

การพัฒนาอคูเซลลส์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสงต้นทุนต่ำ



นายวีระยุทธ เก้าเอียน

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF LOW-COST PHOTOELECTROCHEMICAL SOLAR CELL MODULES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

วีระยุทธ เก้าเอี้ยน : การพัฒนามอดูลเซลล์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสงต้นทุนต่ำ (DEVELOPMENT OF LOW-COST PHOTOELECTROCHEMICAL SOLAR CELL MODULES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. ณ์ภูพล ภูตระกูลโชติ, 86 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งหวังพัฒนาต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ขนาดใหญ่ โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขยายส่วนการผลิตมอดูล ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน ต้นทุนในการผลิต และเสถียรภาพของมอดูล ส่วนแรกสังเคราะห์สารประกอบนิกเกิลเซลไนด์ ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเพื่อเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมทดแทนการใช้โลหะแพลททินัมที่มีราคาแพง ส่วนที่สองสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (GPE) โดยผสมสารอะเซตาไมด์เข้ากับโพลีเอททิลีนออกไซด์ โซเดียมไอโอดัด และไอโอดีน เพื่อทดแทนการใช้อิเล็กโทรไลต์เหลว ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 cm^2 พบว่าเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้ GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (PCE) = 2.6% และ 2.7 % ตามลำดับ ใกล้เคียงกับผลของเซลล์ควบคุมที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมโลหะแพลททินัมและอิเล็กโทรไลต์เหลว (PCE = 3.0%) อย่างไรก็ตามเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้ทั้งขั้วไฟฟ้าร่วม $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ และ GPE ในเซลล์เดียวกัน ให้ค่า PCE = 2.2% จากผลการทดลองระดับห้องปฏิบัติการนำไปสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 พบว่าเซลล์ควบคุมและเซลล์ทดสอบที่ใช้ทั้งขั้วไฟฟ้าร่วม $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ และ GPE ในเซลล์เดียวกัน ให้ค่า PCE = 2.8% และ 1.4% ตามลำดับ สรุปได้ว่าเมื่อขยายขนาดพื้นที่รับแสงสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้ทั้งขั้วไฟฟ้าร่วม $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ และ GPE ในเซลล์เดียวกัน ลดต่ำลงจากเซลล์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าความต้านทานอนุกรมในเซลล์เพิ่มขึ้นตามขนาดของพื้นที่รับแสง เบื้องต้นแก้ไขด้วยการปรับปรุงสภาพการนำไฟฟ้าโดยเพิ่มเส้นทางถ่ายโอนอิเล็กตรอนบนหน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของเซลล์ทดสอบ ผลที่ได้จะนำไปประยุกต์ในเซลล์ทดสอบที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ขึ้นต่อไป

คำสำคัญ : เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง, เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์, ขั้วไฟฟ้าร่วมนิกเกิลเซลไนด์

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5772152623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS:

WEERAYUT KAO-IAN: DEVELOPMENT OF LOW-COST PHOTOELECTROCHEMICAL SOLAR CELL MODULES. ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D., 86 pp.

This research aims to develop the large area dye-sensitized solar cell (DSSC) modules considering parameters affecting DSSC scale-up process, photoconversion efficiency and the manufacturing cost. The first part involved synthesis of Nickel Selenide compound ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) using hydrothermal method to replace the costly Platinum counter electrode (CE). The second part was the preparation of gel polymer electrolyte (GPE) by mixing acetamide with poly(ethylene oxide), sodium iodide and iodine to replace the typical liquid electrolyte in DSSC. The performance test results of lab-scale DSSCs having irradiation area of 0.25 cm^2 showed that the DSSC test devices based on $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ CE and based on GPE with 8% by weight of acetamide yield photoconversion efficiency (PCE) of 2.6% and 2.7%, respectively. The values are acceptable in comparison with that of controlled test device employing Pt CE and liquid electrolyte (PCE = 3.0%). However, the DSSC incorporating $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ CE and GPE in the same device yields PCE = 2.2%. The devices were then scaled up nine times larger so that the irradiation area became 2.25 cm^2 . The performance test results of controlled DSSCs embedding Pt CE / liquid electrolyte and DSSCs based on $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ CE / GPE showed PCE = 2.8% and 1.4%, respectively. Further analysis revealed that the series resistance of solar cell increases with an increasing area of illumination, causing a significantly lower PCE value in $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ CE/GPE-based DSSCs compared to that of the controlled device. Preliminary countermeasure includes enhancing the electrical conductivity by adding conductive pathways on the surface of both cell electrodes. The results provide base knowledge for further scaling up DSSC devices having larger area of illumination.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นจากความกรุณาจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในทุกๆด้าน ตลอดจนเป็นแรงผลักดันให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ ตลอดจนคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข กรรมการภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ความคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและทุนผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ ทุนเพิ่มศักยภาพส่วนงานในด้านการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีงบประมาณ 2558 – 2559 ตามสัญญาเลขที่ GF_58_08_23_01 จัดสรรโดยฝ่ายวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ และทุนอุดหนุนการศึกษา เพื่อทำหน้าที่ผู้ช่วยวิจัย ประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2557 จัดสรรโดยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์ วิทยาลัยปิโตรเลียม และปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โศจิจงศ์ ฉัตรภรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข สถาบันวิทยสิริเมธี ผู้ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆพี่น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้บรรลุผลสำเร็จ

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 สมมติฐานการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารกึ่งตัวนำ (semiconductor).....	4
2.2 รอยต่อ P-N junction	7
2.3 เส้นทางการพัฒนาสู่เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง [3].....	9
2.4 องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	11
2.5 หลักการทำงานของ DSSC [4].....	12
2.6 ระบบสีย้อมไวแสงและแนวทางการพัฒนา	13
2.7 ระบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	17

2.8 ระบบขั้วไฟฟ้าร่วมและแนวทางการพัฒนาระบบ.....	18
2.9 ระบบอิเล็กโทรไลต์และแนวทางการพัฒนาระบบ.....	19
2.10 พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์	20
2.11 การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	21
2.12 วงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ [15]	25
2.13 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ	26
2.14 เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS).....	29
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	37
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	38
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	39
3.5.1 การเตรียมความพร้อมของผู้ปฏิบัติงานวิจัย.....	39
3.5.2 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ขั้วอมมิวแสง	40
3.5.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง	40
3.5.2.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม	41
3.5.2.3 การประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ขั้วอมมิวแสง.....	42
3.5.2.4 การทดสอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ขั้วอมมิวแสง	43
3.5.3 เซลล์สุริยะชนิดสี่ขั้วอมมิวแสงที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมระดับห้องปฏิบัติการ.....	43
3.5.3.1 การเตรียม Nickel selenide.....	43

3.5.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม	44
3.5.3.3 การประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วม.....	44
3.5.3.4 การวิเคราะห์สารที่เตรียมได้และการทดสอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้า ร่วม.....	44
3.5.4 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับ ห้องปฏิบัติการ	46
3.5.4.1 การเตรียม GPE.....	46
3.5.4.2 การประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	46
3.5.4.3 การวิเคราะห์สารที่เตรียมได้และการทดสอบ DSSC ที่ปรับปรุง สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	46
3.5.5 เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับ ห้องปฏิบัติการ	48
3.5.6 ออกแบบและทดสอบมอดูลเซลล์ DSSC ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่เกิน 30 x 30 cm ²	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้	52
4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูสัณฐานวิทยาของ อนุภาคสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้.....	53
4.3 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อดูการรีดิวซ์และการออกซิไดซ์ของขั้ว นิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้เทียบกับขั้วแพลททินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี	54
4.4 ศึกษาความโปร่งแสงของขั้วไฟฟ้าร่วมเคลือบสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้เทียบ กับแพลททินัมด้วยยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	57
4.5 ผลศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมเทียบกับ เซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ.....	58

4.6 ศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าการเหนียวนำไอออนของ GPE ที่ สังเคราะห์ได้.....	60
4.7 ผลศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ.....	62
4.8 ผลศึกษาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ.....	64
4.9 ผลวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้าในสภาวะมืด.....	66
4.10 ผลศึกษาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน โดยมีพื้นที่รับแสงเป็น 2.25 cm^2	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	82
ภาคผนวก ค.....	83
ภาคผนวก ง.....	84
ภาคผนวก จ.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 การตั้งย่านการวัดให้เหมาะสมต่อการวัดค่าความต้านทาน	47
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเคมีไฟฟ้าจากไซคลิกโวลแทมมาแกรมจากรูปที่ 4.3.....	55
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm ² วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 G (~100 mW/cm ²).....	59
ตารางที่ 4.3 ค่าอนุกรมการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE ที่ไม่มีการผสมและมีการผสมสารอะเซตาไมด์ตามอัตราที่กำหนด	61
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆของ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm ² วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 G (~100 mW/cm ²).....	63
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm ²	65
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ จาก EIS ที่แรงดันไบแอสประมาณ 0.7 V.....	69
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm ²	70

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	ผลึกซิลิคอนที่มีสภาพนำภายใน [2].....	5
รูปที่ 2.2	ผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure silicon) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type silicon).....	5
รูปที่ 2.3	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ[2].....	6
รูปที่ 2.4	รูปตัวอย่างระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [2]	7
รูปที่ 2.5	รูปตัวอย่างระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำแบบ N-Type และ P-Type [2]	7
รูปที่ 2.6	ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ P-N junction [2]	8
รูปที่ 2.7	บริเวณการพร่องที่บริเวณรอยต่อ P-N junction [2].....	8
รูปที่ 2.8	การเกิด Electron-hole pair บริเวณรอยต่อ P-N junction [2].....	9
รูปที่ 2.9	องค์ประกอบภายในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	11
รูปที่ 2.10	การไหลของอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	12
รูปที่ 2.11	สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน [3].....	14
รูปที่ 2.12	สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์กลุ่ม เคามาริน [3].....	14
รูปที่ 2.13	สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์กลุ่ม เพอริลีน [3].....	15
รูปที่ 2.14	โมเลกุลของคลอโรฟิลล์และ Cu-MP [3]	15
รูปที่ 2.15	สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Zn-TCPP [3].....	16
รูปที่ 2.16	สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน meso-linkes [3]	16
รูปที่ 2.17	ค่าพลังงานแถบช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ [6]	17
รูปที่ 2.18	ลักษณะการเคลื่อนที่ของไอออนลิเทียมผ่านตัวกลางพอลิเมอร์ชนิด PEO [12]	20
รูปที่ 2.19	สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ AM 0.0 และ AM 1.5 [14].....	22
รูปที่ 2.20	วิธีการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์สุริยะ	24
รูปที่ 2.21	ลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์สุริยะ	24

รูปที่ 2.22 แบบจำลองวงจรมูลของเซลล์สุริยะ	25
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ	26
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์.....	27
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะที่ความเข้มแสง 1.0 อาทิตย์.....	27
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่ออุณหภูมิ	28
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่อความต้านทานอนุกรม	28
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่อความต้านทานขนั้้นท์	29
รูปที่ 2.29 ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฟังก์ชันไซน์ในวงจรกระแสสลับที่มีความต่างเฟส ϕ	31
รูปที่ 2.30 a) Nyquist plot ของวงจร และ b) วงจรตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ	31
รูปที่ 2.31 แสดง Nyquist plot ทัว้ไปของเซลล์สุริยะชนิดสี่ข้อมไวแสง	32
รูปที่ 2.32 รูปแบบวงจรสำหรับการติดตั้งผลการทดลอง EIS.....	32
รูปที่ 2.33 ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสและค่าความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์	33
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสี่ข้อมไวแสง	39
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง.....	41
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแคโน้เตอร์อิเล็กโทรด	42
รูปที่ 3.4 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ข้อมไวแสงที่ประกอบสำเร็จ.....	42
รูปที่ 3.5 ภาชนะ Teflon-lined autoclave	44
รูปที่ 3.6 วิธีการเซตอุปกรณ์และสารที่ใช้ในการทำไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	45
รูปที่ 3.7 การเตรียมขั้วในฝั้ง working	45
รูปที่ 3.8 หน่วยวัดพื้นฐานของเครื่องมัลติมิเตอร์	47
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกแบบโดยเพิ่มพื้นที่รับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสี่ข้อมไวแสง.....	48
รูปที่ 3.10 บล๊อคสกรีนมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจากระดับห้องปฏิบัติการ 9 เท่า	49

รูปที่ 3.11 ลำดับการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ที่มีพื้นที่รับแสง 2.25 cm ² ก) Pretreatment FTO ข) พิมพ์สกรีน TiO ₂ ค) หลังจากผ่านการเผ่า ง) หลังจากแช่ Dye Z907	50
รูปที่ 3.12 การทาสีแผ่นเงินบนเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	50
รูปที่ 3.13 เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พื้นที่รับแสง 2.25 cm ² ที่ประกอบสำเร็จ	51
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์.....	53
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ ไนต์ ความละเอียด 20,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	53
รูปที่ 4.3 ไซคลิกโวลแทมมาแกรมของขั้วนิกเกิลเฮไลด์ไนต์ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับขั้วแพลททินัม .	54
รูปที่ 4.4 ค่าความโปร่งแสงของขั้วไฟฟ้าร่วมที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัมและสารนิกเกิลเฮไลด์ ไนต์	57
รูปที่ 4.5 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าร่วมที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัม (ซ้าย) และสารนิกเกิลเฮไลด์ไนต์ (ขวา).....	57
รูปที่ 4.6 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมเป็นโลหะแพลททินัม (ซ้าย) และสาร นิกเกิลเฮไลด์ไนต์ (ขวา).....	58
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของ NiSe-DSSC.....	58
รูปที่ 4.8 กราฟ J-V ของเซลล์ NiSe-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm ²).....	59
รูปที่ 4.9 DSC thermograms ของ GPE ที่เตรียมได้.....	60
รูปที่ 4.10 แบบจำลอง Fringed-micelle แสดงโครงสร้างผลึกพอลิเมอร์ [26].....	61
รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบของ GPE-DSSC.....	62
รูปที่ 4.12 กราฟ J-V ของ GPE-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm ²)	63
รูปที่ 4.13 ส่วนประกอบของ NiSe/GPE-DSSC	64
รูปที่ 4.14 กราฟ J-V ของ NiSe/GPE-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm ²).....	64

รูปที่ 4.15 ก) รูปแบบวงจรสำหรับการติดตั้งผลการทดลอง EIS, ข) R_{CT} ที่ bias voltage
 แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และDSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ, ค) Z_W ที่ bias voltage
 แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และDSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ, ง) R_{CE} ที่ bias voltage
 แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และDSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ 67

รูปที่ 4.16 ปฏิกิริยา recombination via electrolyte 68

รูปที่ 4.17 กราฟ J-V ของเซลล์ NiSe/GPE-DSSC ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 71



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

DSSC Dye-sensitized solar cell เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

CE Counter electrode ขั้วไฟฟาร่วม

P_{max} กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดแสงจ่ายให้กับวงจรภายนอก [W]

P_{in} กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแสงที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ [W]

J_{max} ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์ผลิตได้ [mA/cm^2]

V_{max} ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์ผลิตได้ [V]

PCE Power conversion efficiency ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ [%]

FF Fill Factor ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ [-]

J_{sc} Short circuit current density ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร [mA/cm^2]

V_{oc} Open circuit voltage ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด [V]

I กระแสไฟฟ้าขาออก [A]

I_L กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง [A]

I_D กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด [A]

I_{SH} กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชัณฑ์ [A]

V แรงดันไฟฟ้าขาออก [V]

R_S ความต้านทานอนุกรม [Ohm]

$|J_{red}|$ ค่าสัมบูรณ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดจากปฏิกิริยารีดักชัน [mA/cm^2]

J_{ox} ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน [mA/cm^2]

E_{pp} ความต่างของศักย์ไฟฟ้าที่เกิด J_{red} เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่เกิด J_{ox} [V]

σ ค่าการนำไอออนในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ [S/cm]

L ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า [cm]

R_b ความต้านทาน bulk, ความต้านทานของเจลพอลิเมอร์ [Ohm]

A พื้นที่หน้าตัดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [cm^2]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจำนวนประชากรของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงานในอนาคตอันใกล้ ปัญหาสำคัญของแหล่งพลังงานหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทยอันประกอบด้วยถ่านหินและแก๊สธรรมชาติคือมีปริมาณจำกัดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การหาแหล่งพลังงานทดแทนและใช้ได้ไม่มีวันหมดถือเป็นงานเร่งด่วนที่ต้องรีบดำเนินการ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะแสงอาทิตย์มีพลังงานมหาศาลที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างไม่มีวันหมด เซลล์สุริยะ (solar cell) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลากว่า 60 ปีเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง อย่างไรก็ตามเซลล์สุริยะมีต้นทุนการผลิตสูง ไม่สามารถแข่งขันเชิงพาณิชย์เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน ปิโตรเลียม หรือแก๊สธรรมชาติ ดังนั้นเซลล์สุริยะต้นทุนต่ำจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในสถานการณ์ปัจจุบัน เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell; DSSC) เป็นทางเลือกสำคัญในการพัฒนาเซลล์สุริยะต้นทุนต่ำโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้าเชิงแสงที่มีชั้นสีย้อม (Dye-sensitized) ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ผลงานวิจัยล่าสุดพบว่าเซลล์สุริยะ DSSC ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงสุด 11.9% [1] งานวิจัยนี้สนใจการพัฒนาแบบการผลิตเซลล์สุริยะ DSSC โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเซลล์สุริยะขนาดใหญ่ ปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์สุริยะ รวมถึงทดลองผลิตต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะ DSSC ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่มากกว่า $30 \times 30 \text{ cm}^2$ สามารถพัฒนาไปสู่การผลิตเซลล์สุริยะ DSSC ระดับนาร่อง และระดับอุตสาหกรรมต่อไป เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีศักยภาพเชิงพาณิชย์ ตลอดจนตอบสนองต่อนโยบายพลังงานทดแทนแห่งชาติ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การสังเคราะห์สาร Nickel selenide ใช้แทนขั้วไฟฟาร่วม (แพลทินัม) และสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ใช้แทนสารอิเล็กโทรไลต์เหลวในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อช่วยลดต้นทุนในการ

ผลิตและช่วยเพิ่มความเสถียรภาพของเซลล์สุริยะ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการผลิตมอดูลเซลล์สุริยะชนิด สีย้อมไวแสงมีพื้นที่รับแสงขนาดไม่มากกว่า 30 x 30 ตารางเซนติเมตร

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเซลล์สุริยะขนาดใหญ่ ปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงระดับห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อศึกษาและผลิตมอดูลเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีพื้นที่รับแสงขนาดไม่มากกว่า 30 x 30 ตารางเซนติเมตร

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเซลล์สุริยะขนาดใหญ่ ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน ของเซลล์สุริยะและเสถียรภาพของเซลล์สุริยะ รวมถึงทดลองผลิตต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะ ชนิดสีย้อม ไวแสงที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่มากกว่า 30 x 30 ตารางเซนติเมตร

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย
- 1.5.3 จัดเตรียมส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เหมาะสม
 - สีย้อมไวแสง
 - ขั้วไฟฟ้ารับแสง
 - ขั้วไฟฟ้าร่วม
 - สารละลายอิเล็กโทรไลต์
- 1.5.4 ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสงระดับ ห้องปฏิบัติการ
- 1.5.5 จัดเตรียมการประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงขนาดใหญ่
 - ใช้ Nickel selenide เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

- ใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์

1.5.6 วิเคราะห์สาร Nickel selenide ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมและเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

- ศึกษาโครงสร้างผลึกของสาร Nickel selenide ที่เตรียมได้
- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานของ Nickel selenide ที่เตรียมได้
- ศึกษาความโปร่งแสงของ Nickel selenide ที่เตรียมได้
- ศึกษาการรีดิวซ์และการออกซิไดซ์ของสาร Nickel selenide ที่เตรียมได้
- ศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์
- ศึกษาค่าการเหนี่ยวนำไอออน (Ionic conductivity) ของเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์

1.5.7 ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงระดับห้องปฏิบัติการที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.5.8 ออกแบบและทดสอบมอดูลเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่เกิน 30 x 30 ตารางเซนติเมตร

1.5.9 การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

- ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
- วัดค่าความต้านทานของการถ่ายเทอิเล็กตรอนบริเวณผิวสัมผัส

1.5.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เทคนิคการผลิตต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่มากกว่า 30 x 30 ตารางเซนติเมตร ที่มีประสิทธิภาพการทำงานและต้นทุนในการผลิตของเซลล์สุริยะที่เหมาะสม มีเสถียรภาพเหมาะแก่การใช้งานในระยะยาว

บทที่ 2

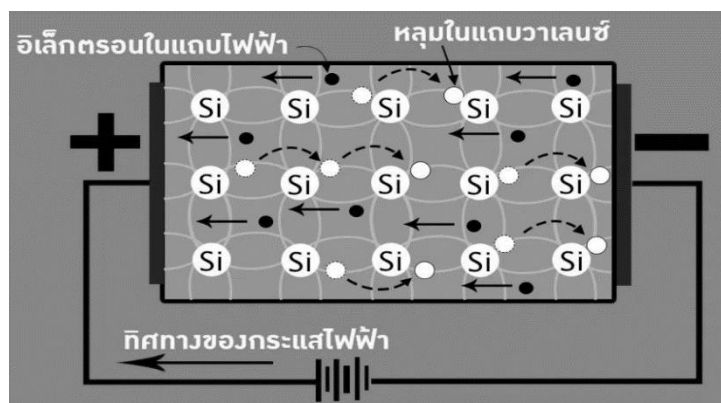
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลังงานไฟฟ้าถือว่าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนาประเทศ การผลิตกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งมีปริมาณอย่างจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานอื่น ๆ มาทดแทน เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น แหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาด ไม่ให้มลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดนั่นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์นอกจากจะใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยเซลล์สุริยะ (solar cell) เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอนได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง ปัจจุบันได้มีการผลิตเซลล์สุริยะชนิดรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ในเชิงพาณิชย์

2.1 สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ คือวัสดุที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) อยู่ระหว่างสารนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) ได้แก่ ซิลิคอน (Si) และเจอร์มาเนียม (Ge) ซึ่งวัสดุจำพวกนี้ใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

สภาพนำภายใน (Intrinsic semiconductor) เป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองด้วยโครงสร้างอะตอมของธาตุชนิดเดียว แสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) จะหลุดจากโครงสร้างอะตอม ข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) แล้วสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในขณะที่เดียวกันแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดหลุม (hole) ที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียง

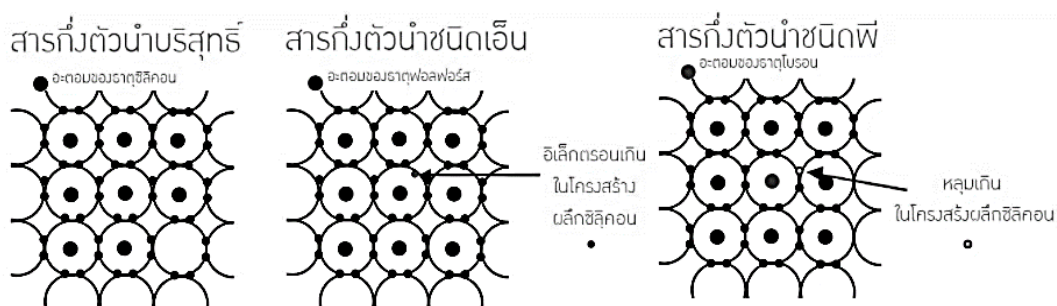


รูปที่ 2.1 ผลึกซิลิคอนที่มีสภาพนำภายใน [2]

สภาพนำภายนอก (Extrinsic conductivity) เป็นสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ Dope ด้วยธาตุเจือปนที่มีโครงสร้างอิเล็กตรอนต่างกันลงไป โครงสร้างผลึกบริสุทธิ์แบ่งเป็น 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.2

- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) เช่น การเจืออะตอมของธาตุฟอสฟอรัส (P) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือ การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้างผลึก

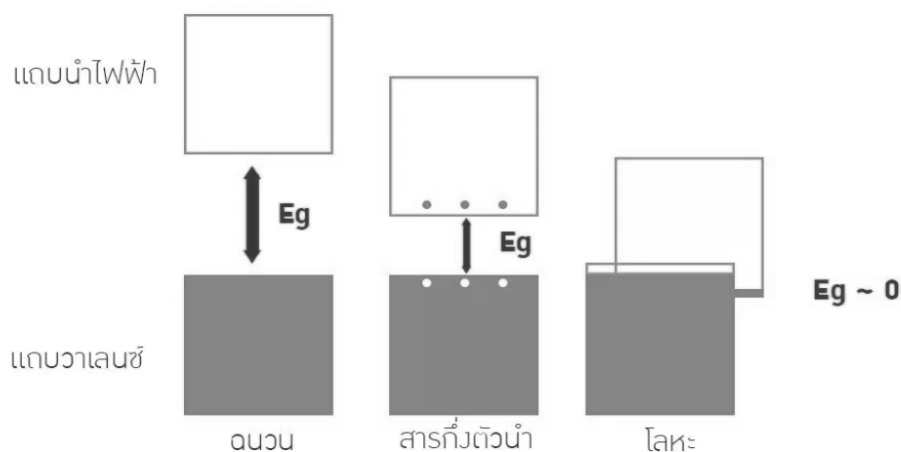
- สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น การเจืออะตอมของธาตุโบรอน (B) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือ การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก ทำให้มีจำนวนหลุมอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้างผลึก ซึ่งหลุมอิเล็กตรอนที่เกินมานี้สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไป ซึ่งคล้ายกับหลุมเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ



รูปที่ 2.2 ผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure silicon) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type silicon)

และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type silicon) [2]

แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model) เป็นแบบจำลองที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็งจำพวกฉนวน, สารกึ่งตัวนำ และโลหะ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ[2]

