต้อุณหภูมิต่ำ

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	67.950	62.100	66.700	65.560	3.100	1.800
10	65.970	57.910	0.910	41.600	35.500	20.500
-10	87.260	83.770	87.100	86.040	2.000	1.200
-30	87.414	93.703	96.800	92.631	4.800	2.800
-50	82.980	85.883	88.600	85.812	2.800	1.620
-70	79.460	0.890	75.720	52.023	44.320	25.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



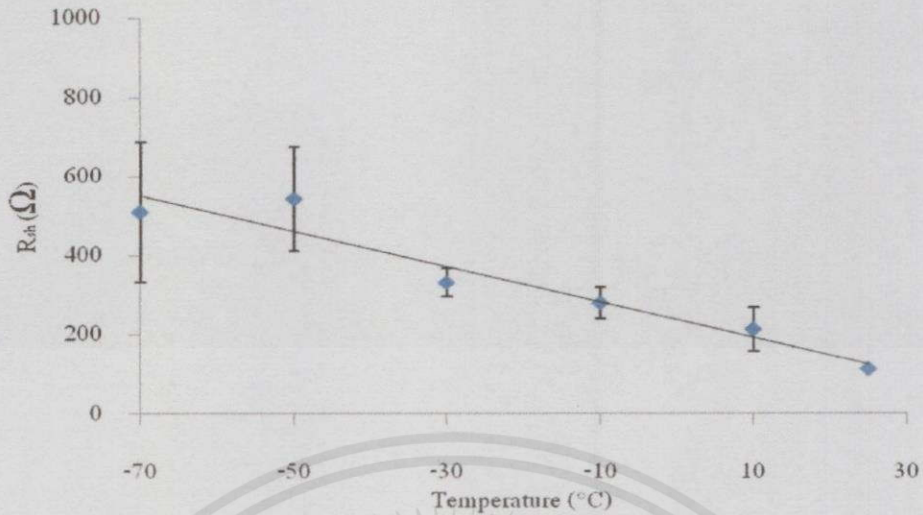
รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานอนุกรมจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ ซึ่งไม่สามารถสรุปได้ว่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นอยู่ 20.65%

ตารางที่ 4.21 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นดีของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

ความต้านทานชั้นดี (Ω)						
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	108.940	111.700	121.920	114.200	6.840	4.000
10	286.140	104.610	250.300	213.680	96.150	55.500
-10	243.320	361.000	239.260	281.200	69.144	40.000
-30	276.560	319.700	401.250	332.500	63.323	36.600
-50	451.900	803.700	374.500	543.400	228.753	132.100
-70	661.440	155.010	715.300	510.600	309.110	178.500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดักกับอุณหภูมิ

จากรูป 4.39 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานชั้นดักจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 และ -70 องศาเซลเซียส จะมีความแตกต่างของความต้านทานชั้นดักเพิ่มขึ้นอยู่ 77.64%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสรุปผลกระทบจากอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์แต่ละตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิด คือ เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและเซลล์อาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสที่ได้ทำการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

- ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และกระแสย้อนอิมิตัว ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและชนิดอะมอร์ฟัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำ
- ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดเปิด กำลังไฟฟ้าสูงสุด ความต้านทานขั้ว และความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวและชนิดอะมอร์ฟัสจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ
- ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง แต่เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ ได้ยกเว้นเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว เป็นผลมาจากในเรื่องของขนาด ซึ่งถ้าหากเราสามารถพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในที่อุณหภูมิต่ำให้สามารถทำการวัดผลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2557. เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์. [Online].
Available : <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm>.
- [2] ดุสิต เครื่องาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน
เล่ม1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] บ้านจอมยุทธ. 2543. เซลล์แสงอาทิตย์. [Online].
Available : http://www.baanjommyut.com/library_2/extension-2/solar_cell/01.html.
- [4] บ้านจอมยุทธ. 2543. เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน. [Online].
Available : http://www.baanjommyut.com/library_2/extension-2/solar_2/solar_cell/04.html.
- [5] สำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์. 2550. Solar Cells. [Online].
Available : <http://www.kanhasolar.com>.
- [6] C. Koch, M. Ito, M. Schubert. 2000. "Low-temperature deposition of amorphous silicon solar cells." Germany : University of Stuttgart. 68(2) : 227-236
- [7] PriyankaSingh , S.N.Singh , M.Lal , M.Husain. 2008. "Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell." India : Department Of Physics Journal. 92(1) : 1611-1616
- [8] Seth Langford. 2550. Solar Power. [Online].
Available : <http://www.kanhasolar.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539484990&Ntype=4>.
- [9] Shenzhen. 2557. Solar Panel. [Online].
Available : <http://www.kanhasolar.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539488981&Ntype=4>.
- [10] Stuart Bowden. 2557. Solar Cells Parameters. [Online].
Available : <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



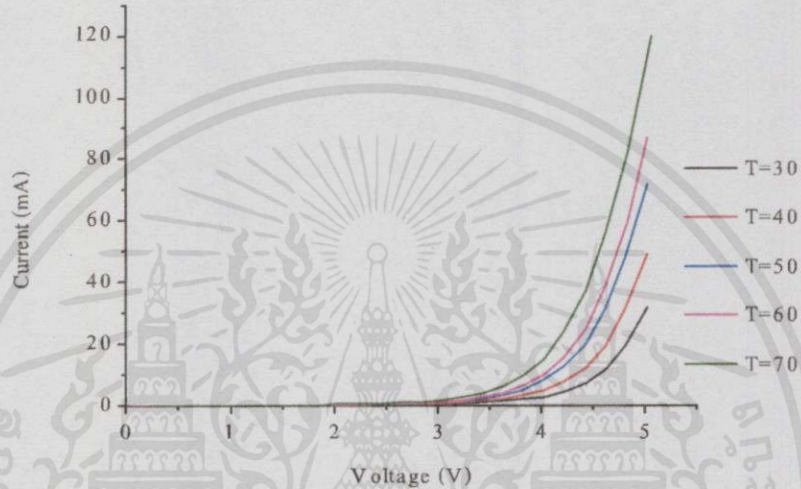
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

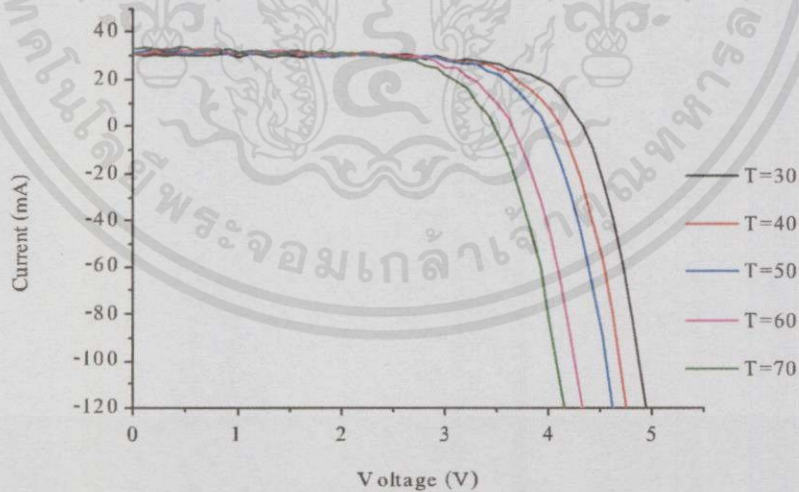
ภาคผนวก ก

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส จะแสดงได้ดังรูป ก.1-ก.6

ครั้งที่ 1



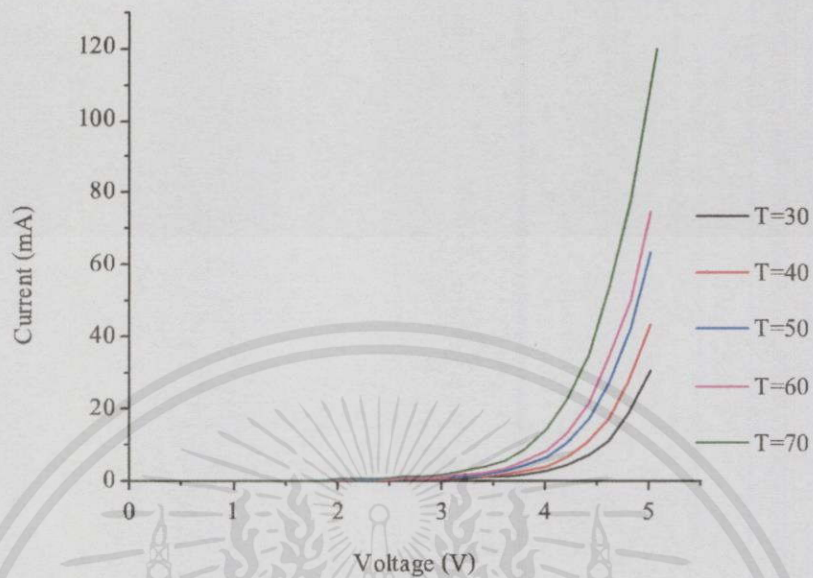
รูปที่ ก.1 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1



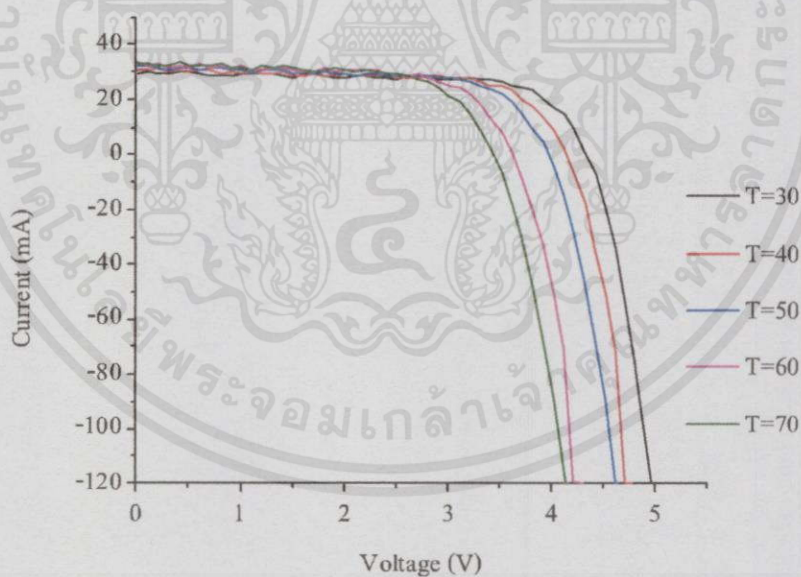
รูปที่ ก.2 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 2



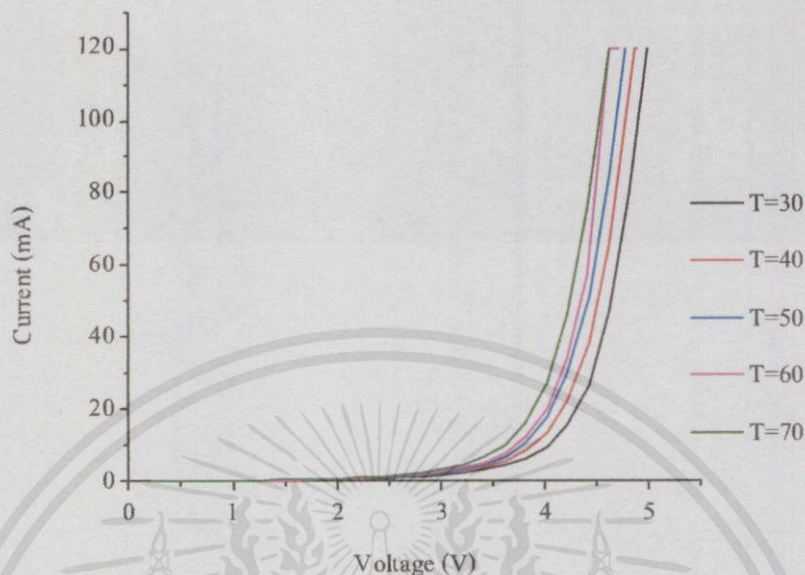
รูปที่ ก.3 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2



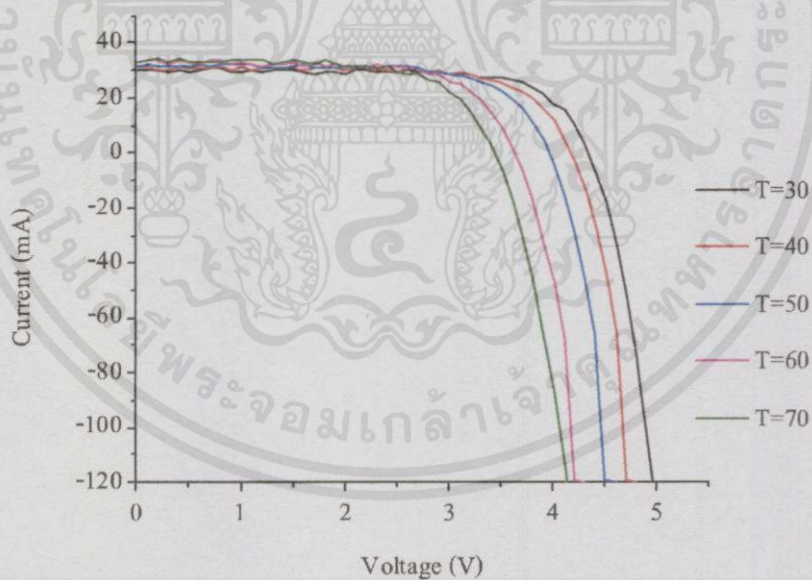
รูปที่ ก.4 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.5 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 3

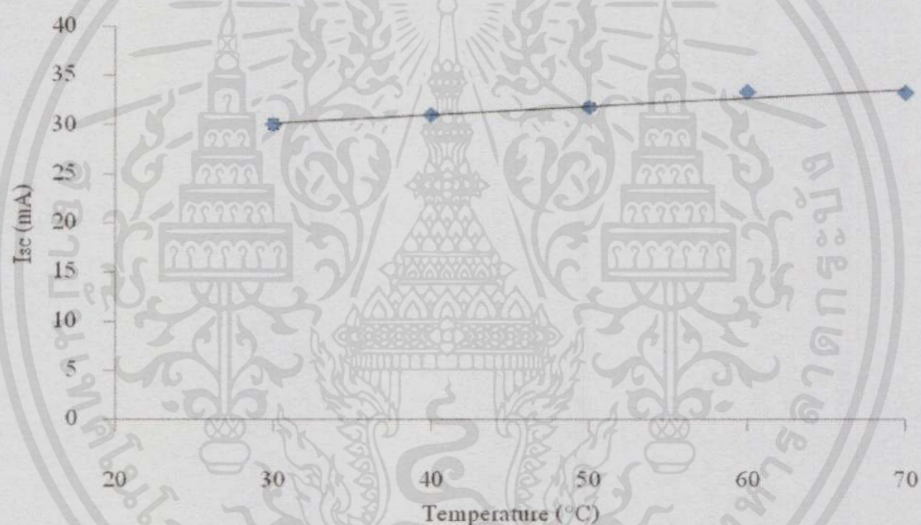


รูปที่ ก.6 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	30.800	29.200	30.400	30.100	0.833	0.481
40	31.000	30.700	31.500	31.000	0.404	0.233
50	31.500	32.400	31.600	31.800	0.500	0.290
60	33.200	33.600	33.200	33.300	0.231	0.133
70	33.300	33.000	33.200	33.200	0.153	0.090

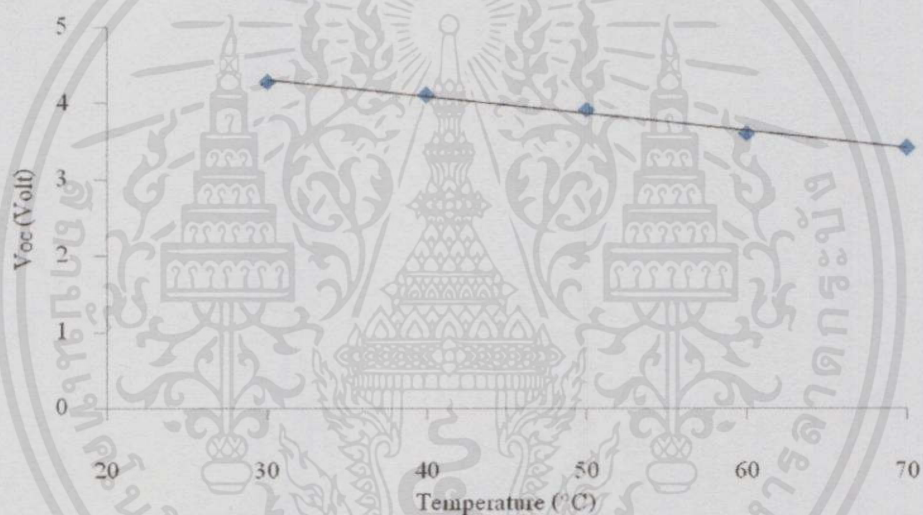


รูปที่ ก.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

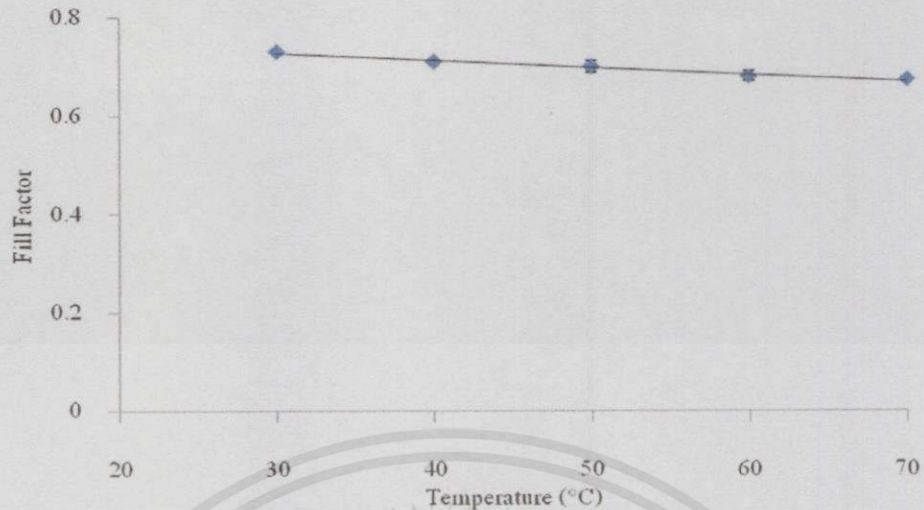
แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	4.211	4.311	4.305	4.280	0.056	0.032
40	4.111	4.113	4.110	4.111	0.002	0.001
50	3.912	3.912	3.912	3.912	5.440E-16	3.140E-16
60	3.610	3.613	3.610	3.611	0.002	0.001
70	3.414	3.412	3.412	3.413	0.001	0.001



รูปที่ ก.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจเปิดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.3 แสดงผลค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

ฟิลล์แฟกเตอร์						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	0.722	0.740	0.734	0.731	0.010	0.006
40	0.703	0.710	0.711	0.710	0.004	0.0023
50	0.7030	0.670	0.710	0.700	0.021	0.012
60	0.685	0.660	0.693	0.680	0.017	0.001
70	0.673	0.670	0.680	0.673	0.005	0.003