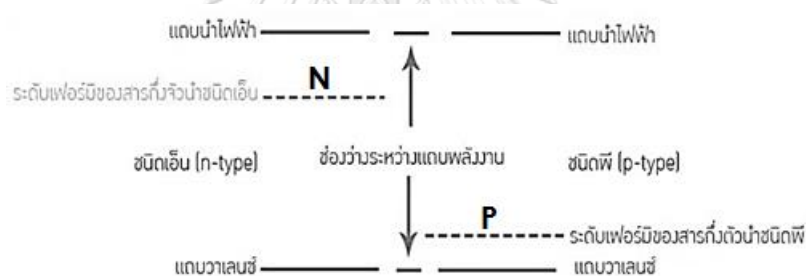
ระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอมจะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงาน (energy band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap หรือ band gap; E_g) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำ แถบวาเลนซ์ (valence band) เป็นแถบพลังงานของอะตอมที่สร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็นโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนแถบนำไฟฟ้า (conduction band) เป็นแถบพลังงานชั้นนอก จะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

ระดับเฟอร์มิ (Fermi Level) เป็นระดับพลังงานสมมติ ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะมีโอกาสพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ณ เวลาใด ๆ ในแบบจำลองแถบพลังงานที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่าง ๆ เป็นไปตามฟังก์ชันของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปตัวอย่างระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [2]

ส่วนสารกึ่งตัวนำแบบ N-Type จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิใกล้แถบนำไฟฟ้าและแบบ P-Type จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์ แสดงดังรูปที่ 2.5



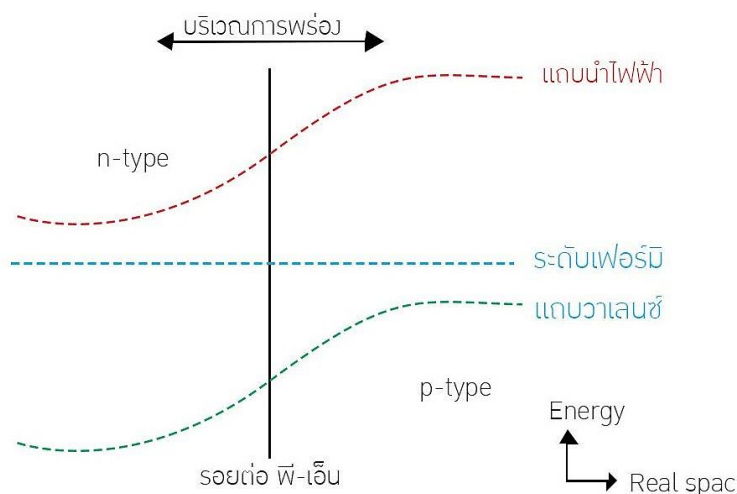
รูปที่ 2.5 รูปตัวอย่างระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำแบบ N-Type และ P-Type [2]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

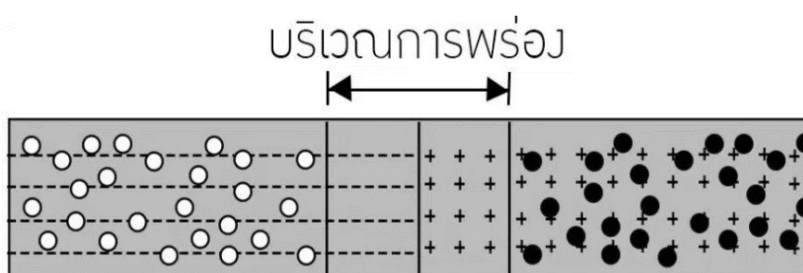
2.2 รอยต่อ P-N junction

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำแบบ N-Type และ P-Type ที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิที่ต่างกันมาเชื่อมต่อกันจะทำให้เกิดรอยต่อ P-N junction เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.6 อิเล็กตรอนฝั่ง N-Type จะแพร่ไปฝั่ง P-Type และในขณะเดียวกัน โฮลจะเคลื่อนที่แพร่ไปยังทิศตรงข้าม ในบริเวณแคบ ๆ ใกล้กับรอยต่อ P-N junction มีแรงเหนี่ยวนำระหว่างประจุลบและประจุบวกที่สะสมในแต่ละฝั่งทำให้เกิดศักย์ภายใน

(built-in potential) ขึ้นต่อต้านการแพร่ของประจุจากทั้งสองฝั่ง การแพร่จะดำเนินไปจนกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองฝั่งอยู่ระดับเดียวกันจึงเข้าสู่สมดุล



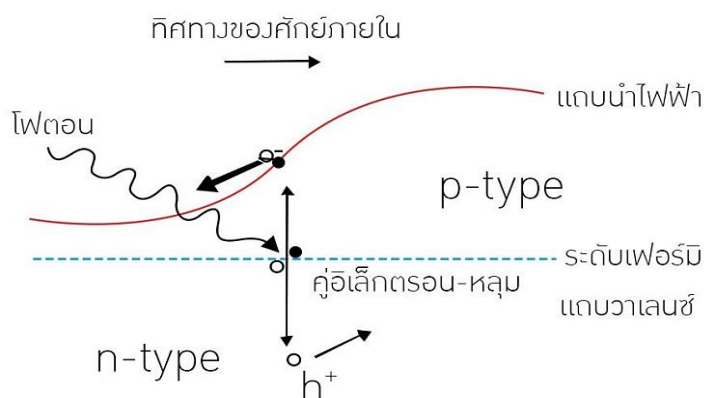
รูปที่ 2.6 ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ P-N junction [2]



รูปที่ 2.7 บริเวณการพ่วงที่บริเวณรอยต่อ P-N junction [2]

ส่วนรูปที่ 2.7 คือบริเวณการพ่วง(depletion region) เป็นบริเวณแคบ ๆ ใกล้เคียงกับรอยต่อ P-N junction โดยบริเวณนี้ไม่มีการแพร่เกิดขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มิของฝั่ง N-Type และ P-Type อยู่ระดับเดียวกัน

คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair) คือ สภาพที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) ของสารกึ่งตัวนำ ได้รับการกระตุ้นจากแสงไฟฟ้าหรือความร้อน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy band) จนมีพลังงานสูงพอที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้เกิดหลุม (hole) ในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิด Electron-hole pair บริเวณรอยต่อ P-N junction [2]

ซึ่งจะคงสภาพในช่วงเวลาสั้น ๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับ (recombination) ลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิม คู่อิเล็กตรอน-หลุม ที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อ P-N junction ในบริเวณการพ่องจะถูกเร่งด้วยคํักย์ภายในให้แยกคู่กัน เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่วงจรภายนอกได้ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-หลุม และเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับ (recombination lifetime) เป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

2.3 เส้นทางพัฒนาสู่เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง [3]

เซลล์สุริยะสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยวิธีโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic) ซึ่งได้ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Antonie César Becquerel ในปี ค.ศ. 1839 พบว่า เมื่อแสงตกกระทบเซลล์อิเล็กโทรไลติกในส่วนขั้วไฟฟ้าโลหะ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น จากนั้น Russell Ohl ได้พัฒนาเซลล์สุริยะสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดรอยต่อ P-N ที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1941 และต่อมา Chapin และคณะ ได้พัฒนาเซลล์สุริยะสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่เป็นรอยต่อ P-N เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของโครงการอวกาศเซลล์สุริยะที่ได้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 4% ในปี ค.ศ. 1954 และในเวลาอีกไม่กี่ปีต่อมา ได้พัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 11% ซึ่งหลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดนี้อาศัยการเกิดอิเล็กตรอน (electron, e⁻) และหลุม (hole, h⁺) อิสระที่รอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบเมื่อต่อ

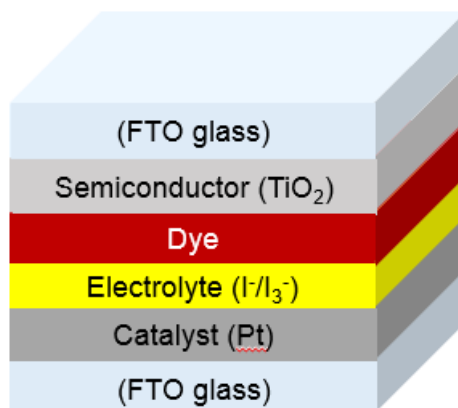
เซลล์สุริยะกับวงจรไฟฟ้าภายนอกก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนและหลุมอิสระเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรือสามารถเก็บสำรองไว้ในแบตเตอรี่ ในปี ค.ศ. 1958 ได้นำเซลล์สุริยะชนิดรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำไปใช้งานกับดาวเทียม แวนการ์ด I เป็นครั้งแรก และต่อมาในปี ค.ศ. 1960 บริษัท Hoffman Electronics สามารถผลิตเซลล์สุริยะที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 14% และหลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดนี้อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเซลล์สุริยะแบบรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำได้แก่ เซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิคอนรูปทรงเดี่ยว (monocrystalline silicon) และเซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิคอนหลายรูปทรง (polycrystalline silicon) เซลล์สุริยะชนิดฟิล์มของซิลิคอนอสัณฐาน (amorphous silicon) นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซลล์สุริยะชนิดฟิล์มบางของโลหะผสมแกลเลียมอาร์เซไนต์ใช้ในอุตสาหกรรมอวกาศเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพง แม้ว่าเซลล์สุริยะชนิดรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำมีประสิทธิภาพสูงแต่ยังไม่ได้รับนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากกระบวนการผลิตเซลล์สุริยะซิลิคอนต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและต้องการซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้เซลล์สุริยะชนิดนี้มีราคาแพงเกินไปที่จะซื้อใช้ในบ้านเรือนทั่วไป ดังนั้นได้มีการพัฒนา เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC) ขึ้นมาในช่วงการพัฒนารุ่นแรก ๆ เซลล์สุริยะชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ และได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะ Grätzel และคณะ (O'Regan and Grätzel, 1991) เป็นกลุ่มวิจัยที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในการศึกษาโดยในปี ค.ศ. 1991 ได้พัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 7% และในปี ค.ศ. 1993 สูงถึง 10%

ในปัจจุบันทีมของ Grätzel ได้พัฒนาเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 11.18% และกำลังเป็นที่สนใจเป็นอย่างมากทั้งในเชิงวิชาการและในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเซลล์สุริยะชนิดนี้สามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูง มีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่าและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเซลล์สุริยะฐานซิลิคอน

เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเป็นเซลล์ที่อาศัยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงในการดูดกลืนแสง ซึ่งเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีการใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสีย้อมไวแสงที่เตรียมจากสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมและลิแกนด์กลุ่มไพริดีน (Ru-pyridine complex) สารประกอบอินทรีย์ (organic compound)

หรือรงควัตถุในธรรมชาติ (natural pigment) ที่มีสมบัติดูดกลืนแสงในย่านความถี่ของแสงอาทิตย์ได้ เซลล์สุริยะชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “เซลล์เกรทเซล” (Grätzel Cell)

2.4 องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบภายในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

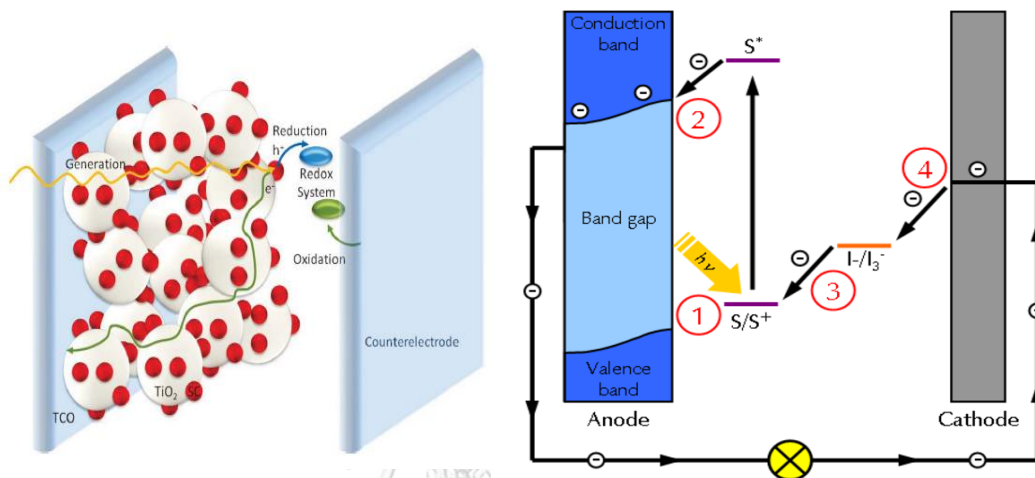
องค์ประกอบที่สำคัญในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง แสดงดังรูปที่ 2.9 ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคโลหะออกไซด์ และสารอิเล็กโทรไลต์ โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้

- ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้ารับแสงทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอกและขั้วไฟฟ้าร่วมทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ ซึ่งนิยมใช้โลหะแพลทินัมเคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้า
- สีย้อมไวแสง เป็นส่วนประกอบที่ยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนขั้วไฟฟ้ารับแสงทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นสีย้อมไวแสงต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงแสงที่มองเห็นได้และใกล้อินฟราเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับโฟตอนที่ตกกระทบ มีระดับพลังงานของสถานะพื้นและสถานะเร้าที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี
- อนุภาคโลหะออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะรวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสง จึงควรเป็นอนุภาคที่มี

พื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO₂) เป็นต้น

- สารอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) กับขั้วไฟฟาร่วม

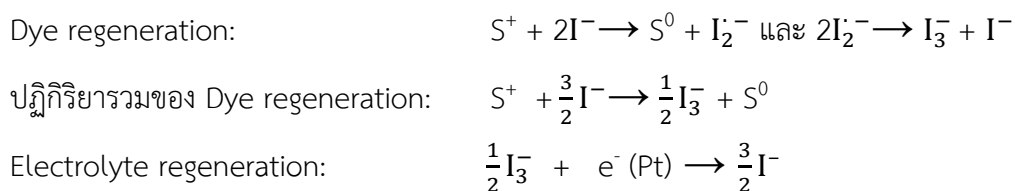
2.5 หลักการทำงานของ DSSC [4]



รูปที่ 2.10 การไหลของอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

การไหลของอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อแสงตกกระทบเซลล์สุริยะ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะดูดกลืนแสง เปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้น (S^0) เป็นสถานะเร้า (S^*) จากนั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงของโมเลกุลสีย้อมในสถานะเร้า (S^*) ถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า แล้วอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในชั้นสารกึ่งตัวนำจะถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัส (front contact) จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่บรรจุอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ารับแสงและขั้วไฟฟาร่วมจะเกิดกระบวนการรีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S^0) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟาร่วม โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ

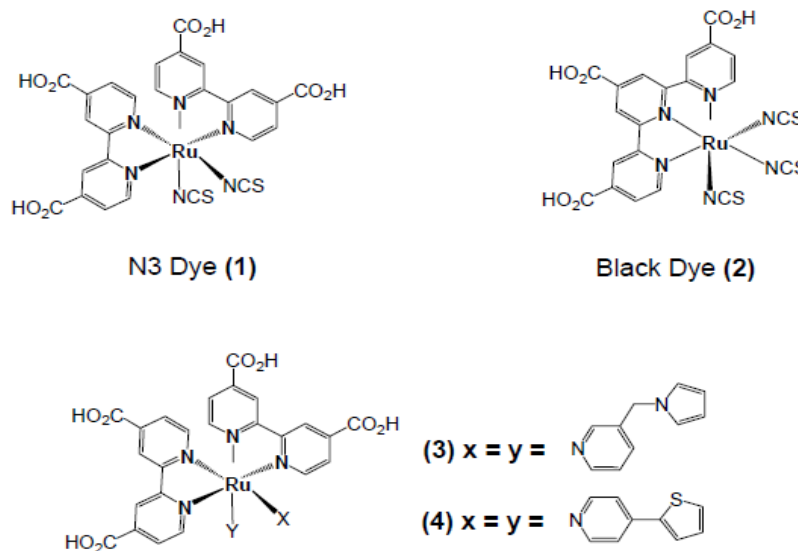




2.6 ระบบสีย้อมไวแสงและแนวทางการพัฒนา

2.6.1 กลุ่มสีย้อมไวแสงจำพวกสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน

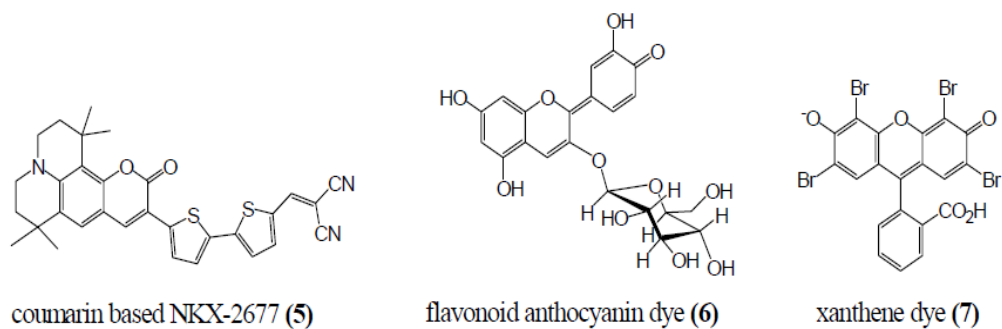
สีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากรูทีเนียมเป็นโลหะมีความต่างศักย์รีดอกซ์ (redox potential) สูง เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ออกไซด์ได้ดี Grätzel และคณะ (O'Regan and Grätzel, 1991; Nazeeruddin et al., 1997; Nazeeruddin et al., 2003; Cherepy et al., 1997) เป็นกลุ่มวิจัยแรกที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในการพัฒนาสีย้อมไวแสงประเภทนี้ โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนหรืออนุพันธ์ของโพลีไพริดีน โดยลิแกนด์โพลีไพริดีนจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลและมีความสามารถดูดซับบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่าง สีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ได้แก่ N3 Dye (1) และ Black Dye (2) พบว่าเซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อมไวแสงกลุ่มนี้ได้ประสิทธิภาพรวมสูงถึง 10.4% มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์สุริยะแบบรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน โดยสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุล (3) และ (4) ที่มีหมู่ลิแกนด์ไพร์โรลและไรโอฟินเพิ่มขึ้นมา ดังรูปที่ 2.11 แม้ว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อนกลุ่มโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีนจะให้ประสิทธิภาพรวมสูง แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงอาทิตย์ที่แคบ การสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยาก และมีราคาแพง จึงมีการศึกษาและทดลองสีย้อมไวแสงชนิดอื่น



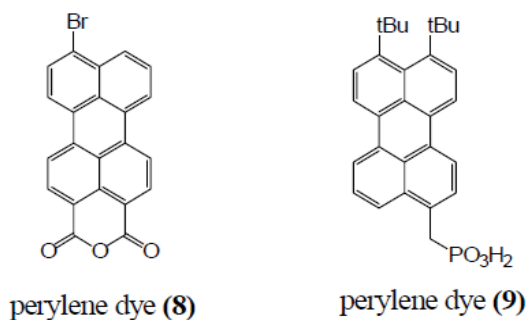
รูปที่ 2.11 สีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน [3]

2.6.2 กลุ่มสีย้อมไวแสงสารอินทรีย์

คือการนำสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมาสังเคราะห์ใช้เป็นสีย้อมไวแสง สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพรวมที่ต่ำกว่ากลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม แต่ยังคงได้รับความสนใจและศึกษาพัฒนา เนื่องจากสารนั้นมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย และมีความเป็นพิษต่ำ สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น โมเลกุล (5) – (7) เป็นอนุพันธ์ของคูมาริน (coumarin) ดังรูปที่ 2.12 พบว่าให้ประสิทธิภาพประมาณ 7.7% นอกจากนี้ยังมีอีกกลุ่มหนึ่งที่น่าสนใจ คือ สารกลุ่มเพอริลีน ดังรูปที่ 2.13 (perylene dye) (8, 9) พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมใกล้เคียงกันกับอนุพันธ์ของคูมาริน



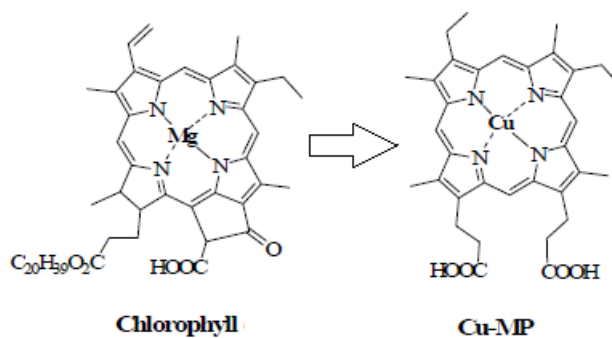
รูปที่ 2.12 สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์กลุ่ม เคามาริน [3]



รูปที่ 2.13 สีย้อมไวแสงสารอินทรีย์กลุ่ม เพอร์ลิซีน [3]

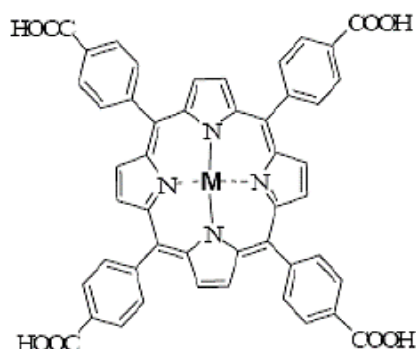
2.6.3 กลุ่มสีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน (porphyrin)

เป็นสีย้อมที่พัฒนามาจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นโครโมฟอร์ที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ในปี ค.ศ. 1993 Grätzel (Kay et al., 1993) ได้สังเคราะห์อนุพันธ์พอร์ไฟริน โครงสร้างสีย้อมแสดงดังรูปที่ 2.14 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดกลืนแสงบนตัวดูดซับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าสีย้อมไวแสง Cu-MP ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 2.6%



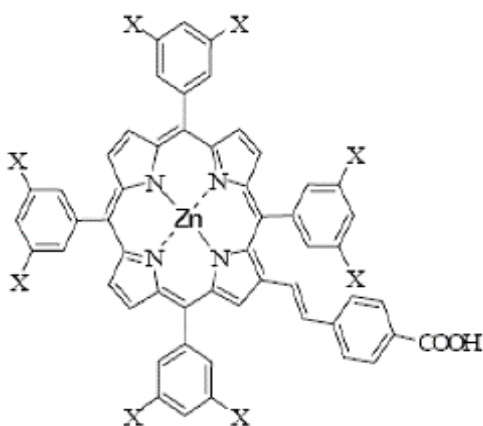
รูปที่ 2.14 โมเลกุลของคลอโรฟิลล์และ Cu-MP [3]

ปี ค.ศ.1996 Boschloo และ Goossens ได้พัฒนาอนุพันธ์สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน โดยสังเคราะห์สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Zn-TCPP ดังรูปที่ 2.15 พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมประมาณ 1.1% ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Cherian และ Wamser (Cherian and Wamser, 2000) ใช้ TCPP ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ Zn-TCPP แต่ปราศจากโลหะ Zn เป็นโมเลกุลสีย้อมไวแสง พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มเป็น 3.5%



รูปที่ 2.15 สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน Zn-TCPP [3]

และต่อมาในปี 2004 (Campbell et al., 2004) สังเคราะห์พอร์ไฟริน meso-linkes ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.16 สาร Zn-1a, Zn-1b และ Zn-1c พบว่าให้ประสิทธิภาพรวมของ Zn-1b สูงถึง 4.2%



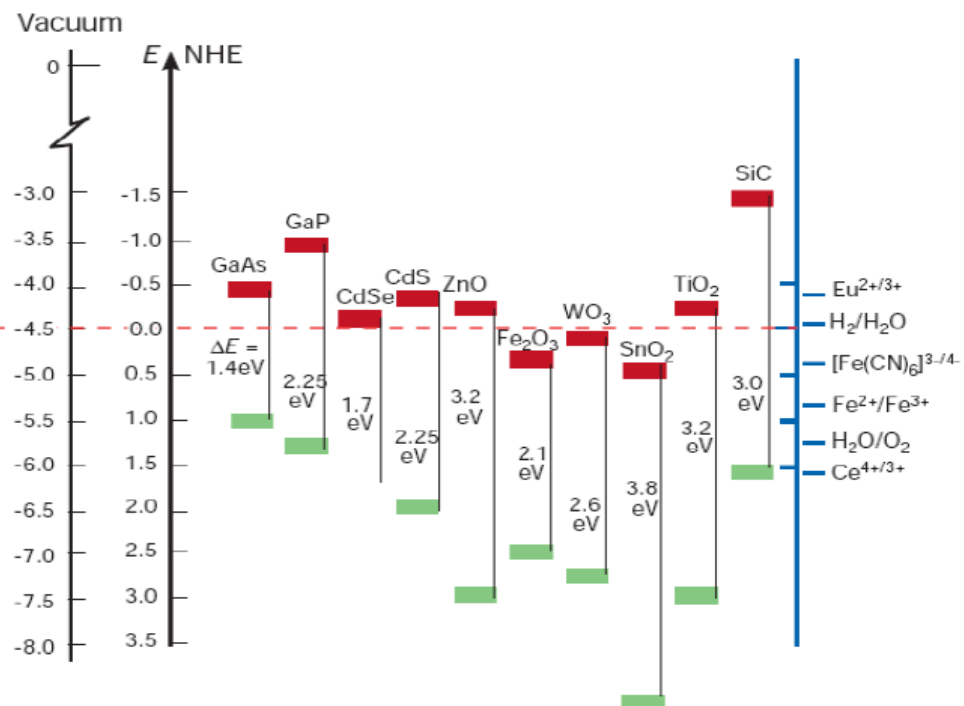
รูปที่ 2.16 สีย้อมไวแสงพอร์ไฟริน meso-linkes [3]

ในปี 2011 Aswani Y., และคณะ ได้พัฒนาสีย้อมของกลุ่มพอร์ไฟริน พบว่าได้ประสิทธิภาพรวมของสีย้อมกลุ่มพอร์ไฟรินมีค่าสูงถึง 12.4 % [5] ซึ่งใกล้เคียงกับสีย้อมกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม ดังนั้นการสังเคราะห์สีย้อมไวแสงพอร์ไฟรินสามารถปรับเปลี่ยนหมู่ ฟังก์ชันภายในโมเลกุลได้ง่ายและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพไปในทางที่สูงขึ้น จึงทำให้ปัจจุบันสีย้อมไวแสงพอร์ไฟรินยังคงได้รับความสนใจศึกษาอยู่อย่างต่อเนื่อง