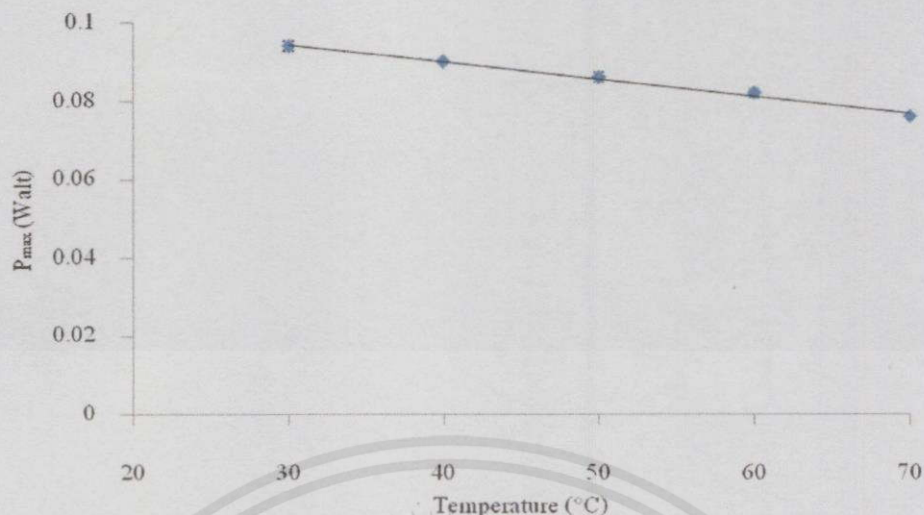


รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.4 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิสูง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Watt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	0.094	0.093	0.096	0.094	0.002	0.001
40	0.090	0.090	0.092	0.090	0.001	0
50	0.087	0.084	0.088	0.086	0.002	0.001
60	0.082	0.080	0.083	0.082	0.002	0.001
70	0.077	0.075	0.0771	0.076	0.001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

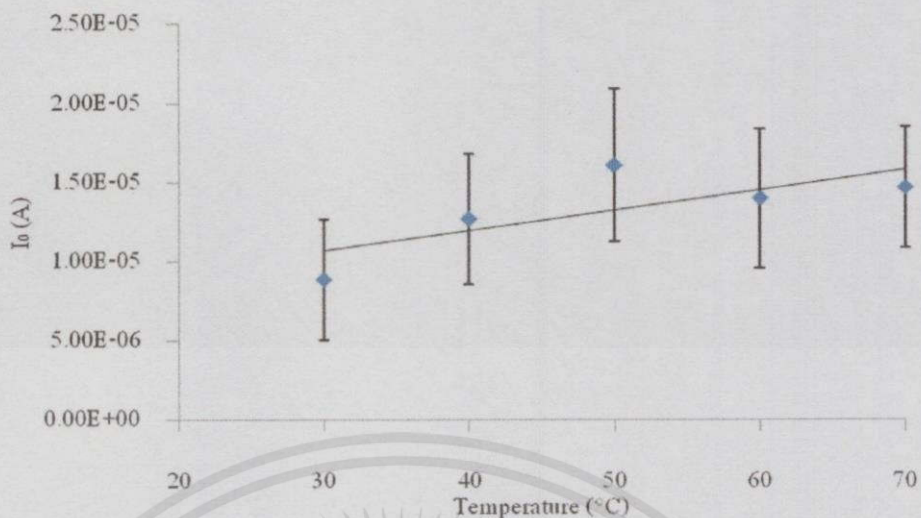


รูปที่ ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.5 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิสูง

กระแสย้อนอิมิตัว (A)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	6.010E-06	4.120E-06	1.640E-05	8.900E-06	6.612E-06	3.820E-06
40	4.710E-06	1.700E-05	1.700E-05	1.270E-05	7.100E-06	4.100E-06
50	2.100E-05	6.500E-06	2.100E-05	1.610E-05	8.400E-06	4.850E-06
60	9.340E-06	9.880E-06	2.270E-05	1.400E-05	7.600E-06	4.400E-06
70	1.020E-05	1.150E-05	2.230E-05	1.470E-05	6.643E-06	3.840E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

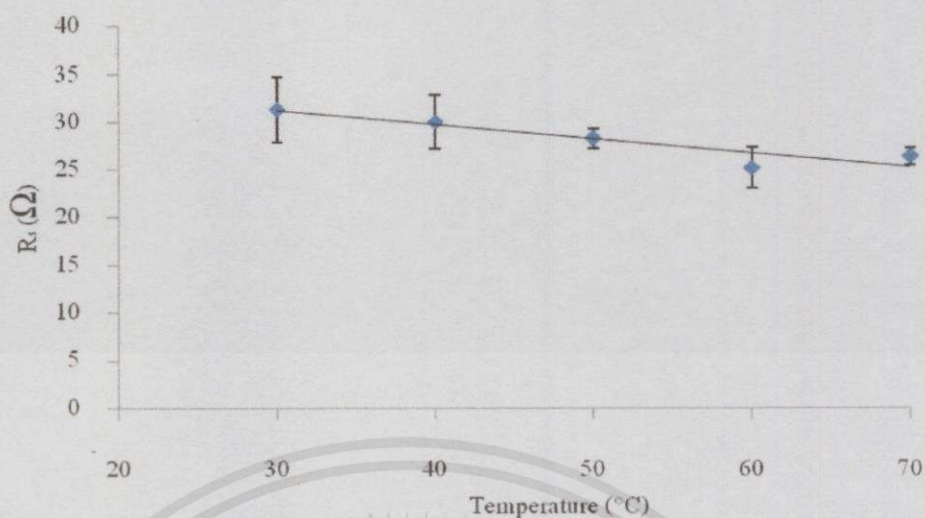


รูปที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.6 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิสูง

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	37.200	31.500	25.250	31.313	6.000	3.500
40	25.181	34.900	30.061	30.040	4.860	2.810
50	26.200	29.224	29.300	28.240	1.770	1.022
60	29.000	24.900	21.664	25.180	3.700	2.140
70	28.070	25.460	25.430	26.320	1.520	0.900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

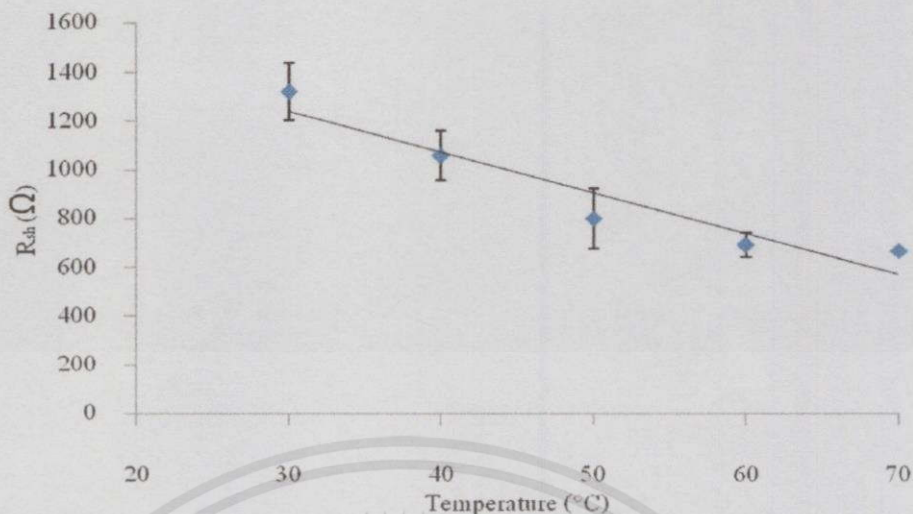


รูปที่ ก.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.7 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิสูง

ความต้านทานชั้น						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	1529.700	1123.700	1315.120	1322.832	203.110	117.300
40	906.200	1027.601	1248.850	1060.900	173.730	100.300
50	678.003	675.900	1047.823	800.600	214.130	123.630
60	782.424	679.270	611.930	691.210	85.900	50.000
70	669.100	682.431	653.441	668.320	14.510	8.400

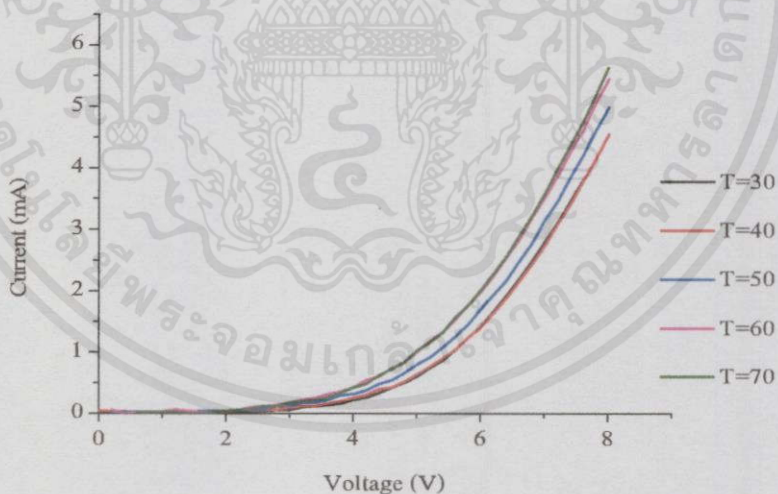
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดักกับอุณหภูมิ

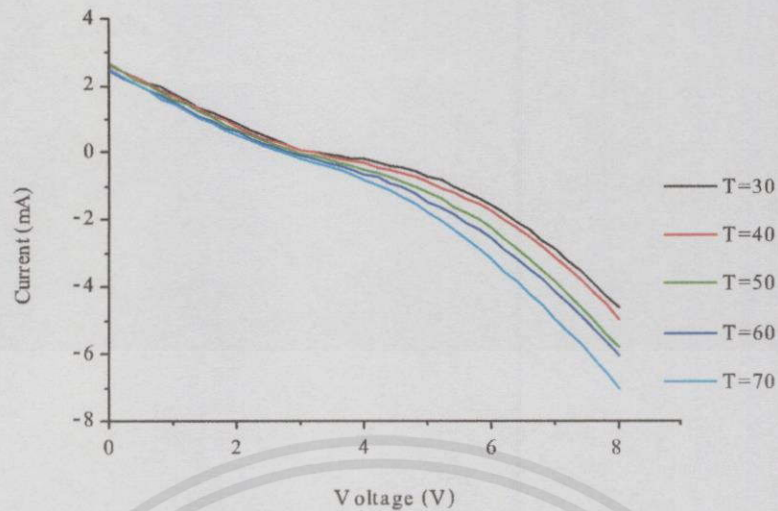
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิส โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส จะแสดงได้ดังรูป ก.14-ก.19

ครั้งที่ 1



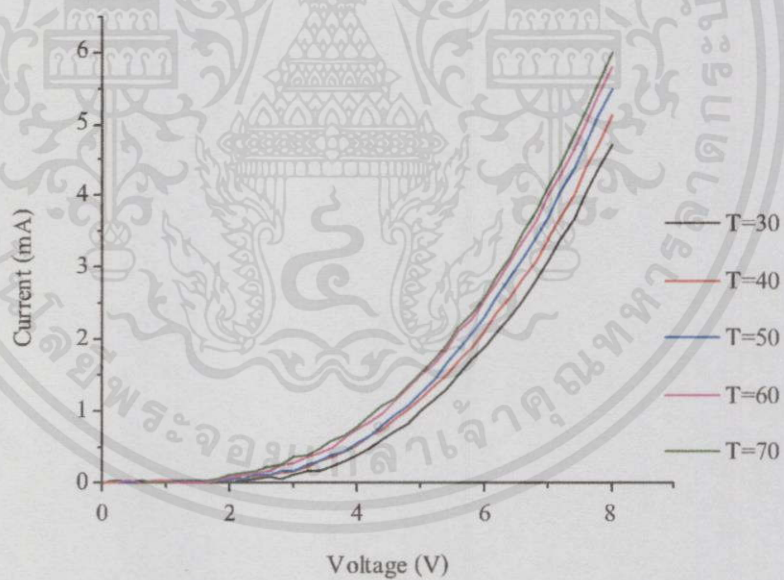
รูปที่ ก.14 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิสในสภาวะมืด ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



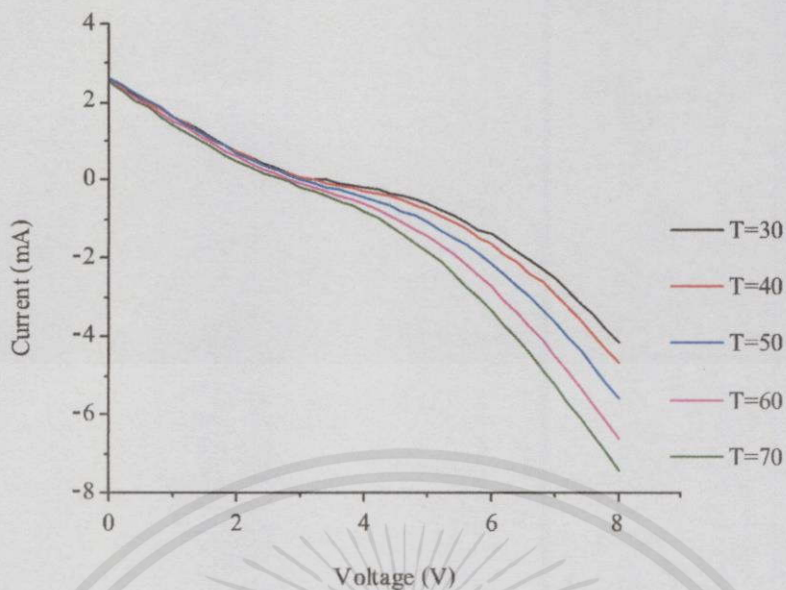
รูปที่ ก.15 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2

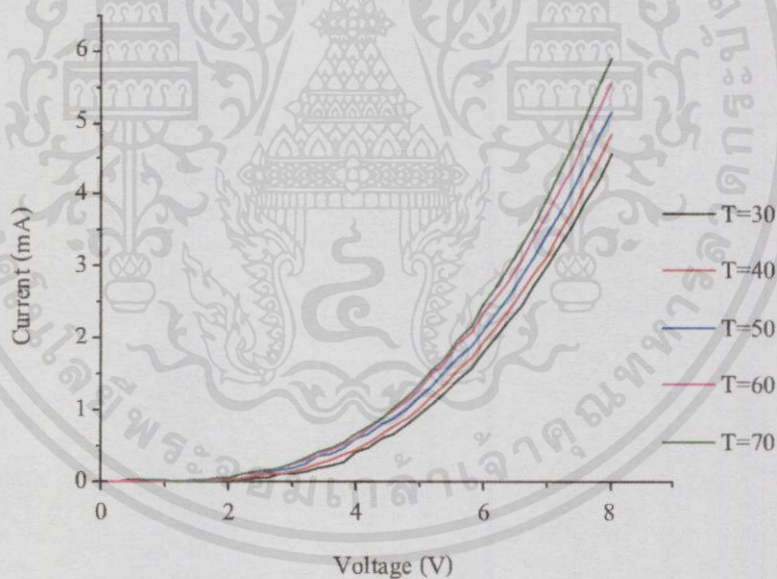


รูปที่ ก.16 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

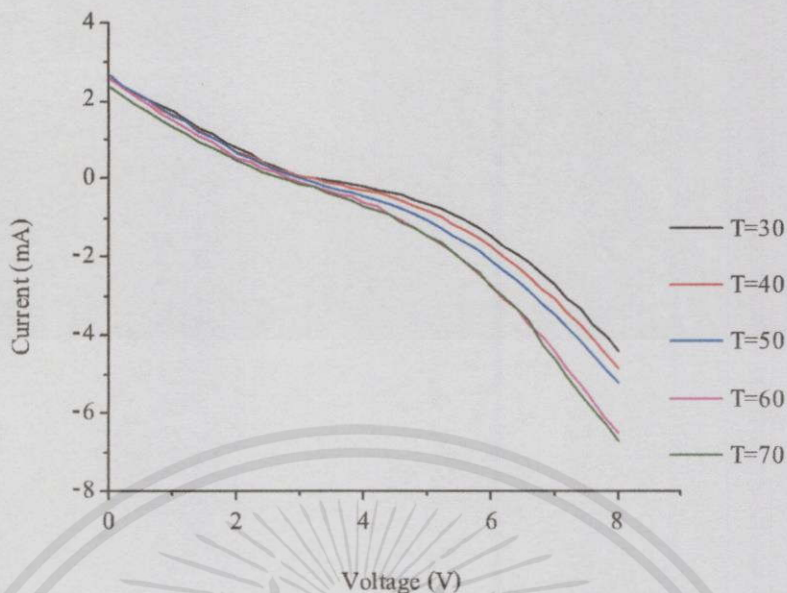


รูปที่ ก.17 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2 ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.18 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะมืด ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

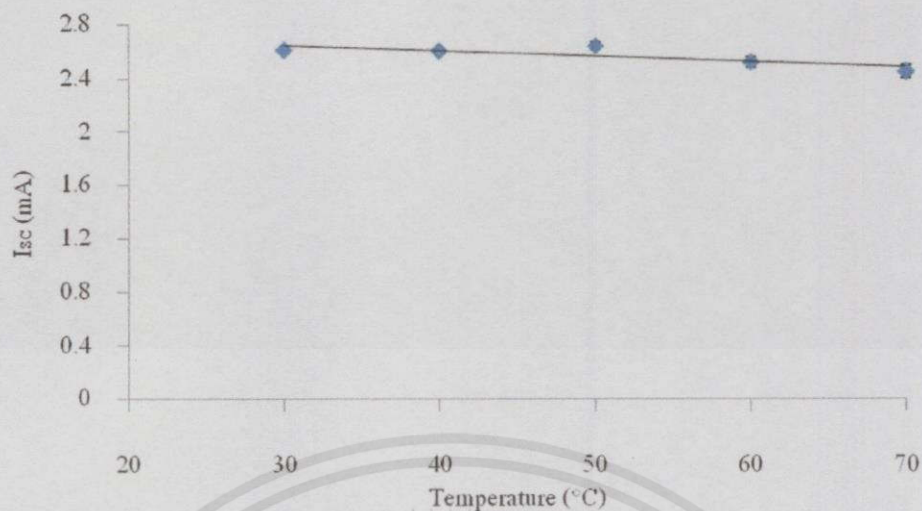


รูปที่ ก.19 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3

ตารางที่ ก.8 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้ อุณหภูมิสูง

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	2.640	2.600	2.620	2.610	0.020	0.012
40	2.600	2.560	2.600	2.600	0.023	0.013
50	2.700	2.620	2.640	2.640	0.042	0.024
60	2.440	2.560	2.560	2.520	0.070	0.040
70	2.500	2.500	2.360	2.450	0.081	0.047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