แนวทางการพัฒนาสีย้อม มีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ 1. สารสีย้อมไวแสงที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง visible light – IR light เพื่อเพิ่มอิเล็กตรอนในสถานะเร้าให้ได้มาก 2. เพิ่มความสามารถการยึดติดของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวโลหะออกไซด์ และ 3. เพิ่มความสามารถในการถ่ายอิเล็กตรอนระหว่าง สีย้อมไวแสงกับโลหะออกไซด์

2.7 ระบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุด ชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีความเสถียรภาพสูง มีพลังงานแถบช่องว่าง (E_g) ที่กว้าง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะได้มาก มีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอเพื่อให้ไอออนของอิเล็กโทรไลต์แพร่ผ่านได้ดี และอนุภาคของสารกึ่งตัวนำต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อิเล็กตรอนส่งผ่านได้ดี ในปี 1991 Grätzel และคณะ ได้เลือกอนุภาคผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างประมาณ 3.2 eV มีความเสถียรภาพสูง มาใช้ในการเตรียมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง สำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะนั้น สามารถทำได้โดยทดลองเปลี่ยนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ZnO_2 , WO_3 , Fe_2O_3 , $SrTiO_3$, CdS , MoS_2 , ZnS , $ZnTe$ และ $CdSe$ ซึ่งสารจำพวกนี้มีพลังงานแถบช่องว่าง แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ [6]

ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Film) [7] ที่มีรูพรุนในรูปแบบผลึกระดับนาโนแบบอนาเทส (anatase) ซึ่งเป็นวัสดุที่เสถียร ราคาถูก ใช้ในเซลล์สุริยะชนิดนี้ได้ดีมาก และไม่เป็นที่ขี้ ชั้นของฟิล์มไททาเนียมได

ออกไซด์หรือความหนาของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ยังมีมาก ก็จะมีพื้นที่ผิวมากเพราะความพรุนที่มีมากขึ้นทำให้สีย้อมไวแสงยึดเกาะได้มาก ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ใช้เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าด้านที่สัมผัสแสง (working electrode) ไททาเนียม (titanium) Ti มีเลขอะตอม 22 มีมวลอะตอม 47.867 amu มีจุดหลอมเหลว 1,600.0 °C มีจำนวนโปรตอนต่ออิเล็กตรอน 22 ตัว และมีจำนวนนิวตรอน 26 ตัว ซึ่งในตารางธาตุจัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน (transition metal) มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะกอนอล (hexagonal) นั้นมีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C ประมาณ 4.54 g/cm³ ลักษณะทางกายภาพมีสีขาวคล้ายเงิน (silver) มีความแข็งแต่ไม่เปราะเมื่อเทียบกับโลหะทรานซิชันด้วยกันและจะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดที่อุณหภูมิเดียวกันนั้น ไททาเนียมจะไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิน้อยกว่า 500 °C แต่ถ้าอุณหภูมิมากกว่านี้จะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับออกซิเจนเป็นผลให้เกิดสารประกอบไททาเนียมขึ้น

สมบัติเฉพาะของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

สารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะทรานซิชันกับออกซิเจน โดยสถานะออกซิเดชันของไททาเนียมได้แก่ +2, +3 และ +4 ซึ่งไททาเนียมที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 เป็นสถานะเสถียรที่สุดภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยสารประกอบไททาเนียมที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 ก็คือไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

2.8 ระบบชีวไฟฟ้าร่วมและแนวทางการพัฒนาระบบ

ชีวไฟฟ้าร่วมทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ชีวไฟฟ้าร่วมต้องมีคุณสมบัติคือ มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นชีวไฟฟ้าร่วมคือ โลหะแพลทินัม (Pt) จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยส่วนใหญ่ใช้โลหะแพลทินัม (Pt) หรือ ผงคาร์บอนทำเป็นชีวไฟฟ้าร่วมสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โลหะแพลทินัม (Pt) มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ มีเลขอะตอม 78 น้ำหนักอะตอม 195.07 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 3,827 °C และ 1,769 °C มีสภาพไฟฟ้าลบ 2.28 ความหนาแน่น (300K) g/cm³ : 21.5 มีลักษณะสีเงินเทา มีน้ำหนักมากสามารถยึดและตีเป็นแผ่นได้ แพลทินัมทนต่อการกัดกร่อนมาก ในธรรมชาติพบอยู่กับสินแร่ของนิกเกิลและทองแดง ส่วนใหญ่ใช้เป็นอุปกรณ์ในห้องทดลอง ตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น

ส่วนแนวทางในการพัฒนาระบบขั้วไฟฟ้าร่วม เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีราคาแพงอาจใช้วัสดุอื่นแทนได้ เช่น ผงคาร์บอน ท่อคาร์บอนนาโน ผงคาร์บอนแบล็ค พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) เช่น PEDOT:PSS หรือ Polypyrrole และวัสดุเซเลไนต์ เป็นต้น ในปี 2012 Gong F., และคณะ [8] ได้พัฒนาขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยขั้วไฟฟ้าร่วมจะใช้วัสดุเซเลไนต์ ได้แก่ โคบอลเซเลไนต์ ($\text{Co}_{0.85}\text{Se}$) และ นิกเกิลเซเลไนต์ ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) ซึ่งวัสดุเซเลไนต์นี้ถูกสังเคราะห์ด้วยขบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าเซลล์สุริยะทดสอบที่ใช้โคบอลเซเลไนต์เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมให้ประสิทธิภาพรวมมีค่าสูงถึง 9.4 % และนิกเกิลเซเลไนต์ให้ประสิทธิภาพรวม 8.3 % ส่วนโลหะแพลทินัมให้ประสิทธิภาพรวม 8.6 % ซึ่งขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้วัสดุเซเลไนต์นั้นให้ผลที่ตีเทียบเท่ากับเซลล์สุริยะที่ใช้โลหะแพลทินัม ต่อมาในปี 2015 ผศ.ดร.มารีสา อรัญชัยยะ [9] ได้ทดลองพัฒนาขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยการทดสอบใช้ขั้วไฟฟ้าจากวัสดุที่เตรียมขึ้น 4 แบบ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาและเตรียมได้ง่าย ราคาไม่แพง โดยส่วนประกอบอื่นที่ใช้ในเซลล์สุริยะได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนรูทีเนียม (N719) ใช้อิเล็กทรอนิกส์กึ่งของแข็งที่ทำจากคอมพอลิของพอลิเอทิลีนออกไซด์ ไอโอดีน และโพแทสเซียมไอโอดेट ส่วนขั้วไฟฟ้ารับแสงใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้วัสดุคาร์บอนแบล็คผสมแลนทานัมโคบอลออกไซด์ (carbon black-LaCoO₃), พอลิอะนิลีน (Polyaniline ; PANI) และ พอลิ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟิน (Poly3,4-ethylenedioxythiophene; PEDOT) ให้ผลที่ตีเทียบเท่ากับเซลล์สุริยะที่ใช้โลหะแพลทินัม

2.9 ระบบอิเล็กทรอนิกส์และแนวทางการพัฒนาระบบ

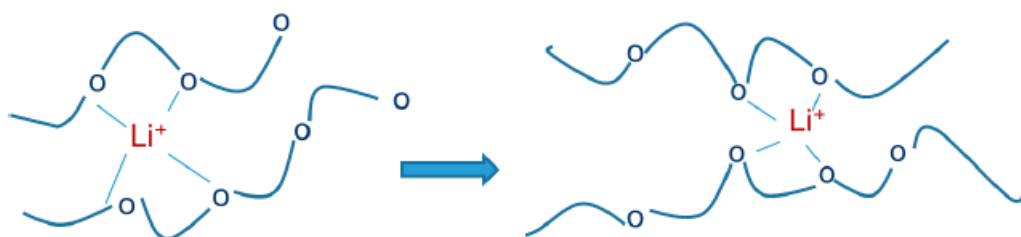
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา DSSC ให้มีค่า PCE ได้สูงที่สุดถึง 11.9% [10] อย่างไรก็ตามเซลล์สุริยะแบบ DSSC ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของความคงทน อายุการใช้งาน เนื่องจากมีการใช้ของเหลว เช่น NaI/I_2 ผสม ethylene carbonate และ acetonitrile เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมักมีปัญหาด้านการรั่วซึมและทำให้อายุการใช้งานสั้น แม้ว่าจะมีความพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้ room temperature ionic liquid ซึ่งเป็นสารที่ระเหยได้ยากมาแทน แต่อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวยังคงมีลักษณะเป็นของเหลวและอาจเกิดการรั่วซึมได้หากการยึดติดระหว่าง sealing film กับกระจกที่ทำหน้าที่เป็นชั้นขั้วในเซลล์สุริยะไม่ดีพอ ดังนั้นแนวโน้มของงานวิจัยและพัฒนา DSSC ในระยะถัดมาจึงเน้นไปทางด้านการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของแข็งและกึ่งของแข็งแทน เช่น เจลพอลิเมอร์และ hole transport materials ชนิดต่าง ๆ เช่น SpiroOMeTAD, P3HT, หรือ CsSnI_3 เป็นต้น เจลพอลิเมอร์

หรือพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีจุดเด่นสำคัญในเรื่องการนำพาไอออนดี และสามารถแข็งตัวได้ง่าย โดยพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเจลที่มีโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรไลต์แบบแข็งและขั้วพูนระดับนาโนโลหะออกไซด์ นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายไม่ซับซ้อน ในปัจจุบันนิยมใช้ Poly (ethylene glycol) (PEG) และ Poly (ethylene oxide) (PEO) เป็นวัสดุในการเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์และพบว่าการใช้ประโยชน์พอลิเมอร์ร่างแหแบบเจลของ PEO segments ในการทำพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ร่วมสามารถให้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุดเท่ากับ 8.1% [3] ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบกึ่งของแข็งจะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของเซลล์ดังกล่าวได้แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะจะลดลง เมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว

2.10 พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์

พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ คือ การใช้พอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งโดยทั่วไปสารอิเล็กโทรไลต์แบบของแข็งที่ทำจากพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก [11] ได้แก่ 1. วัสดุพอลิเมอร์ในสถานะของแข็ง (solid state polymer electrolyte), 2. วัสดุพอลิเมอร์ในสถานะกึ่งของแข็ง (polymer gel electrolyte หรือ quasi-solid state polymer electrolyte) , 3. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติม (fillers) บางชนิดลงไป

1. วัสดุพอลิเมอร์ในสถานะของแข็ง เช่น พอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG) ผสมกับสารอิเล็กโทรไลต์เช่น LiClO_4 หรือ I_2/NaI โดยปราศจากตัวทำละลายและสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ซึ่ง PEG จะทำหน้าที่เป็นเมตริกหลัก และอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone-pair electron) ของออกซิเจนสร้างพันธะกับไอออนบวกของโลหะ โดยไอออนบวกของโลหะสามารถเคลื่อนที่อยู่ภายใน PEG ที่มีโครงสร้างแบบเกลียว (helical conformation) ได้ แสดงดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะการเคลื่อนที่ของไอออนลิเทียมผ่านตัวกลางพอลิเมอร์ชนิด PEO [12]

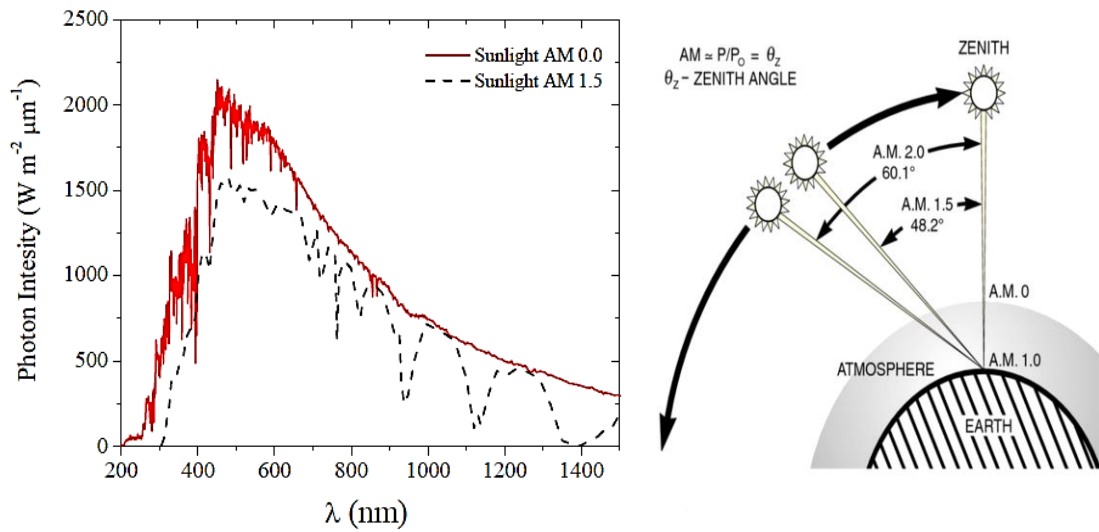
2. วัสดุพอลิเมอร์ในสถานะกึ่งของแข็ง (polymer gel electrolyte หรือ quasi-solid state polymer electrolyte) ระบบจะอาศัยพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นเจล (gelator) ผสมกับสารอิเล็กโทรไลต์เช่น LiClO_4 และยังมีการเติมตัวทำละลายลงไปด้วยเพื่อที่จะลดความเป็นผลึกและเพิ่มความสามารถในการนำไอออนให้กับสารพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเจลในสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น พอลิเมอร์ในตระกูลพอลิอะคริเลต พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน โคพอลิเมอร์ P(VDF-HFP) พอลิเอธิลีนออกไซด์ (PEO) และพอลิโพรพิลีนออกไซด์ (PPO) เป็นต้น

3. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติม (fillers) บางชนิดลงไป ประเภทที่ active (เกิดปฏิกิริยาและมีส่วนร่วมในการนำประจุ) เช่น Li_3N , $\gamma\text{-LiAlO}_2$ และประเภทที่ไม่ active เช่น ออกไซด์ของ เซรามิก Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 และวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (BaTiO_3)

2.11 การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

(ก) อัตรารังสีดวงอาทิตย์

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะจะอ้างอิงจากค่าอัตรารังสีดวงอาทิตย์ (Air Mass) $AM = 1/\cos \theta_z$ โดยที่ θ_z หรือมุม Zenith คือมุมที่กระทำกับเส้นตั้งฉากจากดวงอาทิตย์มายังโลก ค่า AM จะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 0 องศากับพื้นโลก สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งที่มีค่าอัตรารังสีดวงอาทิตย์ $AM = 1.5$ หรือ มุม $\theta_z = 48.2$ องศา แสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มรังสีของแสงหรือกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์สุริยะมีค่าประมาณ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ถือเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปีของพื้นผิวโลกในทุกระดับละติจูด (Mid-latitudes) และใช้เป็นสเปกตรัมมาตรฐานสำหรับเครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Sun simulator) ในการทดสอบเซลล์สุริยะ [13]



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ AM 0.0 และ AM 1.5 [14]

(ข) ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง

ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) หรือประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\text{IPCE} (\lambda) = \frac{1240 \cdot J_{sc} (\text{A/cm}^2)}{\lambda (\text{nm}) \cdot I_{inc} (\text{W/cm}^2)} \quad \text{สมการ (2.1)}$$

โดยที่ J_{sc} (short circuit current density) คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด, λ คือความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบเซลล์สุริยะ, I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด

(ค) ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (η) เป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) และ (2.3)

$$\eta(\%) = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \times 100 \quad \text{สมการ (2.2)}$$

$$\eta(\%) = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{P_{\text{in}}} \times 100 \quad \text{สมการ (2.3)}$$

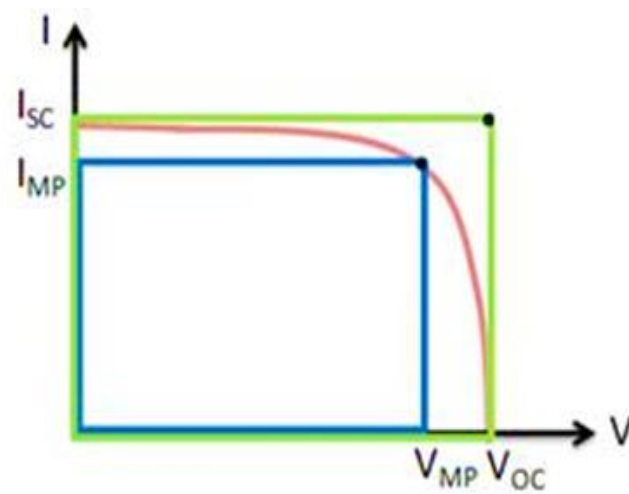
โดยที่	P_{\max}	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก
	P_{in}	คือ กำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ
	I_{\max}	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด
	V_{\max}	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) คือค่ามาตรฐานของการวัดคุณภาพของตัวเซลล์ ซึ่งหมายถึงค่าฟิลล์แฟกเตอร์จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก I_{\max} คูณ V_{\max} ต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก I_{sc} คูณ V_{oc} แสดงดังรูป 2.20 ถ้าค่า FF ยิ่งเข้าใกล้ 1 แสดงว่าเป็นแบบในอุดมคติหมายถึงค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะที่ทำได้ แต่ถ้าค่า FF ต่ำกว่า 1 มาก และให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมีค่าสูง แสดงว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดกับค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์สุริยะที่ทำได้มีค่าต่ำ เนื่องจากเซลล์สุริยะนั้นมีความต้านทานอนุกรมภายนอกเซลล์สูงเกินไปหรือมีความต้านทานชั้ภายในเซลล์ต่ำเกินไป ส่งผลให้เซลล์สุริยะผลิตกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าได้น้อย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$FF = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{I_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}}} \quad \text{สมการ (2.4)}$$

โดย	I_{sc}	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current)
	V_{oc}	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมีค่าสูง (open circuit voltage)

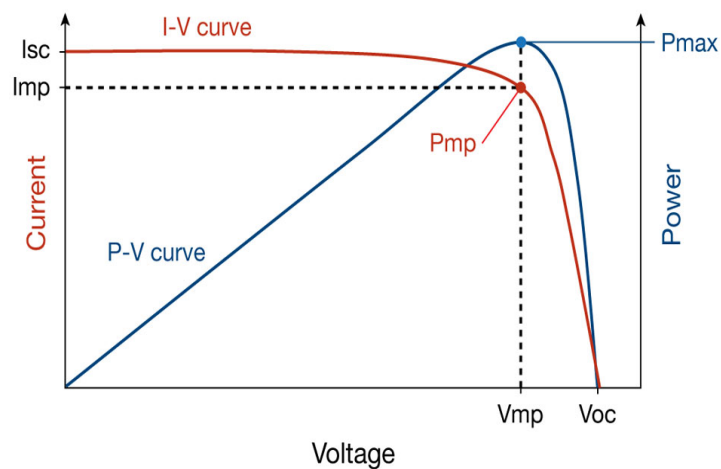


รูปที่ 2.20 วิธีการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์สุริยะ

จากสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) สามารถเขียนใหม่รวมกันได้เป็นสมการประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ โดยกราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์สุริยะจะแสดงดังรูปที่ 2.21

$$\eta(\%) = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \times 100$$

สมการ (2.5)



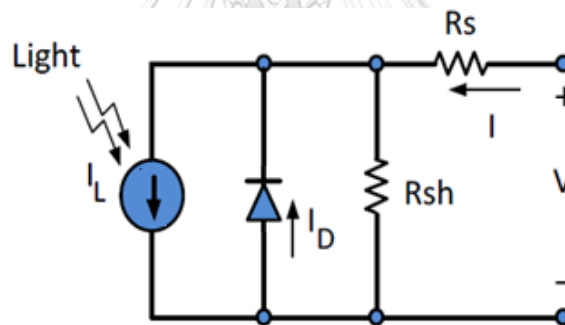
รูปที่ 2.21 ลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์สุริยะ

2.12 วงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ [15]

เซลล์สุริยะสามารถแทนด้วยวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) แสดงดังรูปที่ 2.22 เริ่มจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับไดโอด และตัวต้านทานชันท์ (R_{sh}) จากนั้นต่ออนุกรมกับตัวต้านทานอนุกรม (R_s) โดยกำหนดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นแบบกระแสคงที่และแปรผันตามความเข้มแสง ซึ่งความต้านทานอนุกรมเป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อ (Wiring Contact) ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับตัวเซลล์ ส่วนความต้านทานชันท์เกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าในลักษณะไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอด

ผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์สุริยะ เกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่กลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และผ่านความต้านทาน Shunt ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละจุดขึ้น ซึ่งแสดงสมการที่ (2.6)

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad \text{สมการ (2.6)}$$



รูปที่ 2.22 แบบจำลองวงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ

สมการที่ (2.7) แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ

$$V_j = V + IR_s \quad \text{สมการ (2.7)}$$

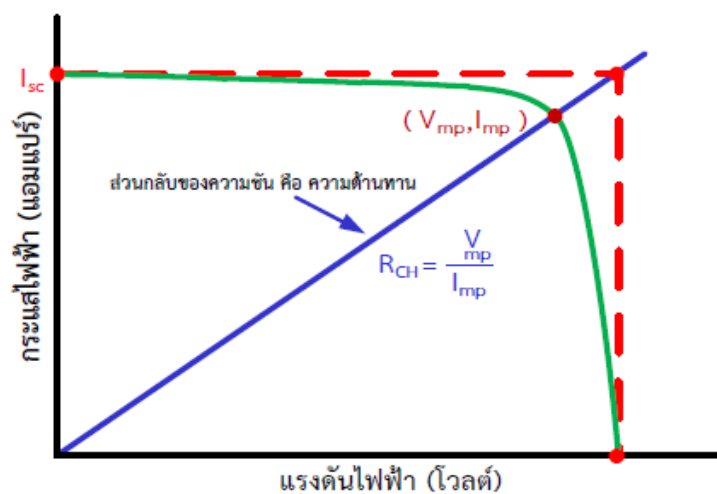
โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์

I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์

I_D คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์

- I_{SH} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชั้นที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์
- V คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นโวลต์
- V_j คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุด ไต ๆ มีหน่วยเป็นโวลต์
- R_s คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้แก่ กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) รูปที่ 2.23 กระแสลัดวงจรคือกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะมีค่าเป็นศูนย์ จึงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนค่าฟิลล์แฟกเตอร์เป็นอัตราส่วนระหว่างผลคูณ แรงดันกับกระแสที่จุดทำงานสูงสุด และผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันวงจรเปิดซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์สุริยะต้องศึกษาและการพัฒนา โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่สูงสุดต่อกระแสที่สูงที่สุด หรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร

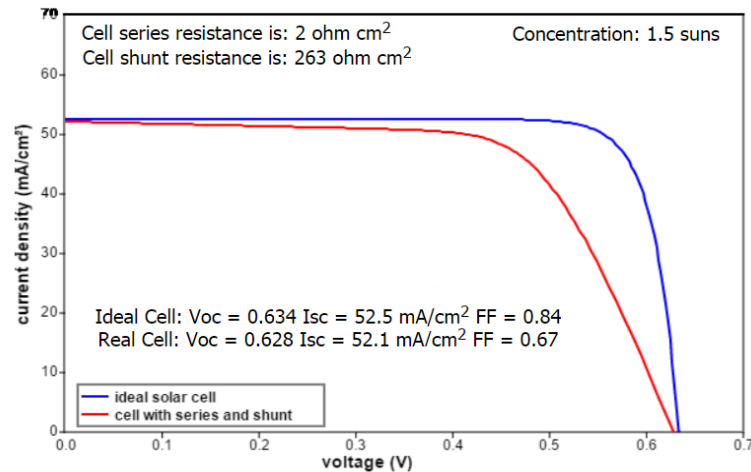


รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ

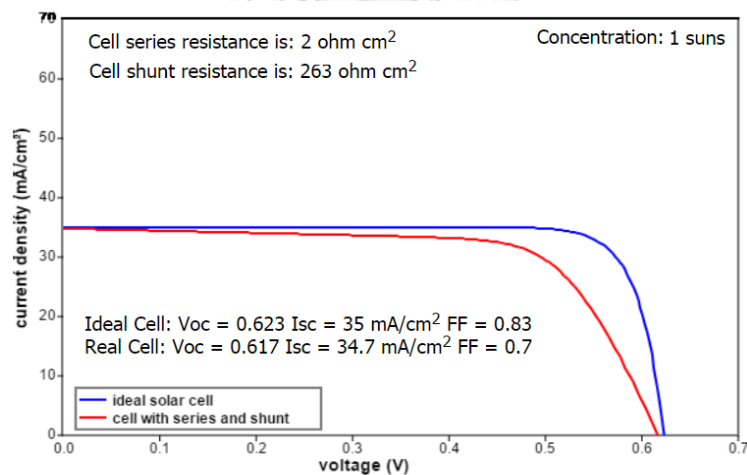
2.13 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะขึ้นกับปัจจัยภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ เช่น ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความต้านทานชั้น และความต้านทานอนุกรม เป็นต้น

(ก) ผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ ตัวอย่างผลกระทบจากความเข้มรังสีอาทิตย์ เซลล์สุริยะเซลล์เดียวกันแต่วัตต์ที่ความเข้มแสงที่ต่างกันคือ 1.5 และ 1.0 อาทิตย์ ดังรูปที่ 2.24 และ รูปที่ 2.25 [16]