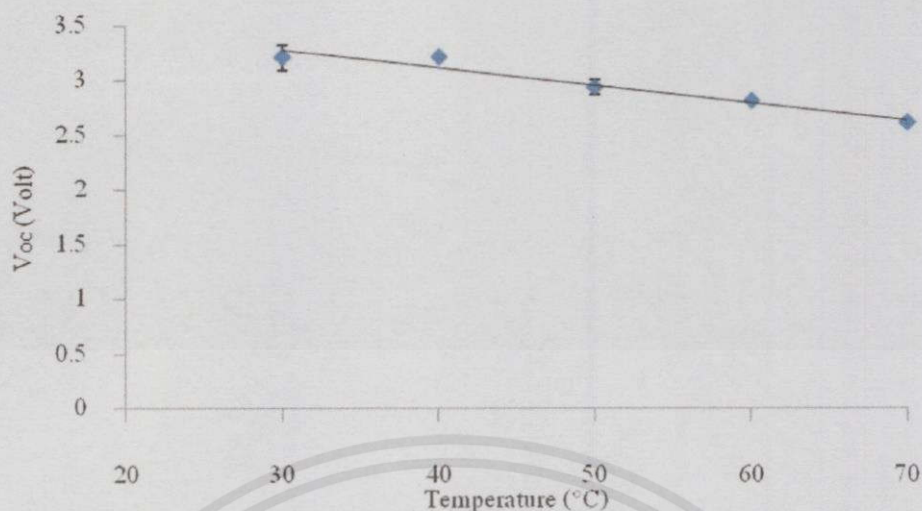


รูปที่ ก.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.9 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้
อุณหภูมิสูง

แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	3.010	3.410	3.211	3.210	0.200	0.115
40	3.210	3.210	3.210	3.210	5.44E-16	3.141E-16
50	2.810	3.010	3.010	2.941	0.120	0.070
60	2.820	2.804	2.810	2.810	0.008	0.005
70	2.610	2.610	2.610	2.610	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

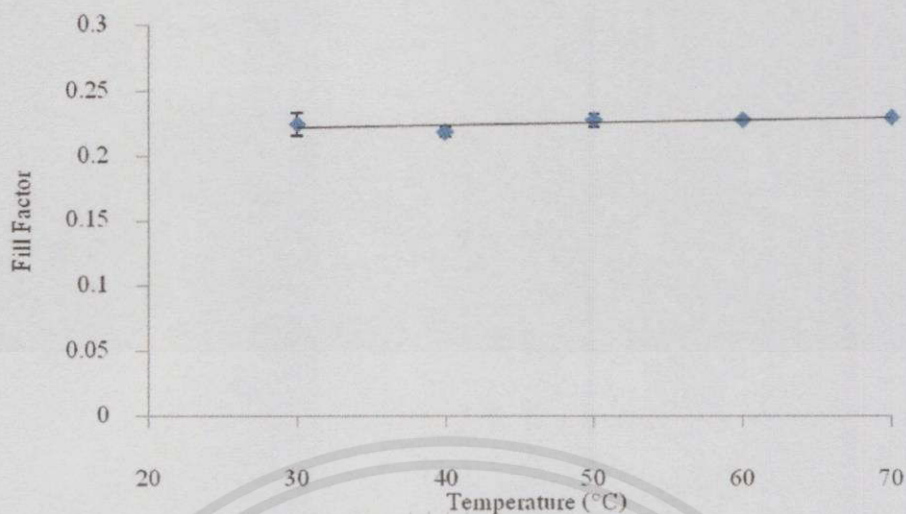


รูปที่ ก.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.10 แสดงผลค่าฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟิสภายใต้
อุณหภูมิสูง

ฟิลล์แพกเตอร์						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	0.244	0.207	0.221	0.224	0.0153	0.009
40	0.226	0.216	0.213	0.218	0.006	0.003
50	0.240	0.222	0.220	0.227	0.009	0.005
60	0.230	0.230	0.223	0.228	0.004	0.002
70	0.233	0.230	0.225	0.229	0.003	0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

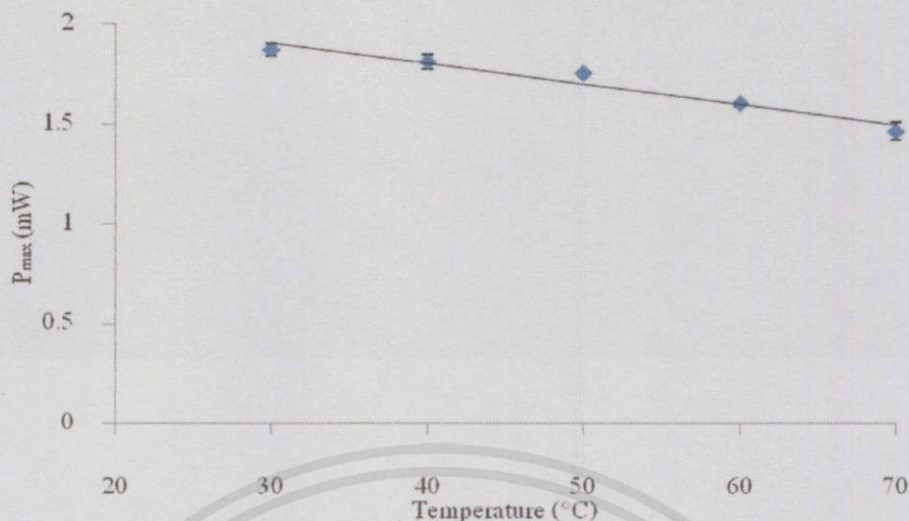


รูปที่ ก.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.11 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้
อุณหภูมิสูง

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
30	1.930	1.820	1.860	1.870	0.056	0.032
40	1.880	1.770	1.770	1.810	0.064	0.037
50	1.760	1.740	1.740	1.750	0.012	0.007
60	1.580	1.620	1.600	1.600	0.0200	0.012
70	1.520	1.500	1.380	1.463	0.076	0.044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

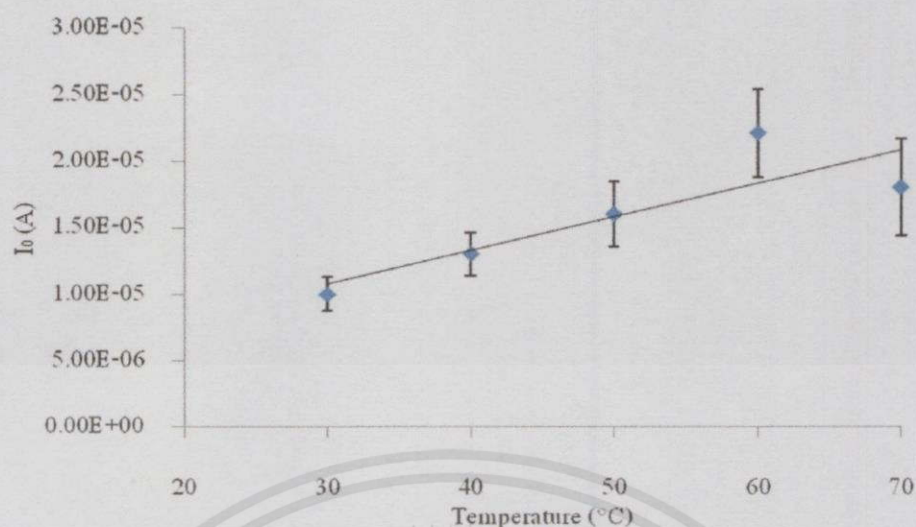


รูปที่ ก.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.12 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้ อุณหภูมิสูง

อุณหภูมิ (°C)	กระแสย้อนอิมิตัว (A)					Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
30	7.440E-06	1.12E-05	1.140E-05	1.000E-05	2.231E-06	1.300E-06
40	9.700E-06	1.50E-05	1.400E-05	1.300E-05	2.820E-06	1.630E-06
50	1.110E-05	1.760E-05	1.910E-05	1.600E-05	4.252E-06	2.450E-06
60	1.600E-05	2.730E-05	2.310E-05	2.210E-05	5.711E-06	3.300E-06
70	1.100E-05	2.340E-05	1.930E-05	1.800E-05	6.320E-06	3.650E-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

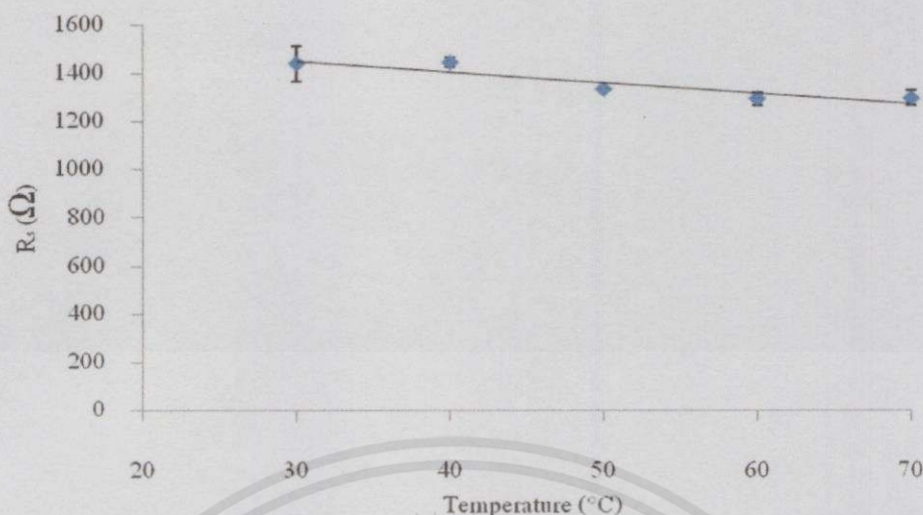


รูปที่ ก.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.13 แสดงผลค่าความต้านทานชั้นตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้
อุณหภูมิสูง