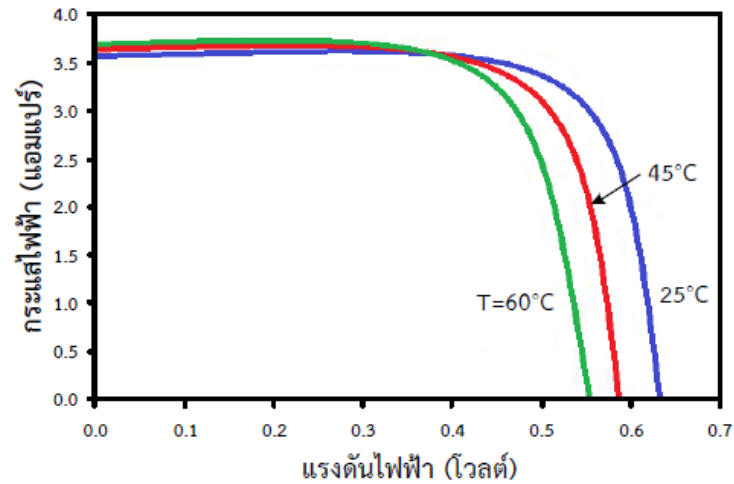
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะที่ความเข้มแสง 1.0 อาทิตย์

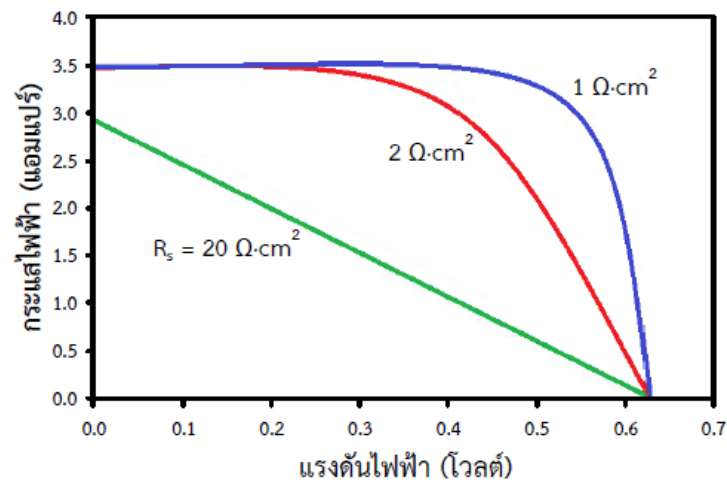
พบว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อย เนื่องจากในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆครึ้ม มีเมฆบดบัง หรือการบังเงาเนื่องจากต้นไม้ เป็นต้น ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรหรือกระแสสูงสุดจะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะลดลง

(ข) ผลของอุณหภูมิ ผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะลดลง เนื่องจากสถานะที่อุณหภูมิสูงระยะห่างของแถบพลังงานจะลดลง เป็นผลให้แรงดันขาออกของเซลล์สุริยะมีค่าน้อยลงแต่ไม่ส่งผลให้กระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงมาก ดังรูปที่ 2.26

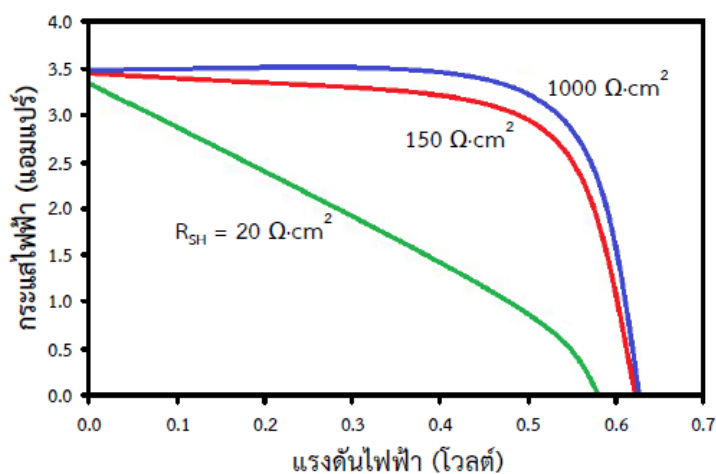


รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่ออุณหภูมิ

(ค) ความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนั้ (R_{sh})



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่อความต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะต่อความต้านทานชั้นที่

ความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันขาออก (V_{max}) มีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าลดลงตาม แต่จะไม่มีผลต่อค่าแรงดันวงจรมืด (V_{oc}) ถ้าความต้านทานมีค่ามากเกินไปจะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าลดลงและลักษณะของกราฟ IV จะกลายเป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 2.27 ส่วนความต้านทานชั้นที่มีค่าน้อยจะทำให้ค่าแรงดันวงจรมืดและค่ากระแสลัดวงจรมีค่าลดลง และจะส่งผลให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลงและลักษณะกราฟ IV จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม แสดงดังรูปที่ 2.28

2.14 เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS)

เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้าหรืออิมพีแดนซ์ของไฟฟ้ากระแสสลับ [17] (AC impedance) ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อวิเคราะห์กระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าและหน้าสัมผัสที่มีความซับซ้อน (Complex interface) หลักการพื้นฐานของเทคนิคอิมพีแดนซ์ คือการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระตุ้นคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave) ที่มีแอมพลิจูดต่ำเข้าสู่ระบบและวัดสัญญาณตอบสนอง สัญญาณกระตุ้นที่นิยมใช้สำหรับเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้ามี 3 แบบ ได้แก่ 1. การป้อนสัญญาณกระตุ้นในรูปของศักย์ไฟฟ้าขั้นบันได (Step function) คือป้อนศักย์ไฟฟ้า $V(t) = V_0$ ที่เวลา $t > 0$ และป้อนศักย์ไฟฟ้า $V(t) = 0$ ที่เวลา $t < 0$ และวัดสัญญาณตอบสนองที่เวลาต่างๆ วิธีการนี้สามารถทำได้ง่ายและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ผิวรอบต่อจะถูกควบคุมด้วย

ศักย์ไฟฟ้า การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จะค่อนข้างยากเนื่องจากไม่มีการควบคุมสเปกตรัมที่ความถี่ต่าง ๆ นอกจากนี้ต้องนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ (Fourier analysis) จึงทำให้การวิเคราะห์ทำได้ยากขึ้น

2. การป้อนสัญญาณในรูปศักย์ไฟฟ้า $V(t)$ ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณรบกวนไวต์ (white noise) แบบสุ่มที่ระยะเวลาสั้น ๆ และวัดกระแสตอบสนอง วิธีการนี้สามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการป้อนสัญญาณเพียงหนึ่งสัญญาณ แต่ต้องใช้สัญญาณรบกวนไวต์ที่เหมาะสมและต้องวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ด้วยการวิเคราะห์ฟูรีเยร์

3. การป้อนสัญญาณในรูปของศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ค่าหนึ่งและวัดแอมพลิจูดและมุมเฟส (Phase) หรือส่วนจริง (Real part) และส่วนจินตภาพ (Imaginary part) ของกระแสไฟฟ้าความถี่นั้น ๆ วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายแล้วนิยามใช้กันมากที่สุด

เริ่มแรกการวัดอิมพีแดนซ์จะวัดภายใต้การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแอมพลิจูดน้อย ๆ เข้าไป การวัดจะวัดออกมาที่ความถี่ต่าง ๆ ของไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal potential) มากกระทำกับสารจึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเป็นฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal current) แต่จะมีเฟสที่ต่างกับศักย์ไฟฟ้า ดังสมการ (2.8) และสมการ (2.9) รูปที่ 2.29

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t)$$

สมการ 2.8

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi)$$

สมการ 2.9

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ $V(t)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เวลา t ใด ๆ

V_0 คือ แอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า

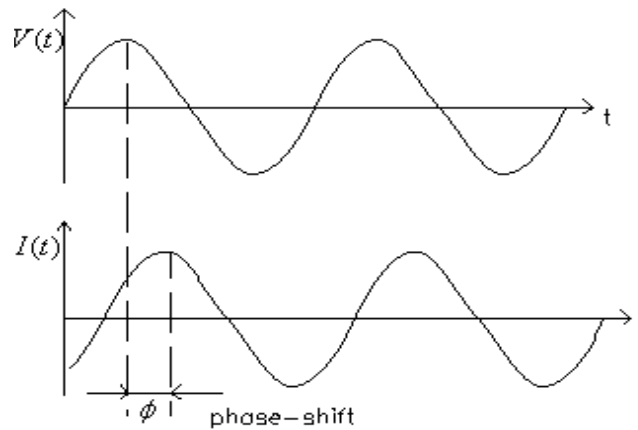
$I(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t ใด ๆ

I_0 คือ แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้า

ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม

ϕ คือ ความต่างเฟส

t คือ เวลาใด ๆ



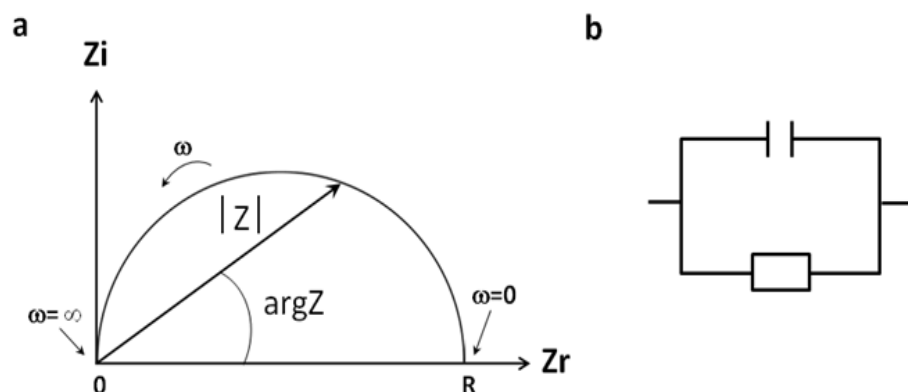
รูปที่ 2.29 ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฟังก์ชันไซน์ในวงจรกระแสล้าที่มีความต่างเฟส ϕ

จากกฎของโอห์ม Z สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.10)

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos \omega \phi} = Z_0 \frac{\cos \omega t}{\cos \omega \phi} = Z_0 \exp(i\phi) = Z_0(\cos \phi + i \sin \phi)$$

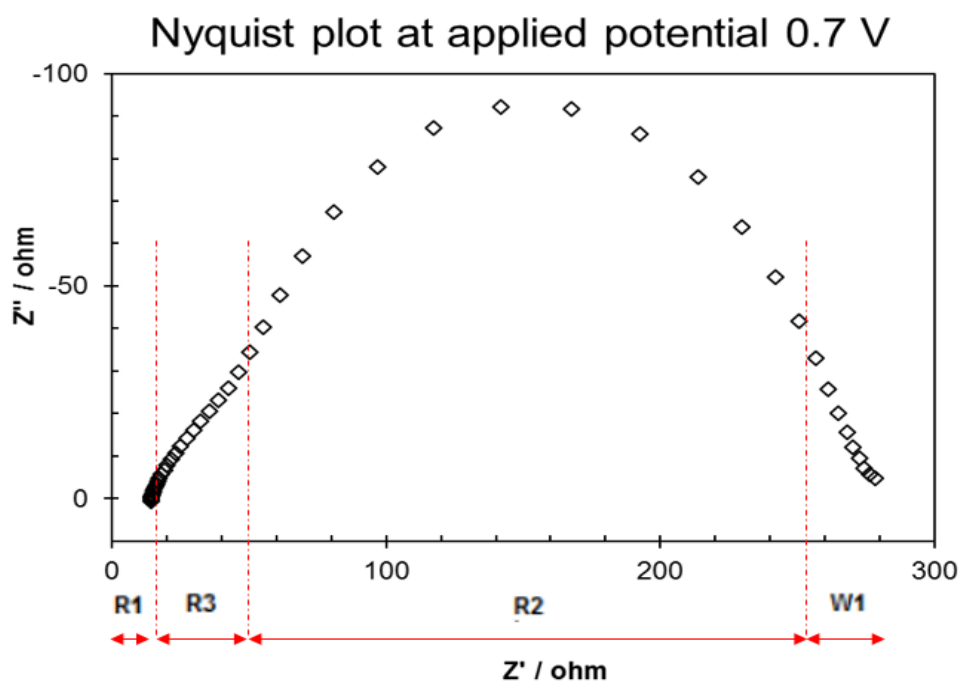
สมการ 2.10 เมื่อ Z_0 คือ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

จะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อน Z จะขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อัตราเร็วเชิงมุม และความต่างเฟส ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน สำหรับค่า Z ในเซลล์ไฟฟ้า เคมีนั้น เมื่อนำ ส่วนจริง (real part) มาพล็อตในแกน x และส่วนจินตภาพ (imaginary part) มาพล็อตในแกน y จะได้กราฟที่เรียกว่า Nyquist plot โดยที่แกน y จะเป็นค่าลบและแต่ละจุดของกราฟจะแทนค่า Z ที่ความถี่ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.30

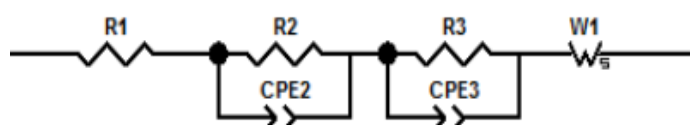


รูปที่ 2.30 a) Nyquist plot ของวงจร และ b) วงจรตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์ในการศึกษาความต้านทานภายในของ DSSCs นั้น ปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างมากเพื่อศึกษาความต้านทานของหน้าสัมผัสในส่วน สารกึ่งตัวนำ สีย้อม อิเล็กโทรไลต์ และความต้านทานของหน้าสัมผัสระหว่างแพลทินัมกับอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำ ๆ ซึ่งตามทฤษฎีจะทำให้ได้ Nyquist plot ที่ประกอบไปด้วย ครึ่งวงกลมสามวงเรียงต่อกัน แต่ละครึ่งวงกลมแสดงถึงการถ่ายเทประจุในแต่ละส่วนของเซลล์ ในช่วงความถี่สูงแสดงถึงการถ่ายเทประจุบริเวณแคโทดรีดอกซ์อิเล็กโทรด ช่วงความถี่ปานกลางแสดงถึงการถ่ายเทประจุบริเวณสารกึ่งตัวนำและช่วงความถี่ต่ำ แสดงถึงการถ่ายเทประจุภายในอิเล็กโทรไลต์ แต่ในบางครั้งครึ่งวงกลมที่ความถี่ต่ำอาจถูกกลืนไปด้วยครึ่งวงกลมความถี่ปานกลาง กราฟ Nyquist plot ที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.7 โวลต์ ประกอบด้วยความต้านทานในแนวแกน x และความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุในแนวแกน y ซึ่งความต้านทานในแกน x นั้นแต่ละช่วงความถี่เป็นความต้านทานในแต่ละส่วนของหน้าสัมผัสในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง แสดงดังรูปที่ 2.31 และรูปแบบวงจรสำหรับการฟิตติ้งผลการทดลอง EIS แสดงดังรูปที่ 2.32

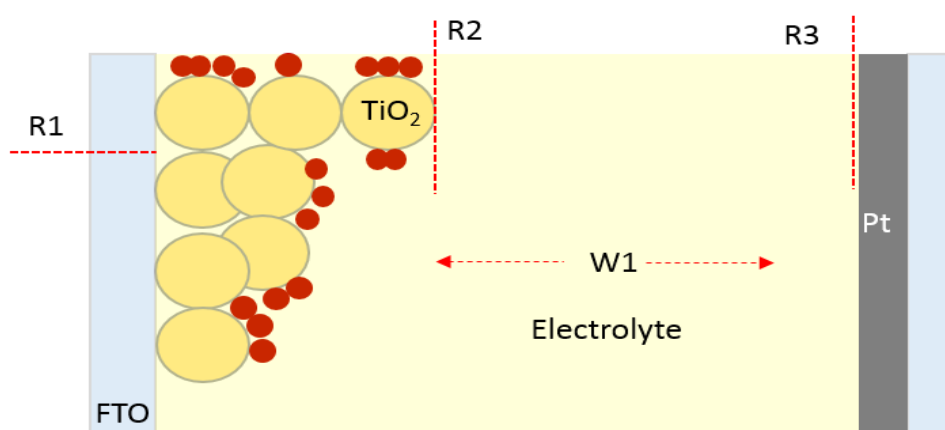


รูปที่ 2.31 แสดง Nyquist plot ทัวไปของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 2.32 รูปแบบวงจรสำหรับการฟิตติ้งผลการทดลอง EIS

ค่าความต้านทานในแต่ละช่วงความถี่ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยสามารถเขียนค่าความต้านทานได้ 4 ค่า ได้แก่ ค่า R1 คือค่าความต้านทานเริ่มต้นของกระจกที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้า (FTO) ช่วงความถี่ประมาณ 1 MHz, ค่า R3 คือค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างโลหะแพลทินัมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว (CE/EL) ช่วงความถี่สูงประมาณ 1-100 kHz, ค่า R2 คือค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว (TiO_2/EL) ช่วงความถี่ประมาณ 1-100 Hz และค่า W1 คือค่าความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว (Warburg resistance) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ต่ำประมาณ 100 mHz ค่าความต้านทานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ณ บริเวณหน้าสัมผัสของทั้ง 4 ค่าที่กล่าวมาข้างต้น แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสและค่าความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Songyuan และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของการออกแบบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงรูปแบบแถบขนาดพื้นที่รับแสง 10.2 cm^2 และรูปแบบโมดูลขนาดพื้นที่รับแสง 187.2 cm^2 จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าการออกแบบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้นทำให้ค่า Fill Factor (FF) ของเซลล์สุริยะลดลงจาก 68.4% เป็น 59% ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (Power Conversion Efficiency: PCE) ลดลงจาก 7.4% เป็น 5.9% และค่าความหนาแน่นกระแสแสงจล (J_{sc}) ลดลงจาก 15.4 mA/cm^2 เป็น 13.4 mA/cm^2 เนื่องจากจากเซลล์สุริยะแบบโมดูลมีความว่องไวต่อความต้านทานของแถบเชื่อมกระแส (Silver bus-bar และ Silver finger)

Kim H. และคณะ [19] ได้ออกแบบรูปแบบสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสี่ขั้วอมไวแสงขนาดใหญ่และแบบมอดูลสำหรับใช้เป็น building-integrated photovoltaic (BIPV) เริ่มต้นได้ประกอบเซลล์ทดสอบขนาดเล็ก (9 x 5 mm) โดยใช้เทคนิค EIS (electrochemical impedance spectroscopy) และวัดค่าคุณสมบัติเชิงแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งวงจรรพื้นฐานของเซลล์สุริยะมาตรฐานถูกสร้างขึ้นในหน่วยเซลล์ เพื่อนำไปสร้าง 2-dimensional โมเดลวงจรมูลของเซลล์สุริยะมอดูลขนาดใหญ่ชนิด Z-type (ขนาด 300 x 300 mm) พบว่าจากโปรแกรม simulation ที่ใช้ออกแบบตัวเซลล์มอดูลให้ประสิทธิภาพโดยรวม 3.3% และให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ 448 กิโลวัตต์/ตร.ม. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาี้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการทำงานของเซลล์สุริยะมอดูลขนาดใหญ่ภายใต้สภาพแวดล้อมตามบริเวณท้องถิ่น

Escalante R. และคณะ [20] งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการสร้างเซลล์สุริยะที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.5 cm² ให้มีประสิทธิภาพโดยรวมสูง และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขยายขนาดเซลล์สุริยะแบบมอดูลที่มีขนาด 6 x 8 cm² พบว่าเซลล์สุริยะที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.5 cm² ให้ประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 7.8% ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 15 mA/cm² ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด 0.75 V และค่า Fill Factor 69% ในการขยายขนาดของเซลล์สุริยะให้มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นควรให้ความสำคัญกับความต้านทานภายนอกของเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้า transparent conducting oxide substrate (FTO) และหนึ่งในขั้นตอนที่ถูกใช้สำหรับการประกอบเซลล์สุริยะมีขนาดพื้นที่รับแสง 0.5 cm² ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงนั้นคือการกระตุ้น FTO (the activation of FTO) พบว่าเซลล์สุริยะให้ประสิทธิภาพดีขึ้นจากเดิม 5% เป็น 7.8% ซึ่งเราจะนำขั้นตอน activation นี้ไปใช้ในการประกอบเซลล์สุริยะที่มีขนาดใหญ่ จากผลทดลองสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างตัวรวมกระแสไฟฟ้า (silver lines) 2 อัน เพิ่มมากขึ้นทำให้เซลล์ทดสอบที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.5 cm² มีค่า Fill factor ที่ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำลง ส่วนเซลล์สุริยะที่มีขนาดใหญ่แบบมอดูลที่มีการใช้ตัวรวมกระแสไฟฟ้า เบื้องต้นพบว่าให้กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 111 mA

Jinbiao J. และ คณะ [21] ได้ศึกษาผลของการใช้ Nickel selenide (Ni_{0.85}Se) เพื่อนำมาใช้แทนแพลททินัมในส่วนขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะชนิดสี่ขั้วอมไวแสง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาทางด้านต้นทุนในการผลิตเนื่องจากแพลททินัมนั้นมีราคาแพง Ni_{0.85}Se ที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาค 200 นาโนเมตร

ลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ดังนั้น $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เมื่อนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงจะช่วยเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไตรโอดดีไอออนและช่วยเพิ่มค่าการเร่งปฏิกิริยาของตัวนำไฟฟ้า จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะ พบว่าเซลล์ DSSC ที่ใช้ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมวัดค่าความต่างศักย์วงจรมืด (V_{oc}) เป็น 0.78 V ค่าความหนาแน่นกระแสแสงจลปิด (J_{sc}) เป็น 16.39 mA/cm^2 และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน 8.88% ส่วนเซลล์ DSSC ที่ใช้แพลททินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมวัดค่าความต่างศักย์วงจรมืดเป็น 0.799 V ค่าความหนาแน่นกระแสแสงจลปิดเป็น 15.55 mA/cm^2 และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน 8.13% แสดงให้เห็นว่าเซลล์ DSSC ที่ใช้ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าเซลล์ DSSC ที่ใช้แพลททินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม นอกจากนี้เซลล์ DSSC ที่ใช้ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมสามารถติดกระจกสะท้อนแสงบนส่วนล่างของขั้วไฟฟ้าร่วม ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{mirror}$) วัดค่าความต่างศักย์วงจรมืดเป็น 0.791 V ค่าความหนาแน่นกระแสแสงจลปิดเป็น 18.44 mA/cm^2 และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน 10.19% แสดงให้เห็นว่าเซลล์ DSSC ที่ใช้ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{mirror}$ เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงจลปิดและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงขึ้นเนื่องจาก $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ เป็นส่วนที่มีความโปร่งใสสูงและทำให้แสงสะท้อนมากขึ้นจากการใช้กระจกสะท้อน

Gong F., และคณะ [8] ได้พัฒนาขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยขั้วไฟฟ้าร่วมจะใช้วัสดุเซเลไนต์ ได้แก่ โคบอลเซเลไนต์ ($\text{Co}_{0.85}\text{Se}$) และ นิกเกิลเซเลไนต์ ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) ซึ่งวัสดุเซเลไนต์นี้ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าเซลล์สุริยะทดสอบที่ใช้โคบอลเซเลไนต์เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมให้ประสิทธิภาพรวมมีค่าสูงถึง 9.4 % และนิกเกิลเซเลไนต์ให้ประสิทธิภาพรวม 8.3 % ส่วนโลหะแพลททินัมให้ประสิทธิภาพรวม 8.6 % ซึ่งขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้วัสดุเซเลไนต์นั้นให้ผลที่ดีเทียบเท่ากับเซลล์สุริยะที่ใช้โลหะแพลททินัม

Nagaraj P. และ คณะ [22] ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (Gel Polymer Electrolyte; GPE) แทนอิเล็กโทรไลต์เหลว (Liquid Electrolyte) ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์เหลว เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Poly (ethylene oxide) และ Li/I_2 โดยมีการผสมสาร Acetamide ตามปริมาณที่กำหนด เป็น 0% , 2% , 4% , 5% , 6% และ 8% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการ

ทำงานของเซลล์สุริยะพบว่าเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีการผสมปริมาณ Acetamide 5% โดยน้ำหนักให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ($V_{oc} = 744$ mV, $J_{sc} = 19.81$ mA/cm², FF = 0.52 และ PCE = 9.01%) ในการเพิ่มสาร Acetamide ลงใน GPE ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสจลน์ ค่าความต่างศักย์วงจรเปิดและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสาร Acetamide ลงใน GPE ทำให้โครงสร้างสัณฐานของ GPE เกิดการเปลี่ยนแปลงและปริมาตรช่องว่างใน GPE เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไตรโอดิต์และค่าการเหนี่ยวนำของไอออนเพิ่มขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาของ PEO (Polyethylene oxide) กับ Acetamide ทำให้ความเป็นผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง แต่เมื่อเพิ่มสาร Acetamide มากเกินไปจะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสจลน์ ค่าความต่างศักย์วงจรเปิดและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานลดลงเนื่องจากเกิดการกีดขวางของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไตรโอดิต์ไอออนและ Acetamide

Ananathraj G. และคณะ [23] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เสถียร คือ polyethylene oxide (PEO) กับ poly(ethylene glycol) (PEG) ในการเตรียมเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ใช้ PEO กับ PEG ที่มีการใช้ alkali iodides (LiI, NaI or KI) อย่างใดอย่างหนึ่ง เพิ่มสาร 1,2-dimethyl-3-propyl imidazolium iodide (DMPI), 4-tertbutylpyridine (TBP) และ iodine โดยใช้สาร acetonitrile เป็นตัวทำละลายนำเจลพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นั้นไปศึกษาการเหนี่ยวนำไอออนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไตรโอดิต์ไอออนในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งวัดได้ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) พบว่าเซลล์ DSSC ที่ใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (PEO-PEG) ที่มีการใช้ NaI ให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวม (PCE) 5.4% และเมื่อใช้ nanocrystalline TiO₂ เป็นตัว filler ในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (PEO-PEG) พบว่าทำให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น PCE 6.3% ส่วนความเสถียรภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (PEO-PEG) นั้นพบว่าสามารถใช้งานเซลล์สุริยะได้ประมาณ 600 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะแวดล้อม

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- อะเซตามิด์ (Acetamide), ~99% (GC), Sigma-aldrich
- พอลิเอทิลีน ออกไซด์ (Polyethylene oxide), Mw ~100,000 Powder, Sigma-aldrich
- โพรพิลีนคาร์บอเนต (Propylene carbonate), Anhydrous 99.7%, Sigma-aldrich
- นิกเกิลคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), ReagentPlus, Sigma-aldrich
- โซเดียมซีลีไนด์ เพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{Se}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), $\geq 99.0\%$ (RT), Sigma-aldrich
- ไฮดราซีนไฮเดรต (Hydrazine hydrate), reagent grade N_2H_4 50-60%, Sigma-aldrich
- โซเดียมไอโอดัด (Sodium iodide)
- เกล็ดไอโอดีน (Iodine Resublimed)
- กรดคลอโรแพลตินิก [Hexachloroplatinic (IV) Acid], Merck, Germany.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ [Titanium (IV) chloride], Merck, Germany.
- ที-บิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert-Butyl Alcohol), Panreac.
- ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol), commercial 96%, Alcoh-A.
- อะซิโตนไตรรล์ (Acetonitrile), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- สีย้อมไวแสง [Z907 Hydrophobic Dye ($\text{C}_{42}\text{H}_{52}\text{N}_6\text{O}_4\text{RuS}_2$)], Dyesol.
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ [EL-HPE High Performance Electrolyte (I-/I3-)], Dyesol.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide), P25, Qrec.
- สีเงิน (Silver paste)

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- กระดาษเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol.

- แผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn), 60 μm thickness.
- เทปกาวสองหน้า (Adhesive tape)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- เตาเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany
- อุปกรณ์สกรีน ซัยบูร์ณ, ประเทศไทย
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany
- เตาให้ความร้อน (Hot plate) OkWell, ประเทศไทย
- อ่างอัลตราโซนิก 1860QTD, VGT, China
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA
- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- อุปกรณ์ในการ Reflux
- ตู้ประกอบเซลล์
- อุปกรณ์ตัดกระดาษ
- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) มหาวิทยาลัย
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland
- เครื่อง Ultrasonic processor

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

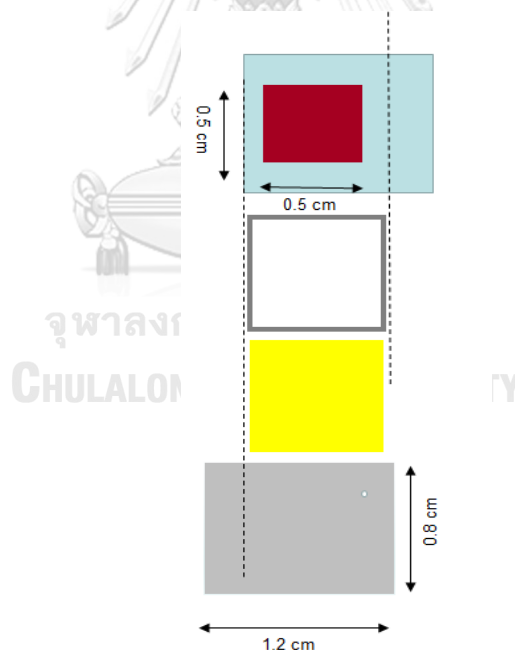
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer), Biochrom Libra S22, UK.
- เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic), SMU, Keithley, USA.
- ไชคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry), Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.
- เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [Scanning Electron Microscope] Model JSM6480LV, JEOL
- เครื่อง Differential scanning calorimeter, DSC204 F1 Phoenix, NETZSCH, Ger.
- เครื่องวัดค่าความต้านทานของการถ่ายเทอิเล็กตรอน Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.

3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมความพร้อมของผู้ปฏิบัติงานวิจัย

การเตรียมความพร้อมของผู้ปฏิบัติงานวิจัย โดยการสร้างมาตรฐานของงานวิจัยเริ่มจากประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง โดยส่วนประกอบหลักของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงแสดงดังรูปที่ 3.1 การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบเซลล์ทดสอบ DSSC เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการหลักสำหรับการวิจัยมีดังนี้



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

(ก) อุปกรณ์ตัดและเจาะกระดาษ - ทั้งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเองได้แก่แท่นและมีดตัดกระดาษที่สามารถใช้ตัดกระดาษในแนวเส้นตรงและอุปกรณ์ที่จัดซื้อได้แก่ส่วนไฟฟ้าเจาะกระดาษใช้ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 - 1 มิลลิเมตร

- (ข) อุปกรณ์เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง (photoanode) – ประกอบด้วยแผ่นพิมพ์สกรีนและบล็อกสกรีน ฝ้ายสังเคราะห์ขนาด mesh 90T ใช้สำหรับพิมพ์ฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีความหนา ระดับไมโครเมตรลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO glass)
- (ค) อุปกรณ์เตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม (counter electrode) – ประกอบด้วยปืนลมร้อน (hot gun) ใช้งาน ในช่วงอุณหภูมิ 450– 550°C และท่อแก้วบังคับทิศทางลมร้อน
- (ง) อุปกรณ์ประกอบเซลล์ทดสอบ – ใช้ประกอบเซลล์ทดสอบ DSSC โดยการอัดร้อน (hot press) ที่ อุณหภูมิ $\sim 100^\circ\text{C}$

3.5.2 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสียอมไวแสง

ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสียอมไวแสงระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเตรียมความพร้อมของผู้ปฏิบัติงานวิจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์ทดสอบมาตรฐานชนิดสียอมไวแสงที่ได้จะใช้เป็นค่ามาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับผลของเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนประกอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

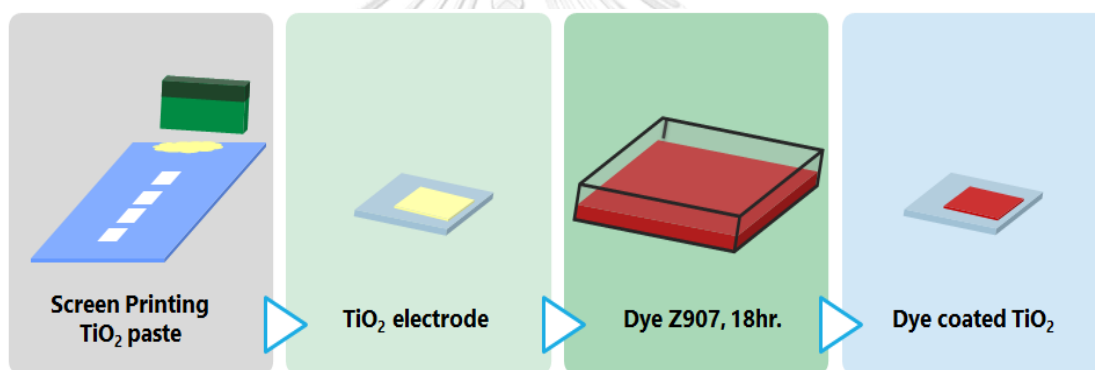
3.5.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (fluorene-doped tin oxide: FTO) ขนาด 1.2×0.8 ตารางเซนติเมตร แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และผ่านการโซนิเคชันด้วยน้ำปราศจากอออนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่าง ๆ ออกจากกระจก ล้างด้วยน้ำปราศจากอออน แล้วตากให้แห้ง นำกระจกที่เตรียมไว้แช่ลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 มิลลิโมลาร์ ที่เตรียมด้วยน้ำปราศจากอออนที่เย็น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากอออนแล้วตากให้แห้ง

นำกระจกที่เตรียมไว้มาสกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร (titania paste 20 nm) พื้นที่ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยใช้บล็อกสกรีน (mesh 90T) จากนั้นวางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที วางทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาสกรีนซ้ำ 2 - 3 รอบ นำกระจกที่ผ่านการสกรีนไปเผา โดยใช้อุณหภูมิและเวลาดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น

จนถึงอุณหภูมิห้อง นำกระจกที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 มิลลิโมลาร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากอออนแล้วตากให้แห้ง

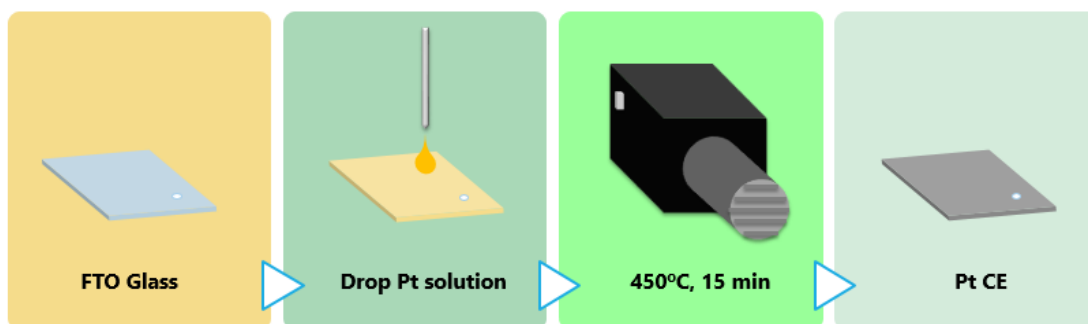
เตรียมสีย้อมไวแสงชนิด Z907 Hydrophobic Dye ความเข้มข้น 0.3 มิลลิโมลาร์ ในตัวทำละลายผสมระหว่างอะซิโตนไตรลกับเติร์ตบิวทิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร นำกระจกที่เตรียมไว้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงที่อุณหภูมิห้อง แช่ทิ้งไว้ประมาณ 18 ชั่วโมงในสภาพมืด เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจึงนำออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไตรล เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงที่ไม่ถูกดูดซับ (adsorption) เมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงแล้วเสร็จจะได้ขั้วไฟฟ้ารับแสงแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

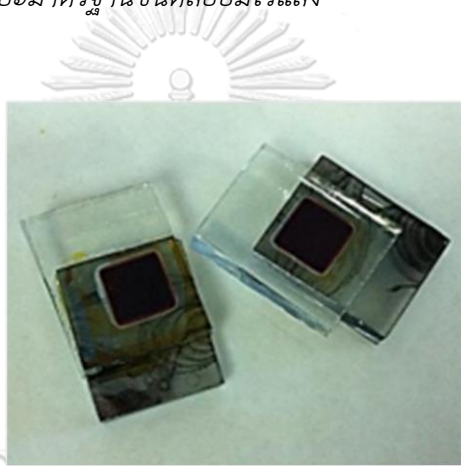
3.5.2.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 1.2×0.8 ตารางเซนติเมตร เจาะรูขนาดเล็กบริเวณมุมของกระจก แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่าง ๆ ออกจากกระจก ล้างด้วยน้ำปราศจากอออน จากนั้นตากให้แห้ง หยดสารละลายแพลทินัมที่เตรียมจากกรดเฮกซะคลอโรแพลททินิก ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้าและใช้ปืนลมร้อนให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แสดงดังรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ให้เย็น



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแคโทดรีเล็กโทรด์

3.5.2.3 การประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 3.4 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบสำเร็จ

เริ่มจากนำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่แช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไตรล์ 5 นาที เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงส่วนที่ไม่ได้ยึดเกาะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ออก ตากจนขั้วไฟฟ้ารับแสงแห้ง แล้วนำมาประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมที่เตรียมไว้ด้วยแผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn) ความหนาประมาณ 60 ไมครอน โดยการใช้เครื่องอัดร้อนที่ให้ความร้อนระยะสั้นอุณหภูมิ ~100 องศาเซลเซียส กับแผ่นเทอร์โมพลาสติกเพื่อเชื่อมขั้วทั้งสองขั้วให้ติดกัน จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในรูที่เจาะเตรียมไว้บนขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศ ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกดึงออกและปิดรูที่ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบสำเร็จดังรูปที่ 3.4

3.5.2.4 การทดสอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ขั้วอมไวแสง

ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสี่ขั้วอมไวแสงโดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.)

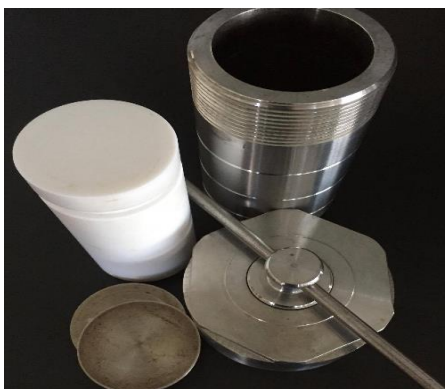
วิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเคมีไฟฟ้า (EIS, Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.) ในสภาวะมืดที่อุณหภูมิ 25 °C ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 1 mHz – 1 MHz กำหนดค่าความต่างศักย์ 0.1 – 0.7 โวลต์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Z-view

3.5.3 เซลล์สุริยะชนิดสี่ขั้วอมไวแสงที่ปรับปรุงขั้วไฟฟาร่วมระดับห้องปฏิบัติการ

ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟาร่วมระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะศึกษาผลของการใช้ Nickel selenide เป็นขั้วไฟฟาร่วมใน DSSC สารประกอบ Nickel selenide ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) มีความโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ดี สามารถนำมาผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วมสำหรับ DSSC ทดแทนการใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาแพง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเซลล์สุริยะขนาดใหญ่

3.5.3.1 การเตรียม Nickel selenide

เตรียมสารประกอบ Nickel selenide ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) สารตั้งต้นที่ใช้คือ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{Se}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วนโดยโมล 1:3 เริ่มจากละลาย $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร โดยใช้ภาชนะ Teflon-lined autoclave สำหรับใช้ในการทำไฮโดรเทอร์มอล ดังรูปที่ 3.5 เติมนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อปรับค่า pH=14 กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเติมนสาร $\text{Na}_2\text{Se}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ กวนผสม 5 นาที เติมน $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (50%) 10 มิลลิลิตร กวนผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนที่ 120 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนำไปกรองจะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ



รูปที่ 3.5 ภาพขณะ Teflon-lined autoclave

3.5.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 1.2×0.8 ตารางเซนติเมตร เจาะรูขนาดเล็กบริเวณมุมของกระจก แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่าง ๆ ออกจากกระจก ล้างด้วยน้ำปราศจากอิมอน จากนั้นตากให้แห้ง ติดเทปใสแบบบางลงบนกระจกด้านที่นำไฟฟ้า เพื่อเป็นกรอบสำหรับกำหนดพื้นที่สารนำสารประกอบ Nickel selenide ($\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$) ไปบัดเป็ยกด้วยเอทานอล A.R. เกรด แล้วทำ การ disperse ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหยดสาร (Drop cast) ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมไว้และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

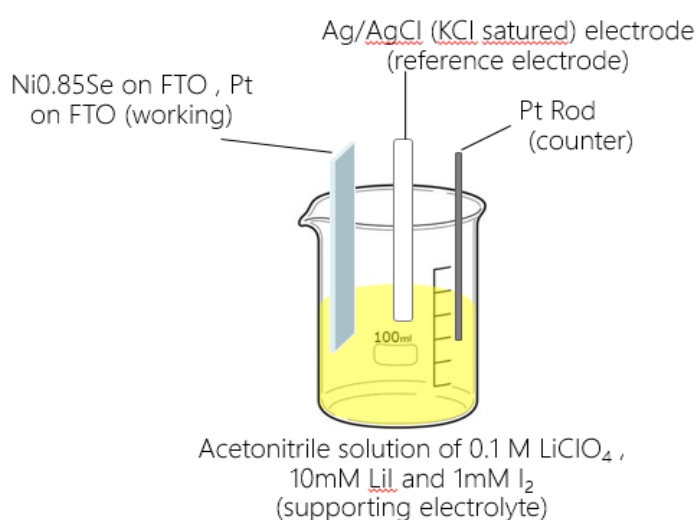
3.5.3.3 การประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วม

ประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมระดับห้องปฏิบัติการจะประกอบเซลล์คล้ายกับการประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐาน 3.5.2.3

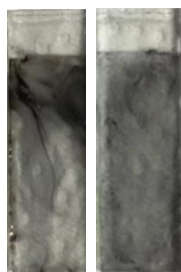
3.5.3.4 การวิเคราะห์สารที่เตรียมได้และการทดสอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วม

ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance โครงสร้างสัณฐานของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [Scan Scanning Electron Microscope], Model JSM6480LV, JEOL และ การรีดิวซ์และการ

ออกไซด์ของสาร Nickel selenide ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry), Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger. ซึ่งจะเซตอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.6 ส่วนการเตรียมขั้วทำงาน (working electrode) เพื่อใช้ทดสอบเตรียมดังรูปที่ 3.7 ทดสอบประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.) และวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณ หน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS, Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.) ในสภาวะมืดที่อุณหภูมิ 25 °C ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 1 mHz – 1 MHz กำหนดค่าความต่างศักย์ 0.1 – 0.7 โวลต์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล ด้วยโปรแกรม Z-view



รูปที่ 3.6 วิธีการเซตอุปกรณ์และสารที่ใช้ในการทำไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูปที่ 3.7 การเตรียมขั้วในฝั่ง working

3.5.4 เซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับห้องปฏิบัติการ

ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะศึกษาผลของการใช้ GPE แทนอิเล็กโทรไลต์เหลว (Liquid Electrolyte) ใน DSSC เพื่อแก้ปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์เหลวเมื่อประกอบเป็นเซลล์สุริยะขนาดใหญ่

3.5.4.1 การเตรียม GPE

เตรียม GPE ด้วยวิธีรีฟลักซ์ เริ่มจากผสม Poly(Ethylene oxide) 0.53 กรัม กับ Acetonitrile และ Propylene carbonate (20:1 v/v) กวนผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารคูรีดอกซ์ไอโอดีน/ไตรไอโอดีนเตรียมจาก NaI 0.224 กรัม I_2 0.04 กรัม และเติมสาร Acetamide ตาม % ที่กำหนดไว้ (0%, 5%, 8%, 10% โดยน้ำหนักของ PEO) รีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนสังเกตเห็นสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นกวนผสมทิ้งไว้ข้ามคืน แล้วระเหย Acetonitrile ด้วยเครื่องระเหยสารแบบลดความดันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.5.4.2 การประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับห้องปฏิบัติการจะใช้เทปกาวสองหน้าแบบบาง แทนการใช้แผ่นเทอร์โมพลาสติก การประกอบเซลล์ทดสอบจะต้องใช้ GPE ในปริมาณที่พอดีกับขนาดพื้นที่ บรรจุมารอิเล็กโทรไลต์

3.5.4.3 การวิเคราะห์สารที่เตรียมได้และการทดสอบ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ GPE ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter, Model DSC204 F1 Phoenix, NETZSCH, Ger. และ ศึกษาค่าการเหนี่ยวนำไอออน (Ionic conductivity) ของ GPE ที่เตรียมได้โดยใช้มัลติมิเตอร์ แสดงดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 หน่วยวัดพื้นฐานของเครื่องมัลติมิเตอร์

มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เป็นเครื่องมือปริมาณทางไฟฟ้าซึ่งจะประกอบไปด้วยหน่วยวัดหลาย ๆ หน่วยรวมอยู่ในเครื่องเดียวกันมี รายละเอียดต่อไปนี้

1. หน่วยวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ มีหน่วยวัดเป็น โวลต์ (V) มีสัญลักษณ์ที่ใช้ในเครื่องมัลติมิเตอร์ คือ V (Voltage)
2. หน่วยวัดความต้านทาน มีหน่วยวัดเป็น โอห์ม (Ω) สัญลักษณ์ที่ใช้ในเครื่องมัลติมิเตอร์ คือ Ω
3. หน่วยวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีหน่วยวัดเป็น มิลลิแอมแปร์ (mA) หรือแอมแปร์ (A) มีสัญลักษณ์ที่ใช้ในเครื่องมัลติมิเตอร์ คือ Am

ใช้มัลติมิเตอร์ อ่านค่าความต้านทาน ในการปรับสวิตช์มัลติมิเตอร์ให้อ่านค่าความต้านทานจากรูปที่

3.7 จะมีย่านการวัดทั้งหมด 4 ย่านดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การตั้งย่านการวัดให้เหมาะสมต่อการวัดค่าความต้านทาน

ย่านการวัด	ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่ใช้วัดได้
x 1	0.2 Ω - 2k Ω
x 10	2 Ω - 20k Ω
x 1K	200 Ω - 2 M Ω
x 10K	200k Ω - 20 M Ω

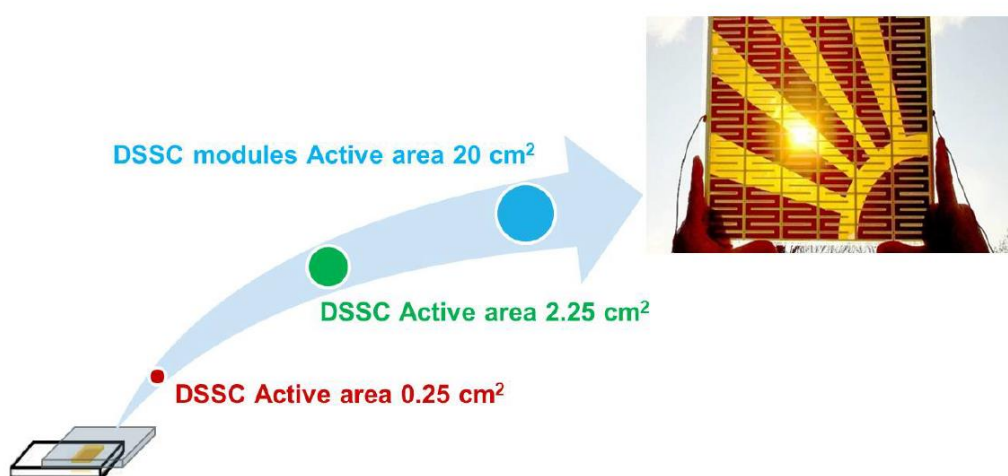
การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าใน GPE เลือกใช้ย่านการวัด X10 คือ ค่าต่ำสุด 2 โอห์มถึงค่าสูงสุด 20 กิโลโอห์มแปลงค่าความต้านทานเป็นการเหนี่ยวนำไอออนได้จากสมการที่ (4.3) ทดสอบประสิทธิภาพ

ของ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.) และวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS, Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.) ในสภาวะมืดที่อุณหภูมิ 25 °C ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 1 mHz – 1 MHz กำหนดค่าความต่างศักย์ 0.1 – 0.7 โวลต์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Z-view

3.5.5 เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับห้องปฏิบัติการ

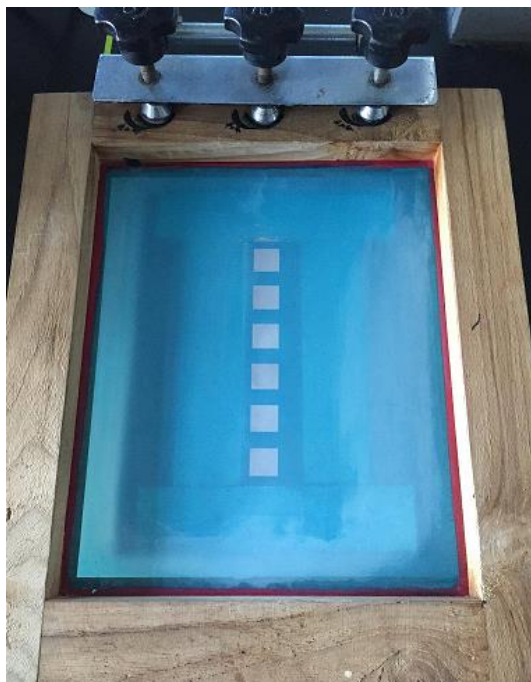
ประกอบและวิเคราะห์สมรรถนะของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะประกอบเซลล์คล้ายกับการประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์และทดสอบประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.) จากนั้นวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS, Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.) ในสภาวะมืดที่อุณหภูมิ 25 °C ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 1 mHz – 1 MHz กำหนดค่าความต่างศักย์ 0.1 – 0.7 โวลต์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Z-view

3.5.6 ออกแบบและทดสอบมอดูลเซลล์ DSSC ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดไม่เกิน 30 x 30 cm²



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกแบบโดยเพิ่มพื้นที่รับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

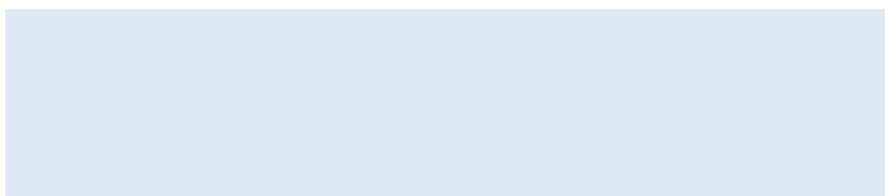
จากขั้นตอนการออกแบบรูปที่ 3.9 ในการขยายขนาด DSSC โดยการเพิ่มพื้นที่รับแสงฝั่งแอโนดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะขยายขนาดโดยการเพิ่มพื้นที่รับแสงเป็น 2.25 cm^2 (โดยใช้บล็อกสกรีนมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจากระดับห้องปฏิบัติการ 9 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.10)



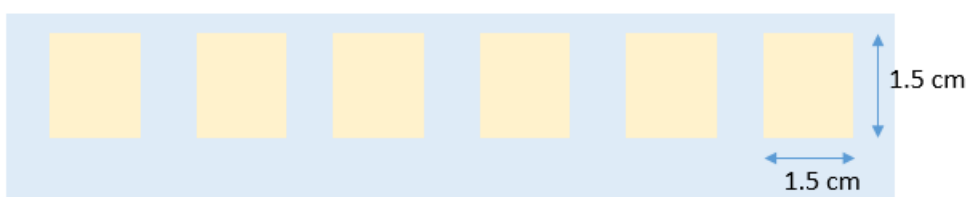
รูปที่ 3.10 บล็อกสกรีนมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจากระดับห้องปฏิบัติการ 9 เท่า

เริ่มด้วยส่วนของขั้วไฟฟ้ารับแสง ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งวิธีการเตรียมจะคล้ายกับส่วนของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะมาตรฐานก่อนหน้านี้ (3.5.2.1)

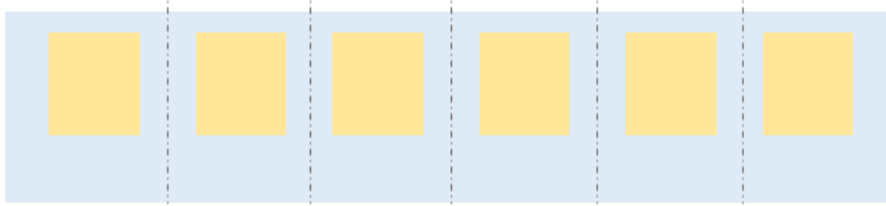
ก)



ข)



ค)

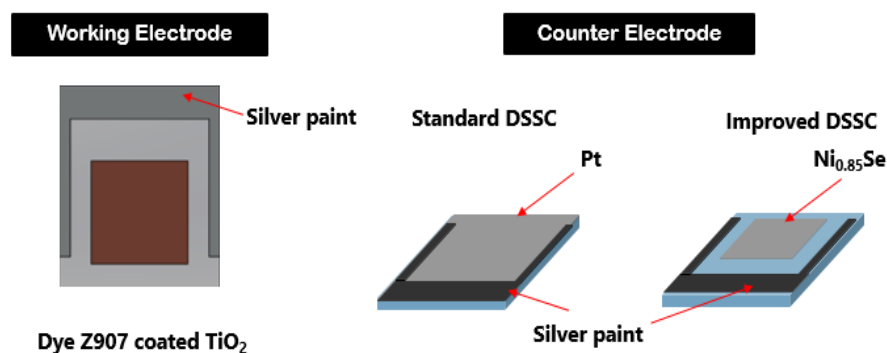


ง)



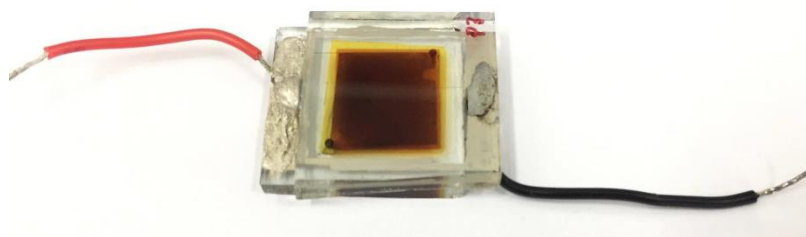
รูปที่ 3.11 ลำดับการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง
ที่มีพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 ก) Pretreatment FTO ข) พิมพ์สกรีน TiO_2
ค) หลังจากผ่านการเผ่า ง) หลังจากแช่ Dye Z907

ส่วนขั้วไฟฟาร่วม ขั้นตอนวิธีการเตรียมคล้ายกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงส่วนขั้วไฟฟ้า แต่ในการขยายขนาดเซลล์สุริยะนั้นจำเป็นต้องทำสี่เหลี่ยมเงิน ดังรูปที่ 3.12 เพื่อลดความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขนาดของกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสงและ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟาร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2



รูปที่ 3.12 การทำสี่เหลี่ยมเงินบนเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ประกอบ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 คล้ายกับการประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ ได้เป็นเซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์พื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 ที่ประกอบสำเร็จ แสดงดังรูป 3.13 จากนั้นทดสอบเซลล์ด้วยเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.)