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	1325.120	1577.340	1421.161	1441.210	127.300	73.500
40	1406.950	1453.070	1478.284	1446.100	36.200	21.000
50	1335.100	1344.450	1326.200	1335.244	9.1300	5.300
60	1343.851	1260.732	1271.941	1292.180	45.103	26.040
70	1243.040	1295.622	1349.582	1296.081	53.273	31.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

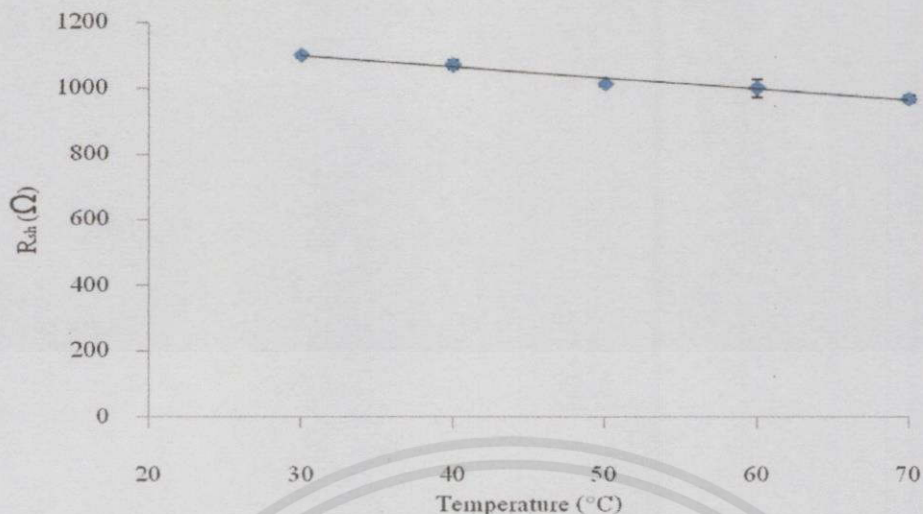


รูปที่ ก.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.14 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสภายใต้ อุณหภูมิสูง

ความต้านทานขั้ว (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
30	1116.110	1084.870	1099.324	1100.101	15.634	9.030
40	1096.300	1064.770	1050.730	1070.600	23.340	13.500
50	1024.800	1007.010	1005.200	1012.332	10.831	6.300
60	1055.800	974.090	969.340	999.743	48.605	28.062
70	957.543	957.423	987.480	967.482	17.320	10.000

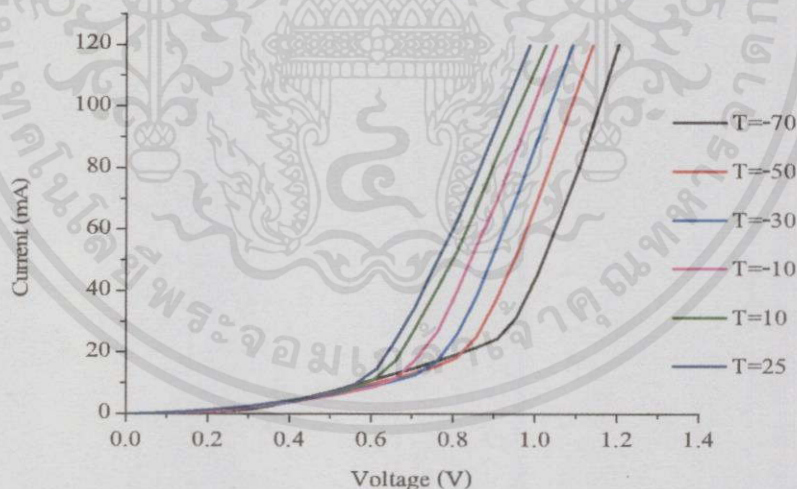
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดักกับอุณหภูมิ

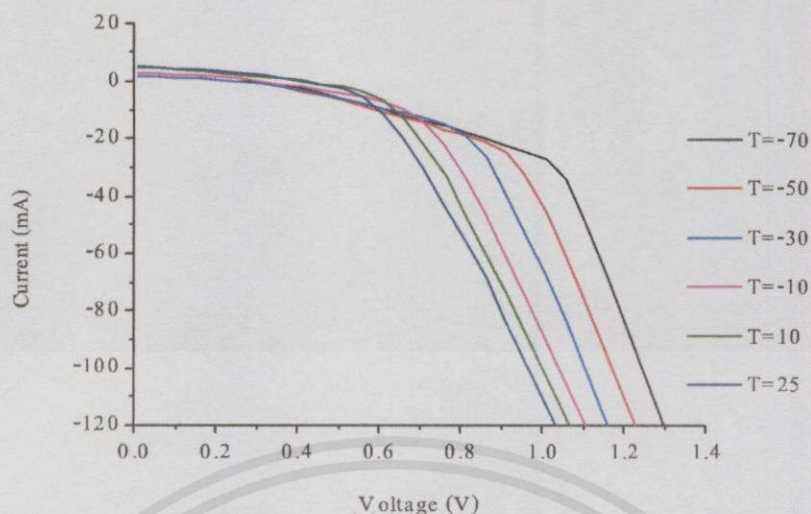
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ตั้งแต่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ถึง 25 องศาเซลเซียส จะแสดงได้ดังรูปที่

ครั้งที่ 1



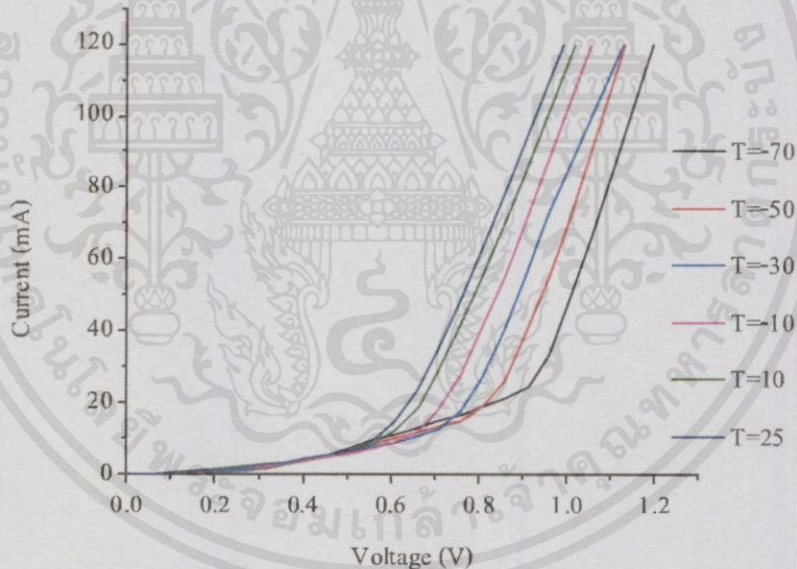
รูปที่ ก.27 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



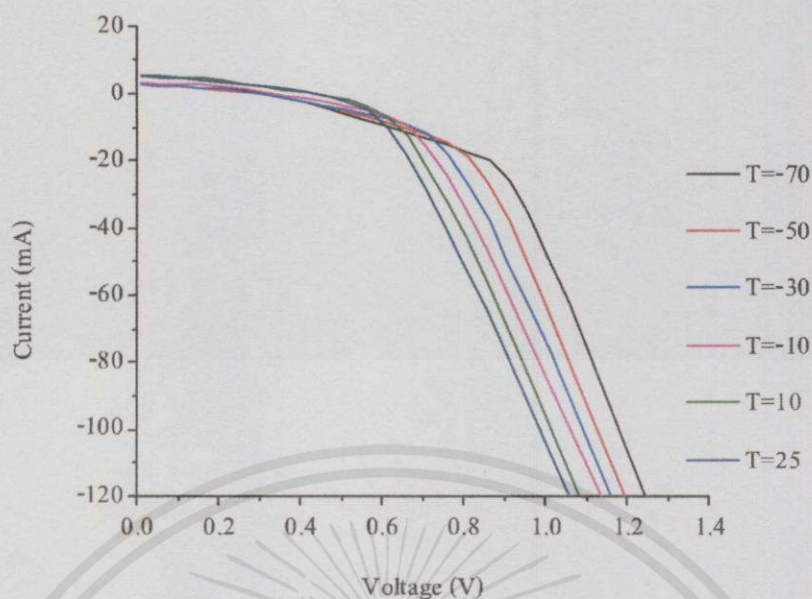
รูปที่ ก.28 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2



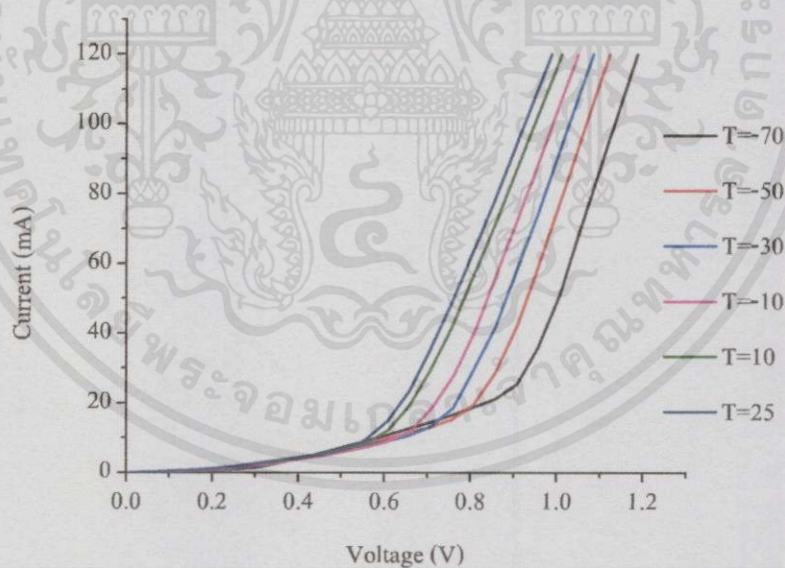
รูปที่ ก.29 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