รูปที่ 3.13 เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์พื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 ที่ประกอบสำเร็จ

บทที่ 4

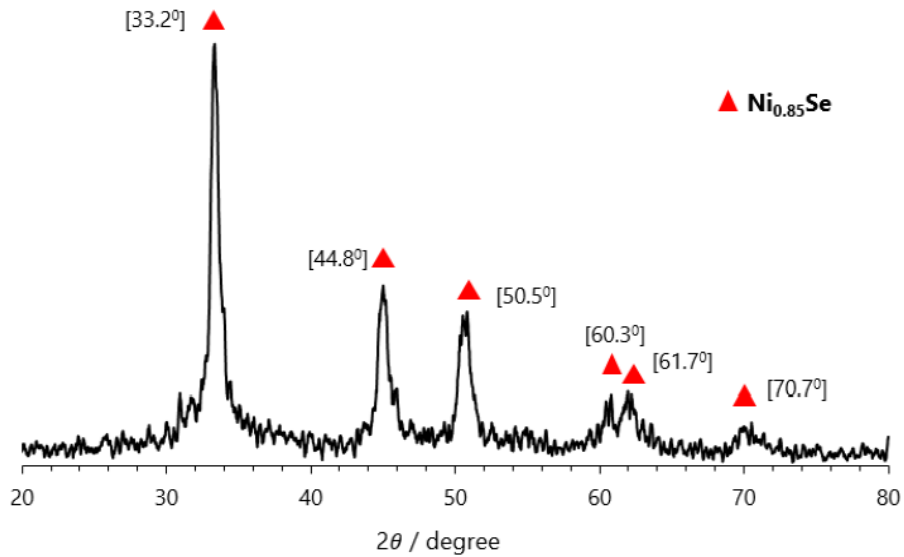
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพัฒนาต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเซลล์สุริยะขนาดใหญ่ หนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตคือต้นทุนที่ใช้ในการผลิตโดยเลือกใช้สารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมใน DSSC เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ผลของสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมขึ้นเอง ใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาความโปร่งแสงของสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้เทียบกับแพลทินัมด้วย ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และศึกษาการรีดิวซ์และการออกซิไดซ์ของขั้วนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้เทียบกับขั้วแพลทินัมด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ปัจจัยที่สองคือเสถียรภาพของเซลล์สุริยะโดยเลือกใช้ GPE แทนการใช้อิเล็กโทรไลต์เหลว เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ GPE ที่ไม่มีการผสมและมีการผสมสารอะเซตาไมด์ ศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ศึกษาการเหนี่ยวนำไอออน จากนั้นทดสอบสมรรถนะของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้าในสภาวะมืด เส้นทางการผลิตต้นแบบมอดูล DSSC ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ นั้น เริ่มจากศึกษาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน โดยมีพื้นที่รับแสงเป็น 2.25 cm^2 (เพิ่มขึ้นจากระดับห้องปฏิบัติการ 9 เท่า)

4.1 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้

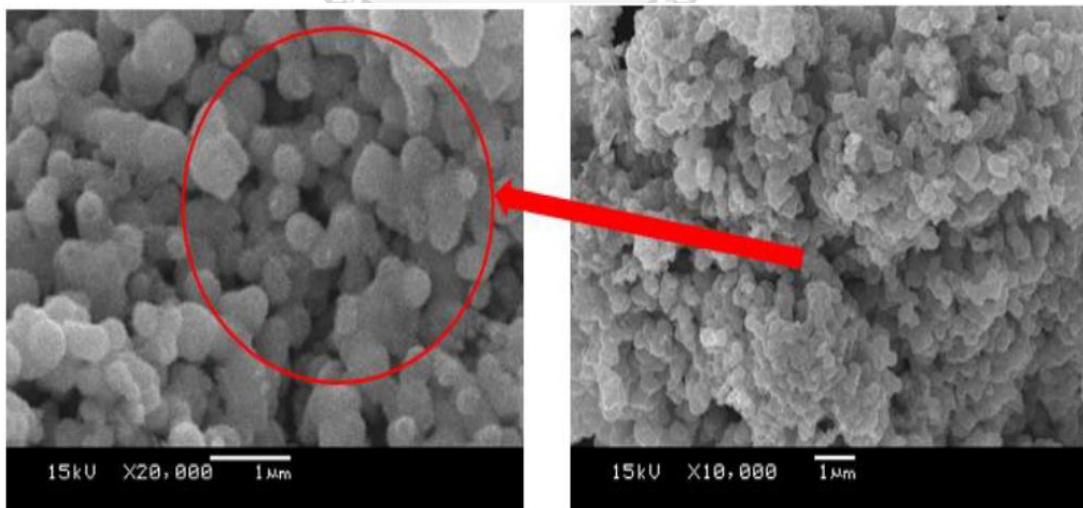
พบว่าสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ปรากฏยอดกราฟแสดงอัตรลักษณ์ของ $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ บริเวณที่เป็นจุดสามเหลี่ยมสีแดง แสดงดังรูปที่ 4.1 ตำแหน่ง $2\theta = 33.2, 44.8, 50.5, 60.3, 61.7$ และ 70.7 องศา และยืนยันโครงสร้างเฮกซะโกนอลของสารประกอบนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้ ดังนั้นการสังเคราะห์สารด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลสามารถใช้ได้ นอกจากนี้

นิกเกิลเซเลไนด์สัดส่วนอื่นก็สามารถนำมาใช้ในงาน DSSC ได้เหมือนกันแต่สมบัติเชิงแสงและสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำกว่า Ni:Se = 0.85:1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบนิกเกิลเซเลไนด์

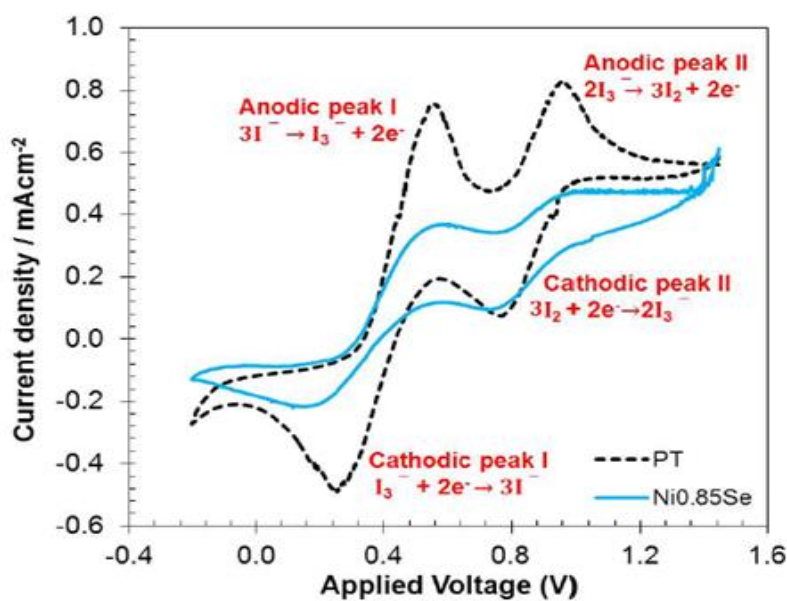
4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารประกอบนิกเกิลเซเลไนด์ที่เตรียมได้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารประกอบนิกเกิลเซเลไนด์ ความละเอียด 20,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)

จากรูปที่ 4.2 พบว่า อนุภาคของสารประกอบนิกเกิลเซลไนด์ที่เตรียมได้มีขนาดค่อนข้างเล็ก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.4 ไมโครเมตร อนุภาคเกาะกันเป็นกลุ่มมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้น เมื่อนำสารประกอบนิกเกิลเซลไนด์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมใน DSSC จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไตรไอโอดีไอออนได้ดี ซึ่งจะยืนยันอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไตรไอโอดีไอออนของสารประกอบนิกเกิลเซลไนด์ในการทดลอง (4.3)

4.3 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อดูการรีดิวซ์และการออกซิไดซ์ของขั้วนิกเกิลเซลไนด์ที่เตรียมได้เทียบกับขั้วแพลททินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูปที่ 4.3 ไซคลิกโวลแทมมาแกรมของขั้วนิกเกิลเซลไนด์ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับขั้วแพลททินัม

การทดลองใช้ระบบ 3 ขั้ว ได้แก่ขั้วทำงาน (working electrode) เปรียบเทียบระหว่างแพลททินัมและนิกเกิลเซลไนด์ ขั้วไฟฟ้าร่วมใช้แท่งแพลททินัมบริสุทธิ์ และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเมอคิวรีคลอไรด์ อัตราการสแกน 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที สารละลายคูรีดอกซ์ไอโอดีไอออน (I) กับไตรไอโอดีไอออน (I₃) ส่วนรายละเอียดวิธีเตรียมการทดลองดังแสดงในหัวข้อ 3.5.3.4 ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3

กราฟไซคลิกโวลแทมมาแกรมปรากฏยอดกราฟสองคู่สอดคล้องกับปฏิกิริยารีดอกซ์ 2 ปฏิกิริยาดังนี้ [24]



ผลทดสอบชั่วคราวทำงานแพลททินัมปรากฏยอดกราฟสองคู่ ยอดกราฟแคโทดิกแรกพบที่แรงดันไฟฟ้า 0.29 V เกิดจากปฏิกิริยาผันกลับในสมการ (4.1) ยอดกราฟแคโทดิกที่สองพบที่แรงดันไฟฟ้า 0.79 V สอดคล้องกับปฏิกิริยาในสมการผันกลับที่ (4.2) ขณะที่ผลทดสอบชั่วคราวงานนิกเกิลเซลเลนไนด์ปรากฏยอดกราฟสองคู่เช่นกัน ยอดกราฟแคโทดิกแรกและยอดกราฟแคโทดิกที่สอง พบที่แรงดันไฟฟ้า 0.20 V และ 0.71 V สอดคล้องกับปฏิกิริยาในสมการ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ การที่ผลไซคลิกโวลแทมมาแกรมของชั่วคราวทั้งสองชนิดมีลักษณะคล้ายกันและตำแหน่งยอดกราฟปรากฏที่แรงดันไฟฟ้าในย่านเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าชั่วคราวนิกเกิลเซลเลนไนด์ที่เตรียมได้นั้นสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน DSSC ได้

ปฏิกิริยาในสมการที่ (4.1) เกี่ยวข้องกับการทำงานของชั่วคราวร่วม เนื่องจากชั่วคราวร่วมทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยารีดักชันของ triiodide species พารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับรูปไซคลิกโวลแทมมาแกรมสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเคมีไฟฟ้าจากไซคลิกโวลแทมมาแกรมจากรูปที่ 4.3

Counter electrode	$ J_{red} $ (mAcm ⁻²)	E_{pp} (mV)	$J_{ox1}/ J_{red} $
Pt	0.49	312	1.51
Ni _{0.85} Se	0.22	390	1.63

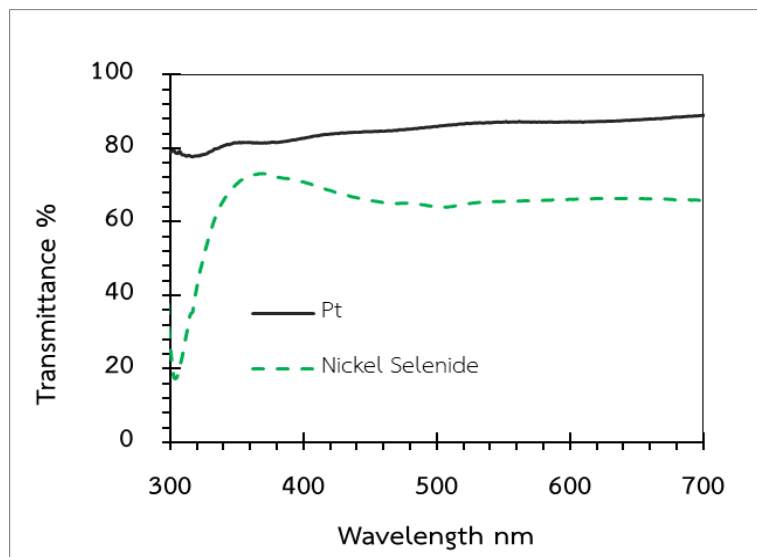
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดักชันของ triiodide species ได้แก่

1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของปฏิกิริยารีดักชัน ($|J_{red}|$) ถ้า $|J_{red}|$ มีค่ามากแสดงว่าปฏิกิริยารีดักชันเกิดได้เร็ว [22]

2. ผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของยอดกราฟแอโนดิกแรก (Anodic peak I) กับยอดกราฟแคโทดิกแรก (Cathodic peak I) (the peak to peak potential separation = E_{pp}) สามารถคำนวณได้จากสูตร $|E_a - E_c|$ โดยค่า E_a และ E_c แทนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งยอดกราฟแอโนดิกและแคโทดิกตามลำดับ ปฏิริยารีดอกซ์ที่มีค่า E_{pp} ต่ำแสดงถึงกัมมันตภาพเชิงเร่งปฏิริยา (Catalytic activity) ที่สูง [25]
3. อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของปฏิริยาออกซิเดชันต่อค่าสัมบูรณ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของปฏิริยารีดักชัน ($J_{ox}/|J_{red}|$) เป็นพารามิเตอร์ประเมินความสามารถเชิงเร่งปฏิริยา (catalytic activity) ค่า $J_{ox}/|J_{red}|$ เข้าใกล้ 1 แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิริยารีดักชันเร็วเท่ากับอัตราการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันเป็นผลเนื่องมาจาก catalytic activity ของตัวเร่งปฏิริยา

จากตารางที่ 4.1 ชั่วทำงานแพลททินัมมีค่า $|J_{red}| = 0.49 \text{ mA/cm}^2$ มากกว่าชั่วทำงานนิกเกิลเฮไลนด์ที่เตรียมได้ (0.22 mA/cm^2) แสดงว่าชั่วแพลททินัมเกิดปฏิริยาได้เร็วกว่าชั่วนิกเกิลเฮไลนด์ ขณะที่ชั่วแพลททินัมให้ค่า E_{pp} น้อยกว่าชั่วนิกเกิลเฮไลนด์ที่เตรียมได้ (312 และ 390 mV ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าชั่วแพลททินัมมีกัมมันตภาพเชิงเร่งปฏิริยาสูงกว่าชั่วนิกเกิลเฮไลนด์ ค่าอัตราส่วน $J_{ox}/|J_{red}|$ ของชั่วแพลททินัมเข้าใกล้ 1 มากกว่าชั่วนิกเกิลเฮไลนด์ ซึ่งแสดงถึงความว่องไวชั่วแพลททินัมมีความเสถียรในเกิดปฏิริยารีดอกซ์มากกว่าชั่วนิกเกิลเฮไลนด์ที่เตรียมได้

4.4 ศึกษาความโปร่งแสงของชั้นไฟฟ้าร่วมเคลือบสารประกอบนิกเกิลเซลไนด์ที่เตรียมได้เทียบกับแพลททินัมด้วยยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



รูปที่ 4.4 ค่าความโปร่งแสงของชั้นไฟฟ้าร่วมที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัมและสารนิกเกิลเซลไนด์

จากรูปที่ 4.4 เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 350 nm ขึ้นไปจะเห็นได้ว่าสารนิกเกิลเซลไนด์มีค่าความโปร่งแสง มากกว่า 65% อีกทั้งยังมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความโปร่งแสงของกระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วยโลหะแพลททินัม (> 80%) ในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน และถ้าสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นลักษณะของชั้นไฟฟ้าร่วมที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัมและสารนิกเกิลเซลไนด์แสดงดังรูปที่ 4.5 แต่เมื่อนำชั้นไฟฟ้าที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัมและสารนิกเกิลเซลไนด์ประกอบเป็นเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลวเข้าไปเซลล์ พบว่าชั้นไฟฟ้าที่เคลือบด้วยสารนิกเกิลเซลไนด์นั้นมีความโปร่งแสงที่ดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6



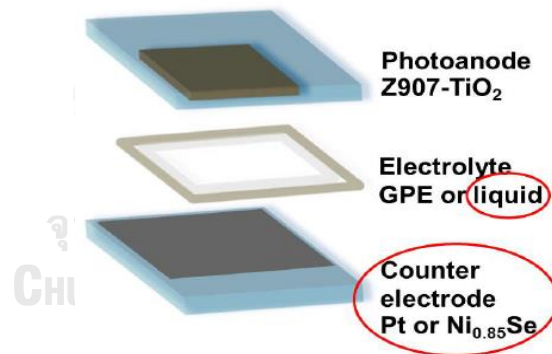
รูปที่ 4.5 ลักษณะของชั้นไฟฟ้าร่วมที่เคลือบด้วยโลหะแพลททินัม (ซ้าย)
และสารนิกเกิลเซลไนด์ (ขวา)



รูปที่ 4.6 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมเป็นโลหะแพลททินัม (ซ้าย)
และสารนิกเกิลเฮลเลไนต์ (ขวา)

เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยสารนิกเกิลเฮลเลไนต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน
ได้จริง ยกตัวอย่างเช่น นำไปประยุกต์ใช้เป็นกระจกหน้าต่างของอาคารบ้านเรือน ดังนั้นเซลล์สุริยะ
จำเป็นต้องมีความโปร่งแสงไม่น้อยกว่า 60%

4.5 ผลศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมเทียบกับเซลล์ สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ

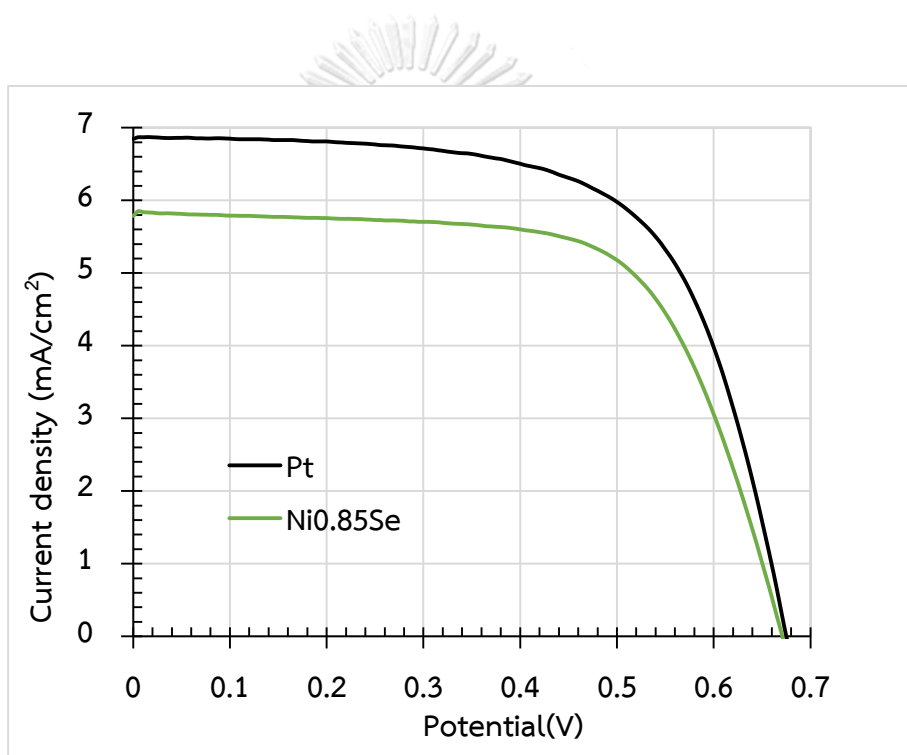


รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของ NiSe-DSSC

เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้สารนิกเกิลเฮลเลไนต์และเซลล์ DSSC มาตรฐาน มี
ส่วนประกอบภายในเซลล์ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.7 และจากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า DSSC ที่ปรับปรุง
ขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้สารนิกเกิลเฮลเลไนต์ ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ลดลง เมื่อเทียบ
กับเซลล์สุริยะมาตรฐานที่ใช้สารแพลททินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม เนื่องจากขั้วแพลททินัมนั้นมีความเร็วใน
เกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าขั้วนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่เตรียมได้ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย
เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมกับเซลล์
สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2 วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 G
($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$)

CEs	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	%PCE
Liq/Pt	0.68	6.9	0.65	3.0%
$\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$	0.67	5.8	0.66	2.6%



รูปที่ 4.8 กราฟ J-V ของเซลล์ NiSe-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2)

โดยที่ J_{sc} ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (mA/cm^2)

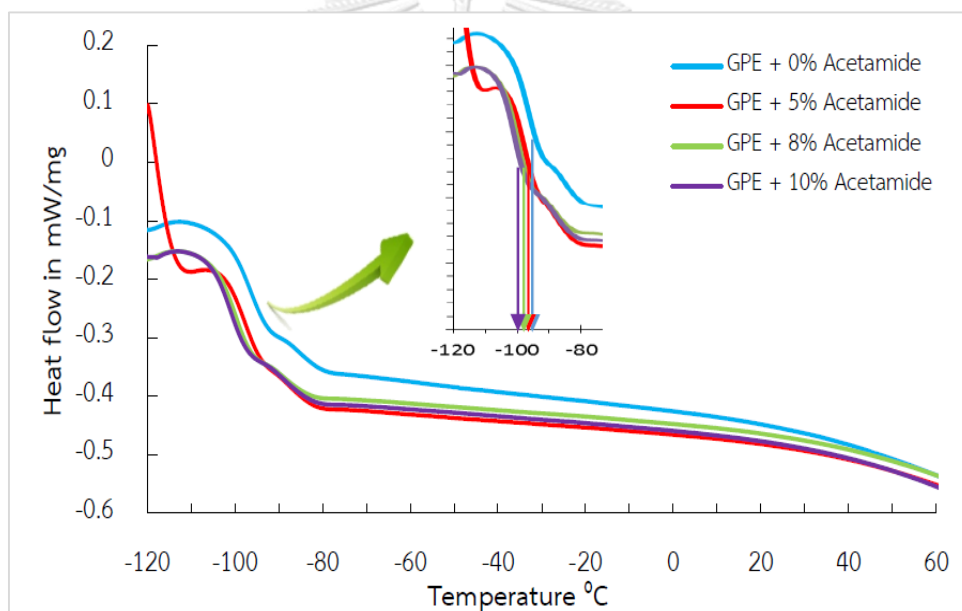
V_{oc} ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V)

FF ค่าฟิลล์แฟกเตอร์

%PCE ประสิทธิภาพรวม (%)

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่า DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมให้ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และค่าฟิลล์แพกเตอร์ ที่ใกล้เคียงกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วม (5.8 mA/cm^2) มีค่าน้อยกว่าเซลล์สุริยะมาตรฐาน (6.9 mA/cm^2) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมลดลงจากเซลล์สุริยะมาตรฐานเล็กน้อย ดังนั้นขั้วนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้มีความเหมาะสมพอที่จะนำมาใช้แทนขั้วแพลททินัมใน DSSC เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต

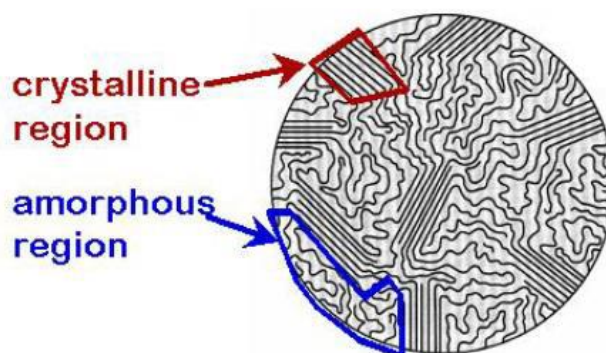
4.6 ศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.9 DSC thermograms ของ GPE ที่เตรียมได้

จากรูปที่ 4.9 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) คืออุณหภูมิที่สารเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแข็งเปราะคล้ายผลึกกลายเป็นสถานะยืดหยุ่นคล้ายยาง สามารถหาได้จากจุดกึ่งกลาง (Midpoint) ของ DSC thermogram กรณีพอลิเมอร์ T_g มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Crystalline) อยู่ในเนื้อวัสดุมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแข็งเปราะกลายเป็นสถานะยืดหยุ่น ดังนั้นเจลพอลิเมอร์ที่มี T_g ต่ำลงแสดงว่าเจลพอลิเมอร์นั้นเริ่มมีเฟสอสัณฐาน (amorphous) หรือโครงสร้างแบบไม่เป็น

ระเบียบ (non-crystalline) มากขึ้น จากผลการทดลองค่า T_g ของ GPE ที่ไม่มีการผสมและมีการผสมสารอะเซตาไมด์ตามอัตราที่กำหนดเป็น 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก แสดงตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 แบบจำลอง Fringed-micelle แสดงโครงสร้างผลึกพอลิเมอร์ [26]

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE ที่ไม่มีการผสมและมีการผสมสารอะเซตาไมด์ตามอัตราที่กำหนด

GPEs with	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	R ($\text{k}\Omega$)	$\sigma \times 10^{-4}$ (S/cm)
0% actm	-93.5	16.3	8.7
5% actm	-96.6	8.4	17.0
8% actm	-98.6	7.2	19.8
10% actm	-99.2	13.0	10.9

จากตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณสารอะเซตาไมด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ GPE มีค่า T_g ลดลง แสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างของ GPE มีส่วนที่เป็นลักษณะเฟสอสัณฐานเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดความเกาะกะของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้มีช่องว่างอิสระดั่งนั้นไอออนเกิดการถ่ายเทได้ดี ซึ่งจะส่งผลดีทางอ้อมคือจะช่วยเพิ่มการเหนี่ยวนำไอออนของไอโอดีและไตรไอโอดีสามารถยืนยันด้วยผลการทดลองต่อไป

ผลความต้านทานไฟฟ้า พบว่าปริมาณสารอะเซตาไมด์ที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ GPE จะลดลง เนื่องจาก GPE มีเฟส amorphous มากขึ้น โมเลกุลของสารห่กันส่งผลให้ไอออนของไอโอดีและไตรไอโอดีในเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น เมื่อ GPE มีความเป็น amorphous มากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้าของ GPE ลดลง และสิ่งที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้าก็คือค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE

กรณี DSSC มี GPE เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์ค่าประสิทธิภาพรวมของเซลล์สุริยะส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความคล่องตัว (mobility) ของสารคูรีด็อกซ์และค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE ดังนั้นค่าการนำไอออนของ GPE, σ (S/cm) ที่เตรียมได้สามารถคำนวณได้จากความต้านทานของ GPE โดยใช้สูตรสมการ (4.3)

$$\sigma = \frac{l}{R_b A} \quad \text{สมการ (4.3)}$$

โดย σ ค่าการนำไอออนสารอิเล็กโทรไลต์ หน่วยเป็น S/cm

l ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า หน่วยเป็น cm

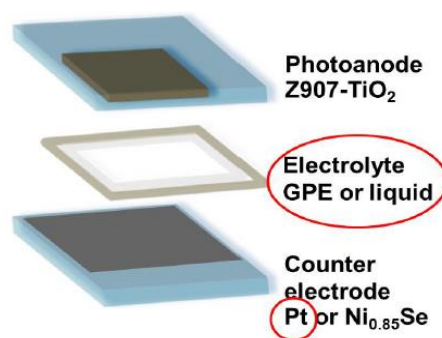
R_b ความต้านทาน bulk, ความต้านทานของเจลพอลิเมอร์ หน่วยเป็นโอห์ม

A พื้นที่หน้าตัดของสารอิเล็กโทรไลต์ หน่วยเป็น cm^2

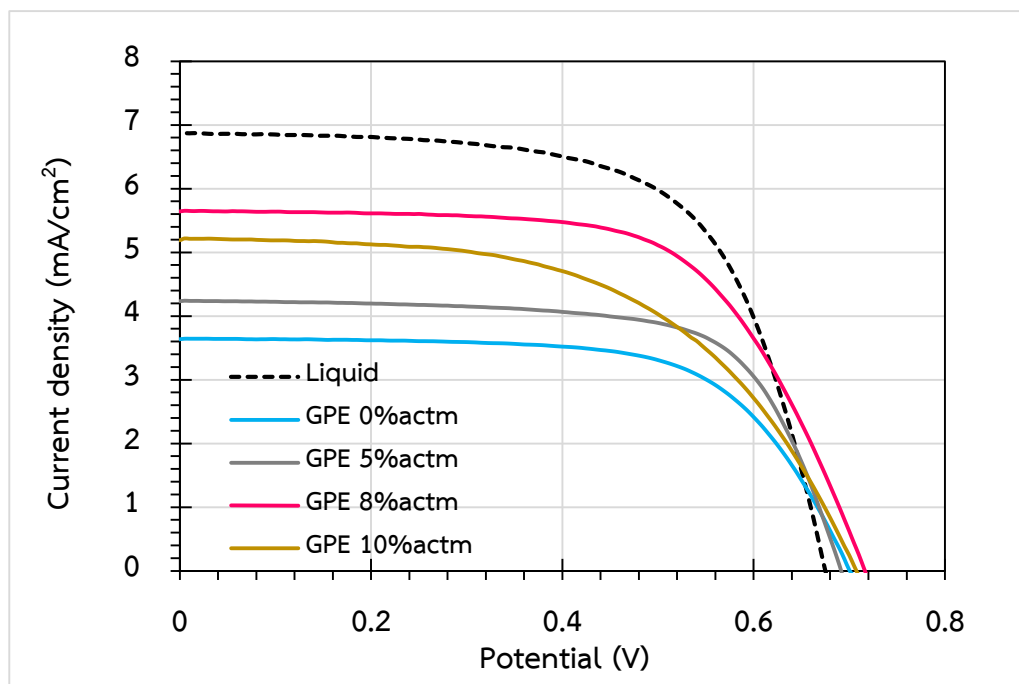
จากตารางที่ 4.3 ค่าการนำไอออนของ GPE แปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ปริมาณสารอะเซตาไมด์ที่เพิ่มขึ้น (จาก 0% ไปถึง 8% โดยน้ำหนัก) ทำให้ค่าการนำไอออนของ GPE เพิ่มขึ้น (จาก 8.7×10^{-4} เป็น 19.8×10^{-4} S/cm) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารอะเซตาไมด์ถึง 10% โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ GPE กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็นผลเนื่องมาจากอะเซตาไมด์ปริมาณมากเกินไปจะเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะเซตาไมด์กับไตรไอโอดีไอออนใน GPE [20] ทำให้ค่าการเหนี่ยวนำไอออนลดลง ดังนั้น GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8% โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ใน DSSC ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 ผลศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบของ GPE-DSSC



รูปที่ 4.12 กราฟ J-V ของ GPE-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2)

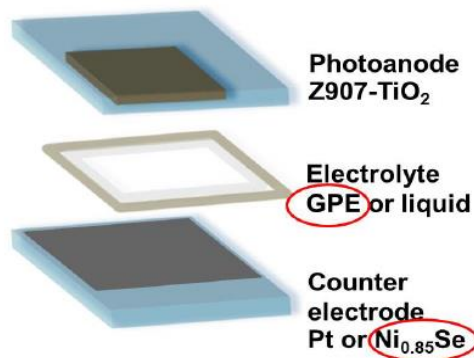
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆของ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2 วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 G ($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$)

Electrolytes	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	%PCE
Liquid	0.68	6.9	0.65	3.0%
GPE 0% actm	0.70	3.6	0.66	1.7%
GPE 5% actm	0.70	4.2	0.69	2.0%
GPE 8% actm	0.71	5.6	0.64	2.6%
GPE 10% actm	0.71	5.2	0.65	2.0%

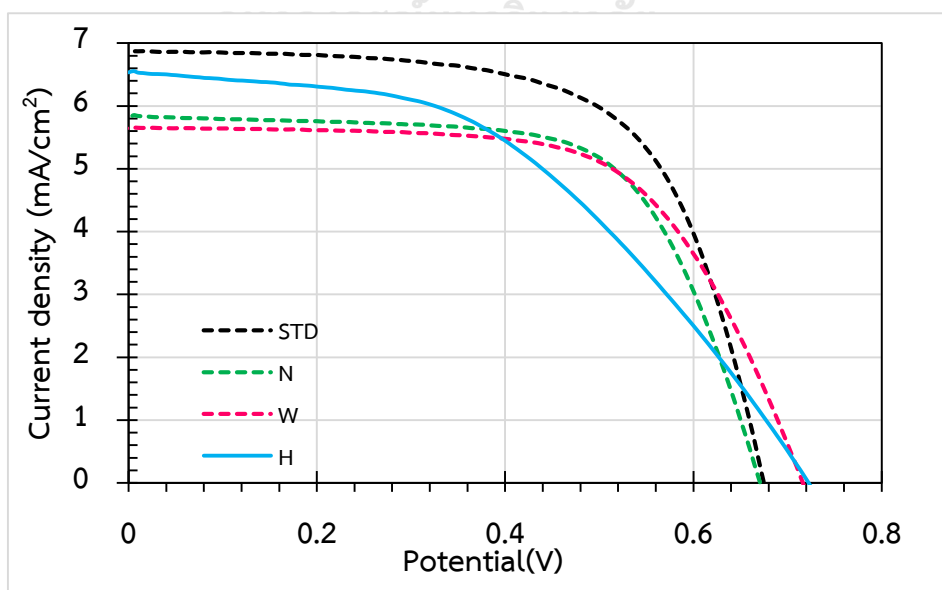
เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ GPE มีส่วนประกอบภายในเซลล์ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งกราฟ J-V ของเซลล์ทดสอบที่วัดได้จากเครื่อง IV-test แสดงดังรูปที่ 4.12 และ จากตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณสารอะเซตาไมด์ใน GPE ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมสารอะเซตาไมด์เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ไอออนใน GPE เกิดการถ่ายเทได้ดีขึ้นและส่งผลให้ค่าการเหนี่ยวนำไอออนของ GPE เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณอะเซตาไมด์ 10 % โดยน้ำหนัก

กลับทำให้ J_{sc} ลดลงเพราะสารอะเซตาไมด์ที่ใส่เพิ่มมากเกินไปจะเหนียวทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะเซตาไมด์กับไตรโอไอโอดีไอออน ซึ่งแนวโน้มของ GPE เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าการเหนียวไอออน ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ให้ผลประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน โดย GPE-DSSC ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก ให้ค่า PCE สูงที่สุด (2.6 %) ใกล้เคียงกับผลของ DSSC ที่ผลิตจากอิเล็กโทรไลต์เหลว ดังนั้น GPE ที่ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลวใน DSSC เพื่อช่วยลดการรั่วซึมของสารอิเล็กโทรไลต์

4.8 ผลศึกษาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงข้อไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.13 ส่วนประกอบของ NiSe/GPE-DSSC



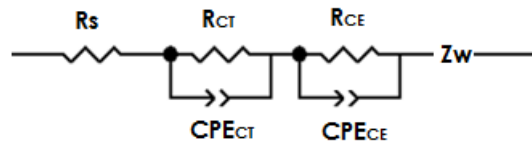
รูปที่ 4.14 กราฟ J-V ของ NiSe/GPE-DSSC (พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2)

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน พื้นที่รับแสง 0.25 cm^2

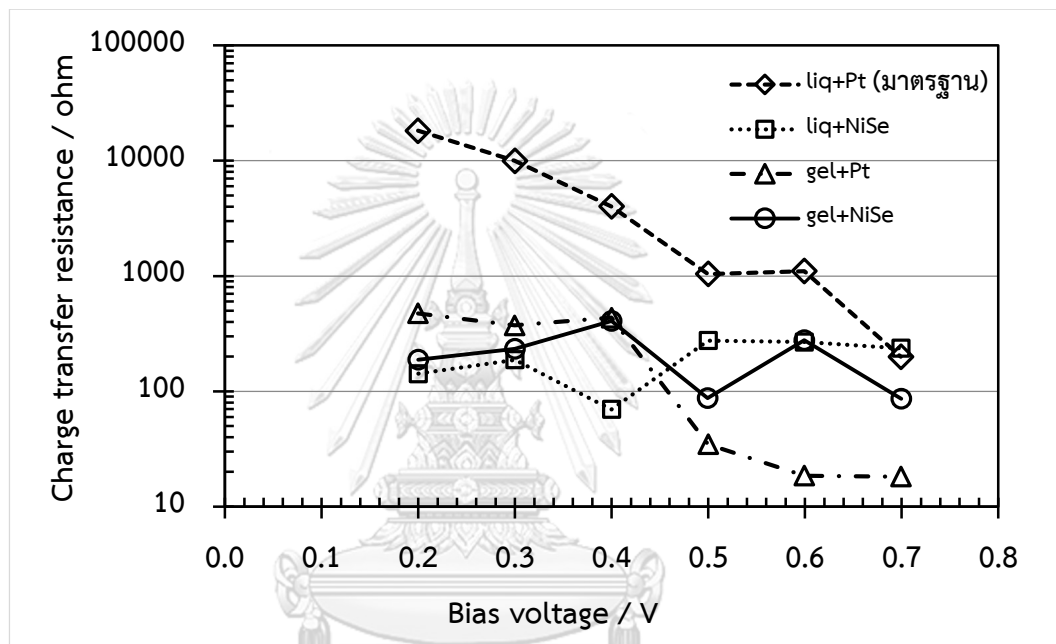
DSSCs 0.25 cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	%PCE
Liq EL + Pt [STD]	0.68	6.9	0.65	3.0%
Range of Cells	0.65-0.68	6.3-7.1	0.64-0.66	2.8-3.0%
Liq EL + $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ [N]	0.67	5.8	0.66	2.6%
Range of Cells	0.63-0.67	5.5-6.0	0.60-0.66	2.2-2.6%
GPE 8% + Pt [W]	0.71	5.6	0.64	2.6%
Range of Cells	0.7-0.71	4.3-5.6	0.64-0.69	2.1-2.6%
GPE 8% + $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ [H]	0.72	6.5	0.46	2.2%
Range of Cells	0.70-0.72	6.3-6.5	0.45-0.47	2.0-2.2%

เซลล์ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีส่วนประกอบภายในเซลล์ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งกราฟ J-V ของเซลล์ทดสอบที่วัดได้จากเครื่อง IV-test แสดงดังรูปที่ 4.14 และจากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อ DSSC ที่ใช้ GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก ร่วมกับขั้วไฟฟ้าร่วมที่เป็นสารนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ($V_{oc} = 0.72 \text{ V}$) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบเซลล์สุริยะมาตรฐาน ($V_{oc} = 0.68 \text{ V}$) ค่าความหนาแน่นวงจรถัด ($J_{sc} = 6.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$) ยังให้ค่าความหนาแน่นวงจรถัดน้อยกว่าเซลล์สุริยะมาตรฐาน ($J_{sc} = 6.9 \text{ mA}/\text{cm}^2$) ซึ่งยืนยันด้วยผลการวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะ (impedance analysis) หัวข้อถัดไป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ DSSC ที่ปรับปรุงองค์ประกอบเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งพบว่า NiSe/GPE -DSSC ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก ให้ค่า V_{oc} สูงกว่า ส่วนค่า FF นั้นต่ำกว่าเซลล์สุริยะมาตรฐานเล็กน้อย ส่งผลให้เซลล์ NiSe/GPE -DSSC มีค่า PCE = 2.2% ลดลงเมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน (PCE = 3.0%)

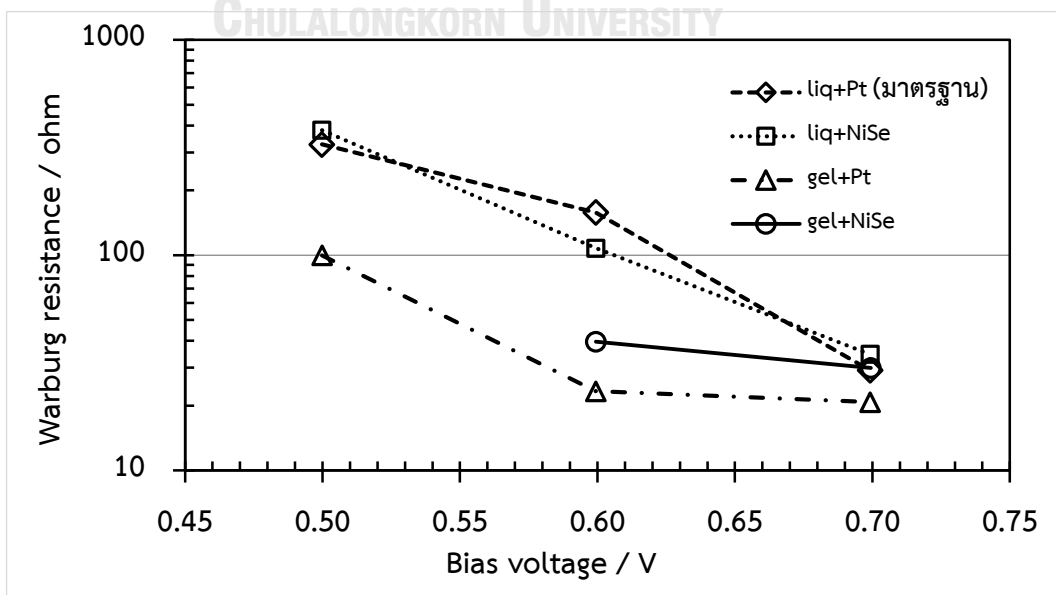
4.9 ผลวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้าในสภาวะมืด



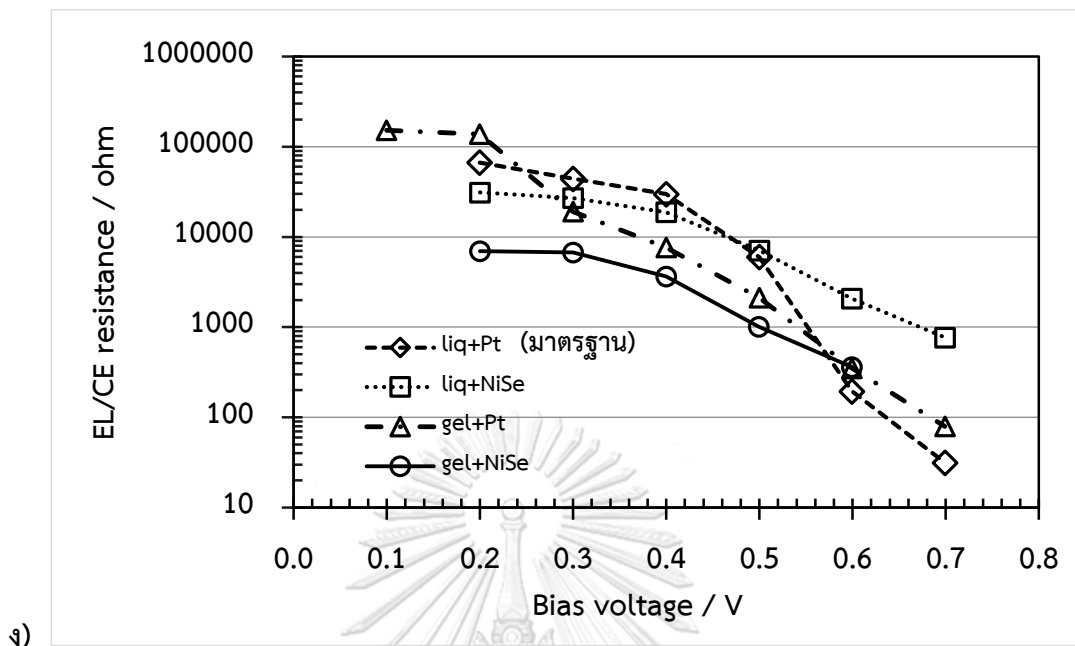
ก)



ข)



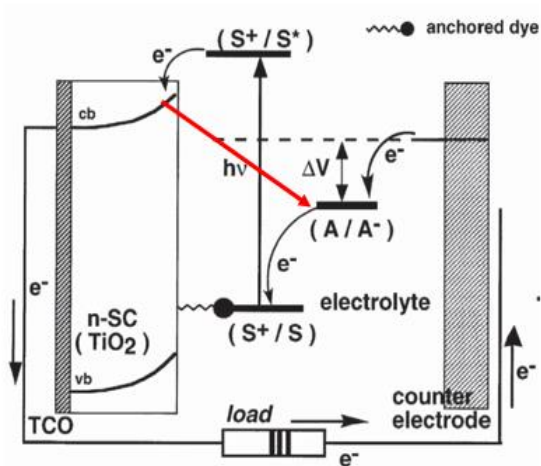
ค)



รูปที่ 4.15 ก) รูปแบบวงจรสำหรับการติดตั้งผลการทดลอง EIS, ข) R_{CT} ที่ bias voltage แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และ DSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ, ค) Z_w ที่ bias voltage แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และ DSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ, ง) R_{CE} ที่ bias voltage แตกต่างกันของ DSSC มาตรฐาน และ DSSC ที่ปรับปรุงส่วนประกอบ

จากผลการทดลองรูปที่ 4.15 (ก) แสดงรูปแบบวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการวัดค่าความขัดรวม (impedance) ค่า R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมของกระจกที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้า (FTO) ช่วงความถี่ประมาณ 1 MHz, ค่า R_{CT} (Charge transfer resistance) คือค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (TiO_2/EL) ช่วงความถี่ประมาณ 1-100 Hz ซึ่งบริเวณหน้าสัมผัสนี้เกิดขึ้นที่บริเวณขั้ว Anode และจำเป็นต้องมีค่า R_{CT} มาก เพราะจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยา recombination via electrolyte แสดงดังรูปที่ 4.16, ค่า R_{CE} (Counter electrode resistance) คือค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับขั้วไฟฟาร่วม (EL/CE) ช่วงความถี่สูงประมาณ 1-100 kHz ซึ่งบริเวณหน้าสัมผัสนี้เกิดขึ้นที่บริเวณขั้ว Cathode และจำเป็นต้องมีค่า R_{CE} น้อยๆ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี และค่า W_1 หรือ Z_w คือค่าความต้านทานวาร์เบิร์ก (Warburg resistance) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ต่ำประมาณ 100 mHz ซึ่งในการ

ทดลองนี้ศึกษาค่าพารามิเตอร์เฉพาะส่วนที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเซลล์สุริยะ นั่นคือ ค่า R_{CT} , ค่า R_{CE} และ ค่า Z_W ซึ่งค่าพารามิเตอร์ R_1 ของ DSSC มาตรฐาน และ DSSC ที่ปรับปรุง ส่วนประกอบอยู่ที่ประมาณ 15 Ohm



รูปที่ 4.16 ปฏิกริยา recombination via electrolyte

1. ผลของการใช้ GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนักแทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว จำเป็นต้องศึกษาค่าความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสระหว่าง TiO_2/EL และค่าความต้านทาน Z_W จากรูปที่ 4.15 (ข) พบว่าความต้านทาน R_{CT} ของเซลล์ทดสอบ Liq/Pt-DSSC มีค่าสูงที่สุดตลอดช่วงแรงดันไบแอส (bias voltage) 0.2 – 0.7 V ส่งผลให้การตกกลับของอิเล็กตรอน (electron recombination) จากชั้น TiO_2 ไปยังอิเล็กโทรไลต์เหลวของเซลล์ทดสอบ Liq/Pt-DSSC มีอัตราต่ำที่สุด แต่ในเซลล์ทดสอบ GPE/Pt-DSSC กลับพบว่าความต้านทาน R_{CT} ในช่วงแรงดันไบแอสสูง 0.5 – 0.8 V มีค่าต่ำกว่าเซลล์ทดสอบอื่น ๆ อาจเป็นผลเนื่องมาจากในสถานะความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง (high electron density) อิเล็กตรอนในชั้น TiO_2 มีปฏิสัมพันธ์กับ reducing species ในอิเล็กโทรไลต์ GPE ได้มากกว่าในอิเล็กโทรไลต์เหลว อย่างไรก็ตามในเซลล์ทดสอบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วม NiSe กลับพบว่าความต้านทาน R_{CT} มีค่าอยู่ระหว่าง 100 – 300 โอห์มตลอดทั้งช่วงแรงดันไบแอสโดยไม่ขึ้นกับชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ สรุปเบื้องต้นได้ว่าขั้วไฟฟ้าร่วม NiSe มีส่วนช่วยให้อัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในชั้น TiO_2 , อัตราการตกกลับของอิเล็กตรอนบริเวณหน้าสัมผัส TiO_2/EL และอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าร่วมสู่อิเล็กโทรไลต์ อยู่ในสถานะสมดุล (equilibrium) โดยไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหรือชนิดของอิเล็กโทรไลต์