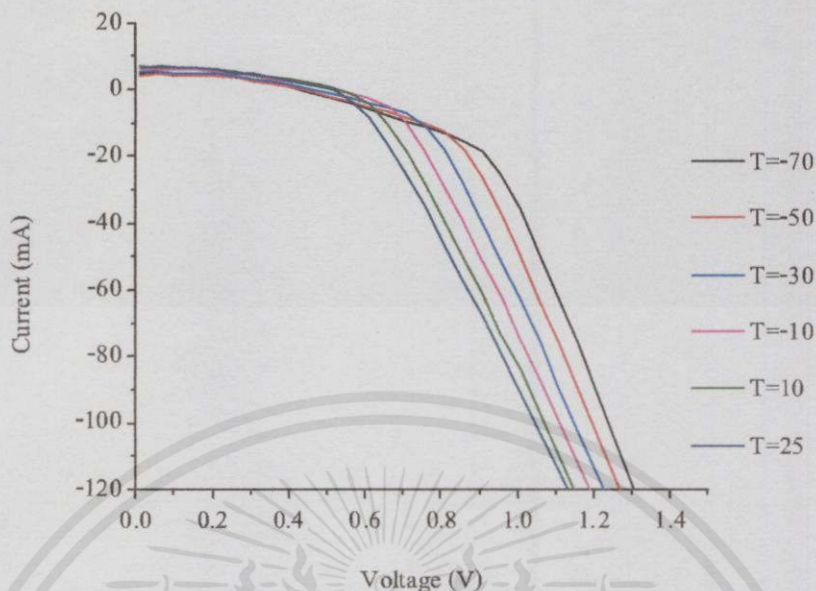
รูปที่ ก.30 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3



รูปที่ ก.31 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะมืด ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



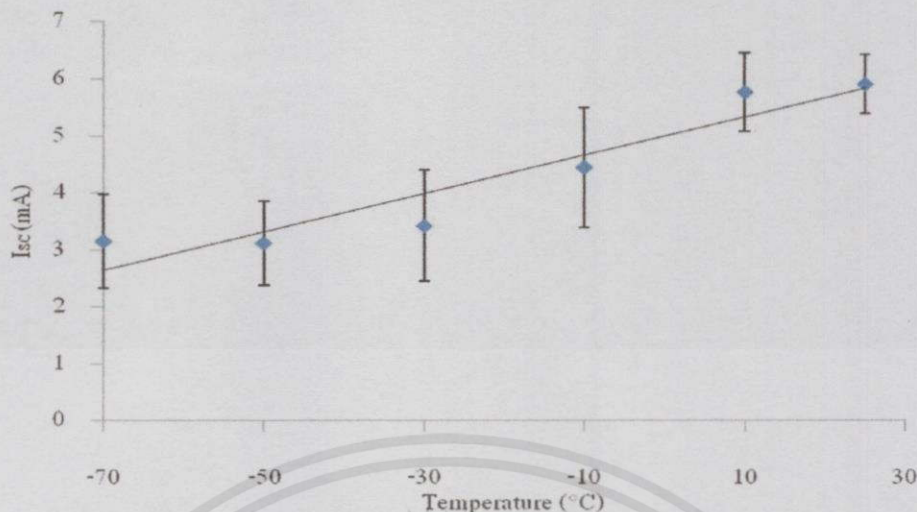
รูปที่ ก.32 กราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวในสภาวะที่มีแสง ครั้งที่ 3

จากกราฟ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว ในสภาวะมืดจะถูกนำวิเคราะห์ I_0 และในสภาวะที่ที่เซลล์ได้รับแสงจะถูกนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , R_{sh} และ R_s ซึ่งให้ผลตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.15 แสดงผลค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)					ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย			
25	5.320	5.420	6.900	5.900	0.885	0.511	
10	4.840	5.320	7.100	5.760	1.200	0.700	
-10	3.060	3.740	6.520	4.440	1.833	1.060	
-30	2.020	2.940	5.280	3.420	1.681	0.970	
-50	2.040	2.780	4.530	3.120	1.280	0.740	
-70	1.900	2.820	4.720	3.150	1.440	0.830	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

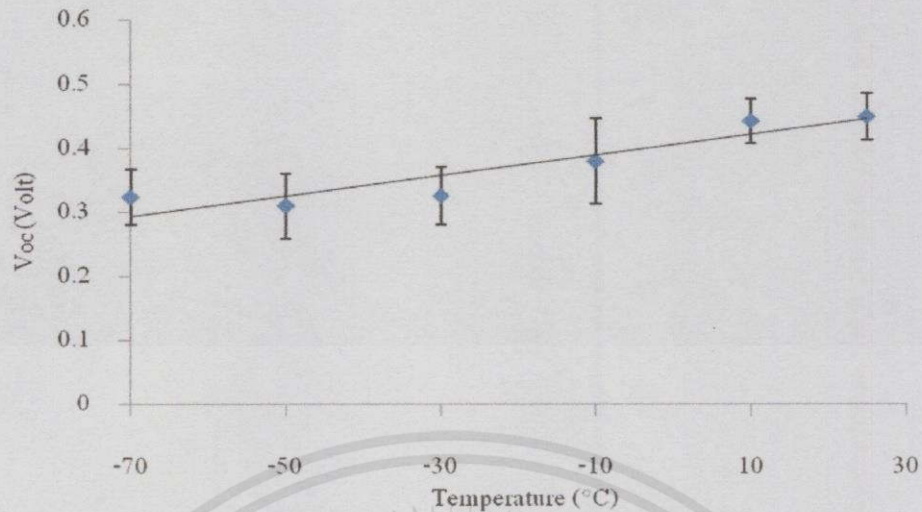


รูปที่ ก.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.16 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Volt)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	0.410	0.411	0.520	0.450	0.063	0.036
10	0.407	0.410	0.510	0.443	0.060	0.035
-10	0.310	0.308	0.508	0.380	0.115	0.066
-30	0.260	0.308	0.410	0.326	0.077	0.044
-50	0.258	0.260	0.411	0.310	0.088	0.050
-70	0.258	0.310	0.405	0.324	0.075	0.043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

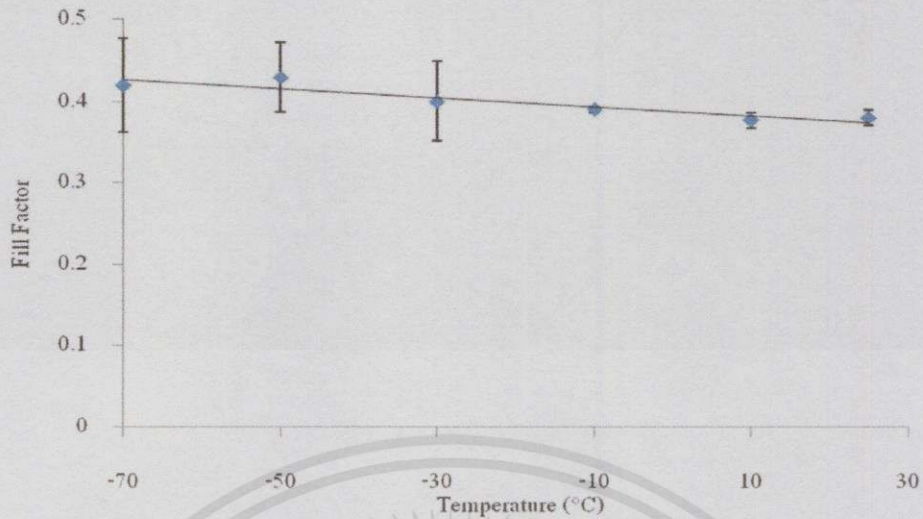


รูปที่ ก.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.17 แสดงผลค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิต่ำ

ฟิลล์แฟกเตอร์						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
25	0.370	0.374	0.400	0.3800	0.016	0.010
10	0.360	0.390	0.386	0.377	0.016	0.010
-10	0.383	0.395	0.386	0.390	0.006	0.003
-30	0.328	0.378	0.491	0.400	0.084	0.050
-50	0.354	0.433	0.500	0.430	0.073	0.042
-70	0.330	0.395	0.524	0.420	0.100	0.060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

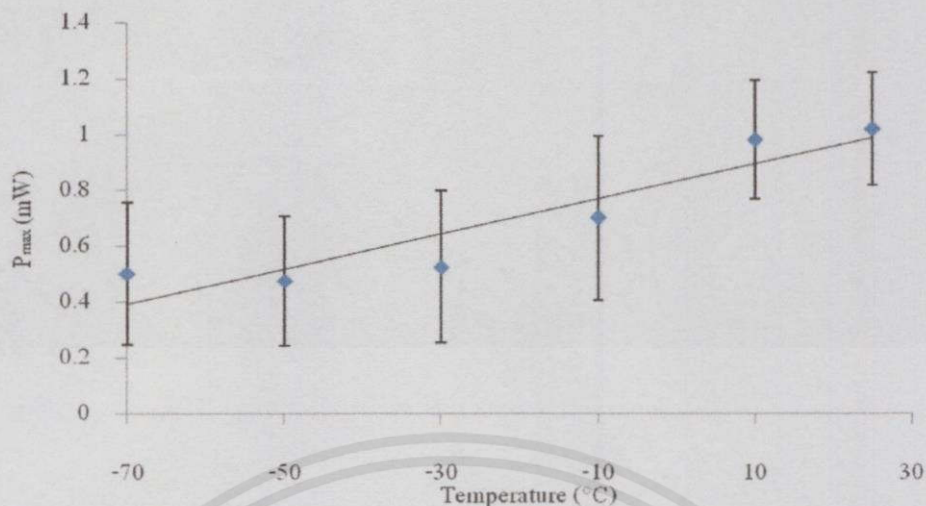


รูปที่ ก.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์กับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.18 แสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (mW)				ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
25	0.800	0.834	1.420	1.020	0.350	0.202
10	0.705	0.840	1.400	0.980	0.370	0.214
-10	0.362	0.456	1.280	0.700	0.510	0.300
-30	0.172	0.342	1.061	0.525	0.472	0.273
-50	0.190	0.312	0.926	0.475	0.400	0.231
-70	0.161	0.344	1.000	0.502	0.442	0.260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

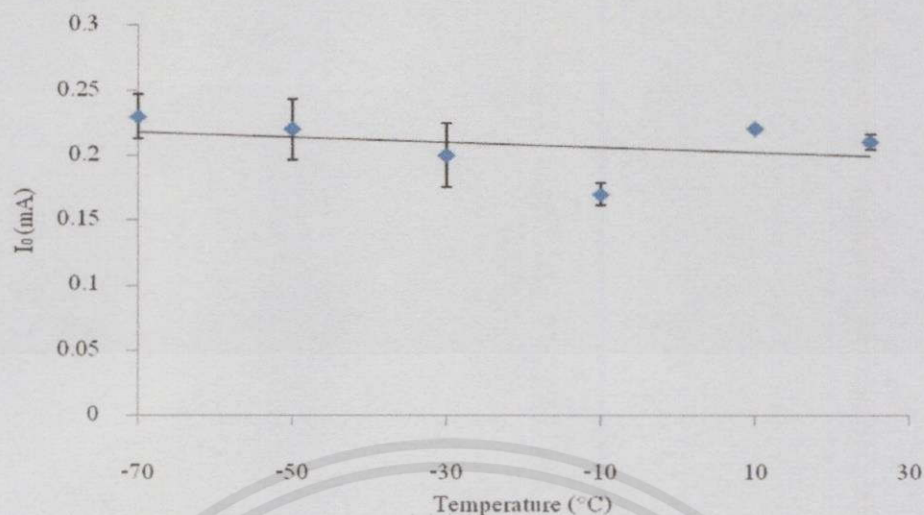


รูปที่ ก.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.19 แสดงผลค่ากระแสย้อนอิมิตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	กระแสอิมิตัว (mA)			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
25	0.220	0.210	0.200	0.210	0.01	0.006
10	0.220	0.220	0.220	0.220	0	0
-10	0.180	0.170	0.150	0.170	0.015	0.009
-30	0.240	0.160	0.180	0.200	0.042	0.024
-50	0.210	0.270	0.200	0.220	0.040	0.023
-70	0.260	0.210	0.210	0.230	0.030	0.017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

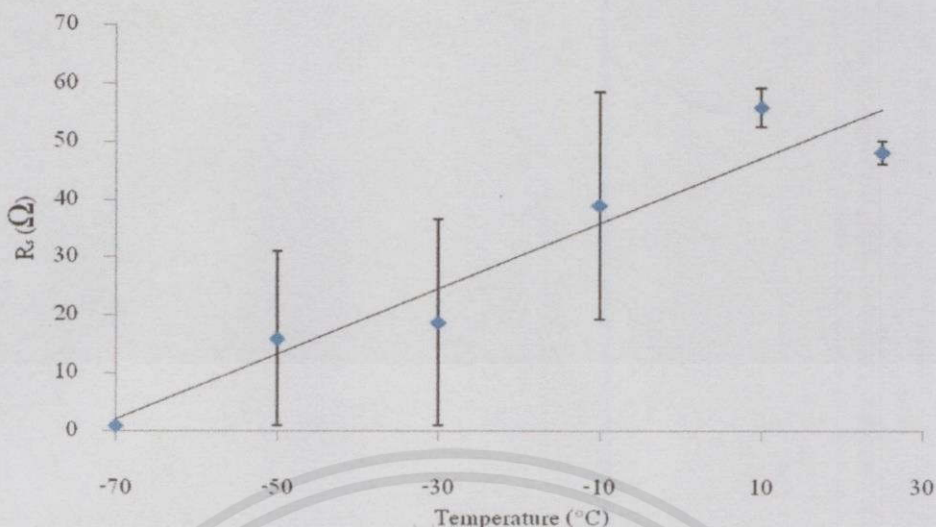


รูปที่ ก.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสย้อนอิมตัวกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ก.20 แสดงผลค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้ อุณหภูมิต่ำ

ความต้านทานอนุกรม (Ω)						
อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Standard Error
25	49.800	50.263	44.044	48.024	3.465	2.000
10	62.500	51.564	53.650	55.904	5.810	3.400
-10	66.720	0.838	49.231	38.930	34.130	19.700
-30	0.805	0.861	54.285	18.650	30.861	17.820
-50	0.808	0.800	46.000	15.863	26.100	15.100
-70	0.801	0.832	0.880	0.837	0.040	0.023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

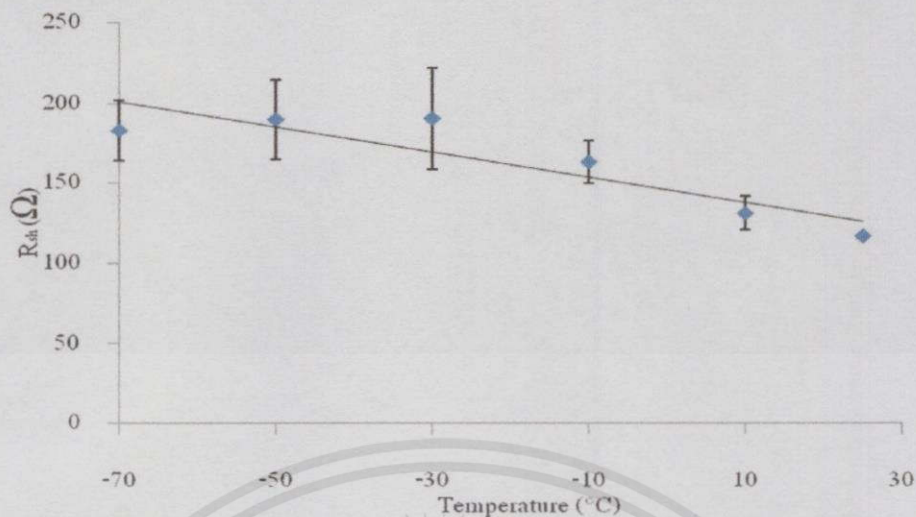


รูปที่ ก.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมกับอุณหภูมิ

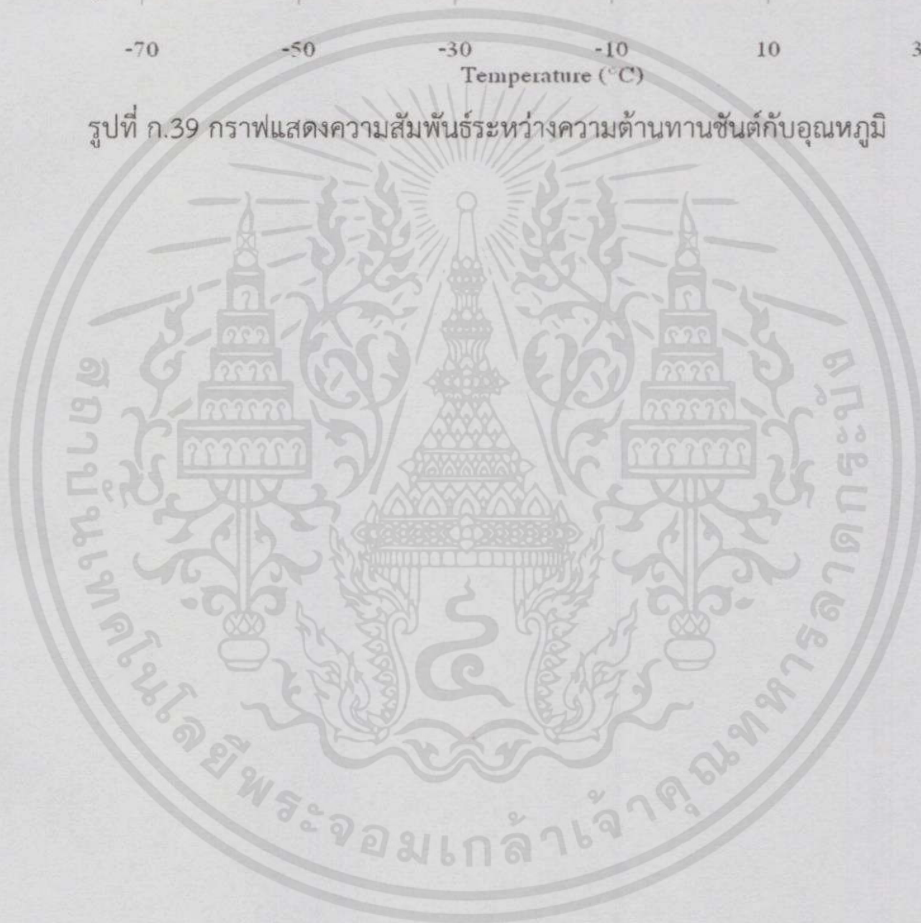
ตารางที่ ก.21 แสดงผลค่าความต้านทานชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยวภายใต้
อุณหภูมิต่ำ

ความต้านทานชนิด (Ω)						
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Standard Error
25	115.650	115.113	118.820	116.530	2.003	1.160
10	119.230	121.672	152.353	131.084	18.460	10.700
-10	184.480	138.403	166.390	163.090	23.215	13.400
-30	162.580	154.901	253.350	190.280	54.800	13.640
-50	171.304	158.263	239.312	189.630	43.520	25.130
-70	165.330	163.410	221.160	183.300	32.802	19.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานชั้นดักกับอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้