จากรูปที่ 4.15 (ค) แสดงผลเปรียบเทียบ Z_w ของเซลล์ทดสอบทั้งสี่เซลล์ในช่วงแรงดันไบแอส 0.5 – 0.7 V พบว่าค่า Z_w มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอส โดยเซลล์ทดสอบที่ใช้อิเล็กโทรไลต์เหลวเหมือนกัน (Liq/Pt-DSSC และ Liq/NiSe-DSSC) จะมีค่า Z_w ระดับใกล้เคียงกันตลอดช่วงแรงดันไบแอสที่ทดสอบ ในขณะที่เซลล์ทดสอบที่ใช้ GPE (GPE/Pt-DSSC) กลับมีความต้านทานการแพร่ของประจุต่ำกว่าเซลล์ทดสอบ Liq/Pt-DSSC และ Liq/NiSe-DSSC แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ใน GPE มีส่วนช่วยให้อิเล็กตรอนถ่ายโอนได้เร็วกว่าการแพร่ของ redox species ในอิเล็กโทรไลต์เหลว สำหรับเซลล์ทดสอบ GPE/NiSe-DSSC นั้นพบว่า Z_w มีค่าสูงกว่าเซลล์ GPE/Pt-DSSC แต่ต่ำกว่าเซลล์ทดสอบที่ใช้อิเล็กโทรไลต์เหลวทั้งสองเซลล์ (Liq/Pt-DSSC และ Liq/NiSe-DSSC) สันนิษฐานว่าปฏิกิริยา reduction ที่ขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์ GPE/NiSe-DSSC เกิดช้ากว่าเซลล์ GPE/Pt-DSSC ที่ใช้โลหะแพลททินัมผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

2. ผลของการใช้สารนิเกิลเฮไลด์แทนโลหะแพลททินัม จำเป็นต้องศึกษาค่าความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับขั้วไฟฟ้าร่วม (EL/CE) รูปที่ 4.15 (ง) แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรงดันไบแอสต่ำถึงปานกลาง 0.2 – 0.5 V ความต้านทาน R_{CE} ของเซลล์ทดสอบ GPE/NiSe-DSSC มีค่าต่ำกว่าเซลล์ทดสอบอื่น ๆ ส่งผลให้อิเล็กตรอนถ่ายเทจากขั้วไฟฟ้าร่วมสู่อิเล็กโทรไลต์ได้เร็วกว่า อย่างไรก็ตามในช่วงแรงดันไบแอสสูง 0.5 – 0.7 V กลับพบว่าเซลล์ทดสอบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมโลหะแพลททินัม (Liq/Pt-DSSC และ GPE/Pt-DSSC) จะมีค่าความต้านทาน R_{CE} ต่ำกว่าเซลล์ทดสอบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วม NiSe แสดงให้เห็นว่าโลหะแพลททินัมมีสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยารีดักชันบริเวณขั้วไฟฟ้าร่วมที่ดีกว่า NiSe ในสภาวะความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ จาก EIS ที่แรงดันไบแอสประมาณ 0.7 V

DSSCs	R_s (ohm)	R_{CT} (ohm)	Z_w (ohm)	R_{CE} (ohm)
Liq/Pt-DSSC	14.0	199.6	29.2	31.5
Liq/NiSe-DSSC	14.2	236.0	34.7	768.4
GPE/Pt-DSSC	23.5	18.2	20.7	79.6
GPE/NiSe-DSSC	19.6	86.2	29.9	362.3

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเซลล์ทดสอบที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ GPE และขั้วไฟฟ้าร่วม NiSe (GPE/NiSe-DSSC) มีค่าความต้านทาน R_{CT} ต่ำกว่า และความต้านทาน R_{CE} สูงกว่าเซลล์มาตรฐาน Liq/Pt-DSSC

ขณะเดียวกันมีค่าความต้านทาน Z_w ในระดับเดียวกับเซลล์มาตรฐาน อธิบายได้ว่าเมื่อพิจารณาที่แรงดันไบแอสสูงใกล้เคียงกับแรงดันวงจรเปิดของเซลล์ (V_{oc}) หรือในสภาวะอิเล็กตรอนอิสระมีความหนาแน่นสูงนั้น วัสดุ NiSe มีสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยารีดักชันบริเวณขั้วไฟฟ้าร่วมต่ำกว่าโลหะแพลทินัม อิเล็กตรอนสามารถแพร่กระจายได้ดีในอิเล็กโทรไลต์ GPE เทียบเท่าการแพร่กระจายในอิเล็กโทรไลต์เหลว แต่อัตราการตกกลับบริเวณหน้าสัมผัสระหว่าง TiO_2/EL ใน GPE จะสูงกว่าอิเล็กโทรไลต์เหลว ผลวิเคราะห์ EIS สนับสนุนผลการทดลองวัดประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์ทดสอบทั้ง 4 ประเภทในตารางที่ 4.5 แม้เซลล์ทดสอบ GPE/NiSe-DSSC จะให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าเซลล์ทดสอบมาตรฐานในระดับที่ยอมรับได้ แต่ก็มีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนและความคงทน จึงได้ทดลองศึกษาการขยายขนาดพื้นที่รับแสงของเซลล์ GPE/NiSe-DSSC ในหัวข้อถัดไป

4.10 ผลศึกษาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน โดยมีพื้นที่รับแสงเป็น 2.25 cm^2

ผลทดสอบประสิทธิภาพและผลวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุในเซลล์สุริยะของเซลล์ทดสอบ GPE/NiSe-DSSC ขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 cm^2 ในหัวข้อ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนบริเวณหน้าสัมผัสของวัสดุต่างชนิดกัน ที่มีผลต่อสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่ประกอบขึ้นจากวัสดุนั้น หัวข้อนี้จะแสดงผลทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ผลิตจากอิเล็กโทรไลต์ GPE และขั้วไฟฟ้าร่วม NiSe ที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการขยายขนาดพื้นที่รับแสงของเซลล์สุริยะจากขนาดเล็กสู่ขนาดกลาง เป็นข้อมูลสำหรับขยายไปสู่เซลล์ขนาดใหญ่ต่อไป

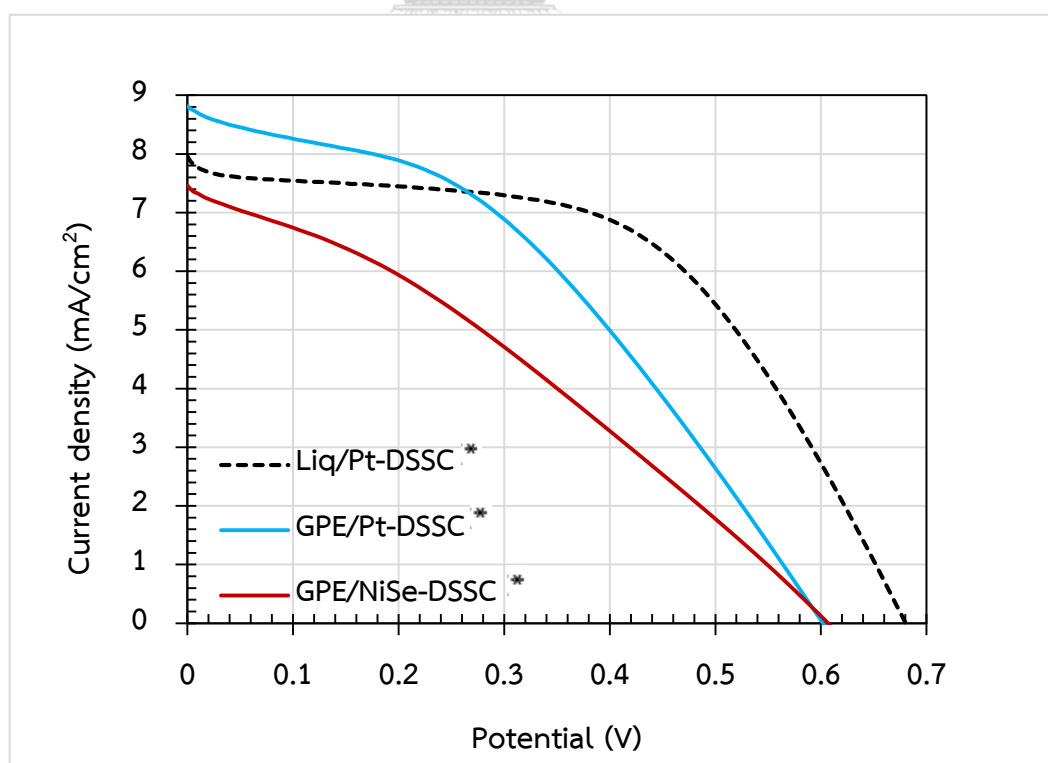
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆของ DSSC ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2

DSSCs 2.25 cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	%PCE	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)
Liq EL + Pt *	0.68	7.8	0.54	2.8%	21
GPE 8% + $Ni_{0.85}Se$	0.65	4.8	0.26	0.8%	116
GPE 8% + $Ni_{0.85}Se^*$	0.61	7.4	0.32	1.4%	72

*Apply silver paint to produce conductive paths

จากตารางที่ 4.7 เมื่อขนาดพื้นที่รับแสงของ DSSC เป็น 2.25 cm^2 พบว่าเซลล์ NiSe/GPE-DSSC ให้ค่า PCE = 0.8 % น้อยกว่าเซลล์สุริยะมาตรฐานที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์และแพลทินัม (PCE = 2.8%) สันนิษฐานว่าเซลล์สุริยะมีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจำนวนมากขึ้น แต่การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากฝั่งแอโนดไปฝั่งคาโทดทำได้ไม่ดี เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของสารเคลือบนำไฟฟ้าบนผิวกระจกยังมีค่าสูงอยู่ การแก้ไขเบื้องต้นใช้สีฟันทเงินทาบนผิวกระจกนำไฟฟ้าบริเวณหน้าสัมผัสเพื่อสร้างเส้นทางนำไฟฟ้า (conductive path) ผลทดสอบพบว่าเซลล์ NiSe/GPE-DSSC ที่ทาสีฟันทเงินให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นจาก 4.8 เป็น 7.4 mA/cm^2 และความต้านทานอนุกรมลดลงจาก 116 เป็น $72 \Omega \text{ cm}^2$

ค่าความต้านทานอนุกรมสัมพันธ์กับความต้านทานไฟฟ้าบริเวณหน้าสัมผัส (Wiring Contact) ที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (non-Ohmic contact) ในทางทฤษฎีความต้านทานอนุกรมควรมีค่าต่ำเพื่อลดการสูญเสียอิเล็กตรอนบริเวณหน้าสัมผัสส่งผลให้ค่า FF และ PCE ของเซลล์สุริยะเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามค่า PCE ยังต่ำกว่าของเซลล์มาตรฐาน จำเป็นต้องลดความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมให้ต่ำกว่านี้ ขณะเดียวกันเพิ่มความต้านทานชั้นที่ให้มากขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์ก่อนขยายขนาดพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นต่อไป



รูปที่ 4.17 กราฟ J-V ของเซลล์ NiSe/GPE-DSSC ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ต่างๆของ GPE/Pt-DSSC และ NiSe/GPE-DSSC เทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2

DSSCs 2.25 cm^2	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	%PCE	R_{shunt} (Ohm cm^2)	R_{series} (Ohm cm^2)
Liq EL/Pt-DSSC*	0.68	7.8	0.54	2.8	157	21
Range of cells	0.68-0.69	7.8-8.1	0.50-0.54	2.7-2.8	150-157	21-25
GPE/Pt-DSSC*	0.61	8.7	0.41	2.1	83	23
Range of cells	0.59-0.61	8.4-8.7	0.40-0.41	2.0-2.1	83-84	22-23
GPE/NiSe-DSSC*	0.61	7.4	0.32	1.4	64	72
Range of cells	0.61-0.63	7.1-7.4	0.27-0.32	1.2-1.4	42-64	72-79

*Apply silver paint to produce conductive paths

กราฟ J-V ของเซลล์ทดสอบ GPE/Pt-DSSC, NiSe/GPE-DSSC และเซลล์มาตรฐานที่วัดได้จากเครื่อง IV-test แสดงดังรูปที่ 4.17 และจากตารางที่ 4.8 พบว่าเซลล์ GPE/NiSe-DSSC* มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ($J_{sc} = 7.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$) น้อยกว่าเซลล์ GPE/Pt-DSSC* ($J_{sc} = 8.7 \text{ mA}/\text{cm}^2$) และค่า FF ของเซลล์ GPE/NiSe -DSSC* นั้นต่ำกว่าเซลล์ GPE/Pt-DSSC* เนื่องจากมีความต้านทานอนุกรมสูงกว่าและมีความต้านทานชั้นที่ต่ำกว่าเซลล์ GPE/Pt-DSSC* ซึ่งส่งผลให้เซลล์ GPE/NiSe-DSSC* มีค่า PCE = 1.4% น้อยกว่า เมื่อเทียบเซลล์ GPE/Pt-DSSC* (PCE = 2.1%)

จากผลวิเคราะห์ความขัดรวมก่อนหน้าในระดับห้องปฏิบัติการ เซลล์ GPE/NiSe-DSSC มีค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสสารอิเล็กโทรไลต์กับขั้วไฟฟ้าร่วมสูง แต่เนื่องจากพื้นที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีพื้นที่น้อย (0.25 cm^2) ดังนั้นเซลล์ GPE/NiSe -DSSC มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมต่ำกว่าในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน แต่เมื่อทำการขยายขนาดเซลล์ GPE/NiSe -DSSC* ให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้น (2.25 cm^2) จำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่ใช้ให้มีพื้นที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สารนิกเกิลเฮลเลนไดม์มีความต้านทานบริเวณหน้าสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่สูงขึ้นด้วย

จากผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาทั้งหมด สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออุปสรรคของการขยายขนาดเซลล์สุริยะที่ปรับปรุงข้อไฟฟ้าร่วมและสารอิเล็กโทรไลต์ให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้นนั้นคือ สารนิกเกิลเฮลเลนไดม์ที่นำมาใช้เป็นข้อไฟฟ้าร่วมแทนที่โลหะแพลททินัมที่ใช้งานได้ในพื้นที่ขนาดเล็ก แต่คุณสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาของสารนิกเกิลเฮลเลนไดม์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้งานในพื้นที่ที่กว้างขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสงขนาดใหญ่ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขยายส่วนการผลิตมอดูลเซลล์สุริยะ คำนึงถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน ต้นทุนในการผลิต และความเสถียรภาพของตัวเซลล์สุริยะ

ส่วนแรกเริ่มจากสังเคราะห์สารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และวิเคราะห์ผลของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก พบว่าสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ปรากฏยอดกราฟที่ $2\theta = 33.2, 44.8, 50.5, 60.3, 61.7$ และ 70.7 องศา ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.4 ไมโครเมตร อนุภาคเกาะกันเป็นกลุ่ม มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้น ผลศึกษาการรีดิวซ์และการออกซิไดซ์ของขั้วนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้เทียบกับขั้วแพลททินัมด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าขั้วทำงานนิกเกิลเฮไลด์ปรากฏตำแหน่งแรงดันไปแอสของยอดกราฟแอโนดิกและแคโทดิกใกล้เคียงกับผลทดสอบของขั้วทำงานแพลททินัม นอกจากนี้ขั้วนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ (ค่า $|j_{red}|$, ค่า E_{pp} และค่าอัตราส่วน $j_{ox}/|j_{red}|$) ใกล้เคียงกับขั้วแพลททินัม ดังนั้นขั้วนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้มีความเหมาะสมพอที่จะใช้แทนขั้วแพลททินัมใน DSSC เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และผลศึกษาความโปร่งแสงของสารประกอบนิกเกิลเฮไลด์ที่เตรียมได้เทียบกับแพลททินัมด้วย ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าสารนิกเกิลเฮไลด์มีความโปร่งแสง มากกว่า 65% ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm สามารถใช้ผลิตขั้วไฟฟ้าร่วมที่มีลักษณะโปร่งแสง เพื่อใช้ประโยชน์ใน Application ที่ต้องการความโปร่งใสได้เช่น การรวมเซลล์สุริยะเข้าเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร (Building Integrated Photovoltaics; BIPV) เป็นต้น

ส่วนที่สองเป็นการสังเคราะห์เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (GPE) โดยผสมสารอะเซตาไมด์ (0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก) ในโพลีเอทิลีนออกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไฮดรอกซีอะซิเตต และวิเคราะห์ผลของ GPE ที่เตรียมขึ้น ผลการศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าปริมาณสารอะเซตาไมด์ที่เพิ่มขึ้น 0 – 8% โดยน้ำหนัก ทำให้ GPE มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงจาก -93.5 เป็น -99.2 °C และค่าการเหนี่ยวนำไอออนเพิ่มขึ้นจาก 8.7×10^{-4} เป็น 19.8×10^{-4} S/cm แต่ถ้าวเพิ่มปริมาณสารอะเซตาไมด์เป็น 10 % โดยน้ำหนัก ค่าการเหนี่ยวนำไอออนกลับลดลงเนื่องจากอะเซตาไมด์ปริมาณมากเกินไปจะเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะเซตาไมด์กับไตรโอบีไฮดรอกซีไอออนใน GPE ดังนั้น GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ใน DSSC

ผลทดสอบเซลล์ DSSC ขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 cm^2 ภายใต้สภาพแสง AM 1.5 G ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 พบว่าเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้สารนิเกิลเซลเลนไนด์เป็นขั้วไฟฟาร่วม (NiSe-DSSC), เซลล์ DSSC ที่ใช้ GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก (GPE-DSSC) และเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ใช้ทั้งสารนิเกิลเซลเลนไนด์เป็นขั้วไฟฟาร่วมและใช้ GPE ผสมสารอะเซตาไมด์ 8 % โดยน้ำหนัก (NiSe/GPE-DSSC) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (PCE) เท่ากับ 2.60%, 2.66% และ 2.20% ตามลำดับ เทียบกับผลทดสอบของเซลล์มาตรฐานที่ใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมแพลทินัมและอิเล็กโทรไลต์เหลว (PCE = 3.0%) พบว่าเซลล์ทดสอบทั้ง 3 ประเภทมีสมรรถนะต่ำกว่าในระดับที่ยอมรับได้ (มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมไม่ต่ำกว่า 75% ของเซลล์มาตรฐาน) แต่มีข้อดีคือต้นทุนการผลิตถูกกว่าและเสถียรกว่าการใช้โลหะแพลทินัมและอิเล็กโทรไลต์เหลว มีศักยภาพในการขยายขนาดพื้นที่รับแสงต่อไป

ผลทดสอบสมรรถนะของเซลล์ NiSe/GPE-DSSC ที่ขยายขนาดพื้นที่รับแสงเป็น 2.25 cm^2 ในเบื้องต้น พบว่าให้ค่า PCE = 0.8% ซึ่งต่ำกว่าผลทดสอบของเซลล์มาตรฐานที่มีขนาดพื้นที่รับแสงเท่ากัน (PCE = 2.8%) หลังจากทดลองสร้างช่องทางนำไฟฟ้า (conductive path) บนผิวขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของเซลล์ทดสอบด้วยสีเงิน (silver paint) พบว่าค่า PCE เพิ่มขึ้นจาก 0.8% เป็น 1.4% เนื่องจากช่องทางนำไฟฟ้าช่วยให้อิเล็กตรอนถ่ายโอนได้ดีขึ้นบริเวณผิวหน้าตัวรองรับกระแสเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

และผลทดสอบสมรรถนะของเซลล์ NiSe/GPE-DSSC* (ผ่านการสร้างช่องทางนำไฟฟ้า) มีค่าต่ำกว่าเปรียบเทียบกับเซลล์ GPE/Pt-DSSC* (PCE = 2.1%) ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออุปสรรคของการขยาย

ขนาดเซลล์สุริยะที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารอิเล็กโทรไลต์ให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้นนั้น คือ สมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาของสารนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่ลดลงเมื่อขยายขนาดเซลล์สุริยะให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การผลิตต้นแบบมอดูลเซลล์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสงขนาดใหญ่ ควรต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นหลัก จากผลการทดลองพบว่าเซลล์สุริยะที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าร่วมและสารอิเล็กโทรไลต์ ขนาดพื้นที่รับแสง 2.25 cm^2 มีค่าฟิลล์แฟกเตอร์ต่ำ ($FF = 0.32$) และให้ค่าประสิทธิภาพเพียงครึ่งเดียวเมื่อเทียบกับผลทดสอบเซลล์มาตรฐานที่มีขนาดพื้นที่รับแสงเท่ากัน สาเหตุแรกในทางทฤษฎีขนาดพื้นที่รับแสงแปรผันตรงกับความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_{series}) ของเซลล์สุริยะ ยิ่งเซลล์สุริยะมีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นย่อมมี R_{series} เพิ่มขึ้นด้วย แนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้ เช่น การใช้เครื่อง ultrasonic soldering สร้างหน้าสัมผัสของเซลล์เพื่อลดค่า R_{series} บริเวณจุดเชื่อมต่อ และอีกสาเหตุหนึ่งคือตัวเซลล์ทดสอบมีความต้านทานชันท (R_{shunt}) ภายในเซลล์ต่ำเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากตัวเซลล์ทดสอบนั้นมีค่า charge transfer resistance (R_{CT}) ต่ำ ส่งผลให้เกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนจากชั้น TiO_2 สู่อิเล็กโทรไลต์ได้ง่าย แนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้ เช่น ทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสาร TiCl_4 สำหรับนำมาใช้ในขั้นตอน Post-treatment และสารนิกเกิลเฮลเลไนต์ที่นำมาใช้นั้นมีความต้านทานที่สูงขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์เมื่อเซลล์มีขนาดพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้นควรทดลองเปลี่ยนสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

นอกจากนั้นการลดการสูญเสียหรือการลดการตกกลับของอิเล็กตรอนบริเวณหน้าสัมผัสขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบภายใน DSSC ช่วยเพิ่มความต้านทานชันทได้ ส่งผลให้ค่า FF และประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้นถึงในระดับที่ยอมรับได้ นำไปสู่การขยายขนาดพื้นที่รับแสงของมอดูล DSSC เพิ่มขึ้นอีกในขั้นตอนถัดไป

รายการอ้างอิง

1. *The Alliance for Sustainable Energy, LLC. , NATIONAL CENTER FOR PHOTOVOLTAICS*. 2015; Available from: <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
2. *iEnergyGuru*. Available from: <https://ienergyguru.com/2015/06/>.
3. Vinich Promarak, S.S., Taweesak Sudyoadsuk and Tinnagon Keawin. *Dye-Sensitized Solar Cells*. Available from: www.ubu.ac.th/web/files_up/08f2013032015072362.pdf.
4. Chuangchote, D.S. *Nanotechnology of Dye-Sensitized Solar Cells*. Available from: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/th/>.
5. Yella, A., et al., *Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency*. science, 2011. **334**(6056): p. 629-634.
6. Kalnaowakun, P. *Preparation and Characterization of Coating Material as a Catalyst for Counter Electrode of Dye-Sensitized Solar Cell*. Available from: <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9451/1/374496.pdf>.
7. Mr.Phasapon Manosukritkul , D.P.P., Miss.Sirikwan Sudwatkeaw. *Study Dye-sensitizer on Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cells*. Available from: http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177375/ea2056efa5535d2c20e856114b4423e?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.6.
8. Gong, F., et al., *In situ growth of Co(0.85)Se and Ni(0.85)Se on conductive substrates as high-performance counter electrodes for dye-sensitized solar cells*. J Am Chem Soc, 2012. **134**(26): p. 10953-8.
9. *Development of low cost counter electrode DSSC*. Available from: <http://www3.rdi.ku.ac.th/?p=23292>.
10. Wootthikanokkhan, A.P.D.J. *Perovskite's material harvesting light for solar cell in the future*. Available from: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/>.
11. Dias, F.B., L. Plomp, and J.B. Veldhuis, *Trends in polymer electrolytes for secondary lithium batteries*. Journal of Power Sources, 2000. **88**(2): p. 169-191.

12. Stephan, A.M., *Review on gel polymer electrolytes for lithium batteries*. European polymer journal, 2006. **42**(1): p. 21-42.
13. *iEnergyGuru4*. Available from: <https://ienergyguru.com/2015/04/>.
14. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Available from: <https://www.nrel.gov/rredc/>.
15. SENATAM, M.C. *THE PORTABLE MEASUREMENT I-V CURVE OF SOLAR CELL PANEL*. 2014; Available from: <http://hrd.rmutl.ac.th/qa/docUpload/pj/3509900754841/150827122129fullpp.pdf>.
16. Honsberg, S.B.a.C. *PVCDROM*. Available from: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/instructions>.
17. Hunsom, P.D.M., *PEM fuel cell and Electrochemical analysis*. 2555.
18. Dai, S., et al., *Design of DSC panel with efficiency more than 6%*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005. **85**(3): p. 447-455.
19. Kim, H., et al., *Design and analysis of a highly reliable large-area Z-type transparent module for dye-sensitized solar cells*. Solar Energy, 2017. **155**: p. 585-592.
20. Renan Escalante, M.F.-P., R. Garcia-Rodriguez, G. Oskam. *Dye sensitized solar cell scale-up : from cell to module*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/271504719_Dye-sensitized_solar_cell_scale_up_from_cell_to_module.
21. Jia, J., et al., *Transparent nickel selenide used as counter electrode in high efficient dye-sensitized solar cells*. Journal of Alloys and Compounds, 2015. **640**: p. 29-33.
22. Pavithra, N., A.M. Asiri, and S. Anandan, *Fabrication of dye sensitized solar cell using gel polymer electrolytes consisting poly(ethylene oxide)-acetamide composite*. Journal of Power Sources, 2015. **286**: p. 346-353.
23. Anantharaj, G., et al., *Fabrication of Stable Dye Sensitized Solar Cell with Gel electrolytes Using Poly(ethylene oxide)-Poly(ethylene glycol)*. Electrochimica Acta, 2015. **176**: p. 1403-1409.

24. Sun, H., et al., *In situ preparation of a flexible polyaniline/carbon composite counter electrode and its application in dye-sensitized solar cells*. The Journal of Physical Chemistry C, 2010. **114**(26): p. 11673-11679.
25. Cheng, W.-Y., C.-C. Wang, and S.-Y. Lu, *Graphene aerogels as a highly efficient counter electrode material for dye-sensitized solar cells*. Carbon, 2013. **54**: p. 291-299.
26. *Polymeric Materials*. Available from:
http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/22/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2013%20Polymers.pdf

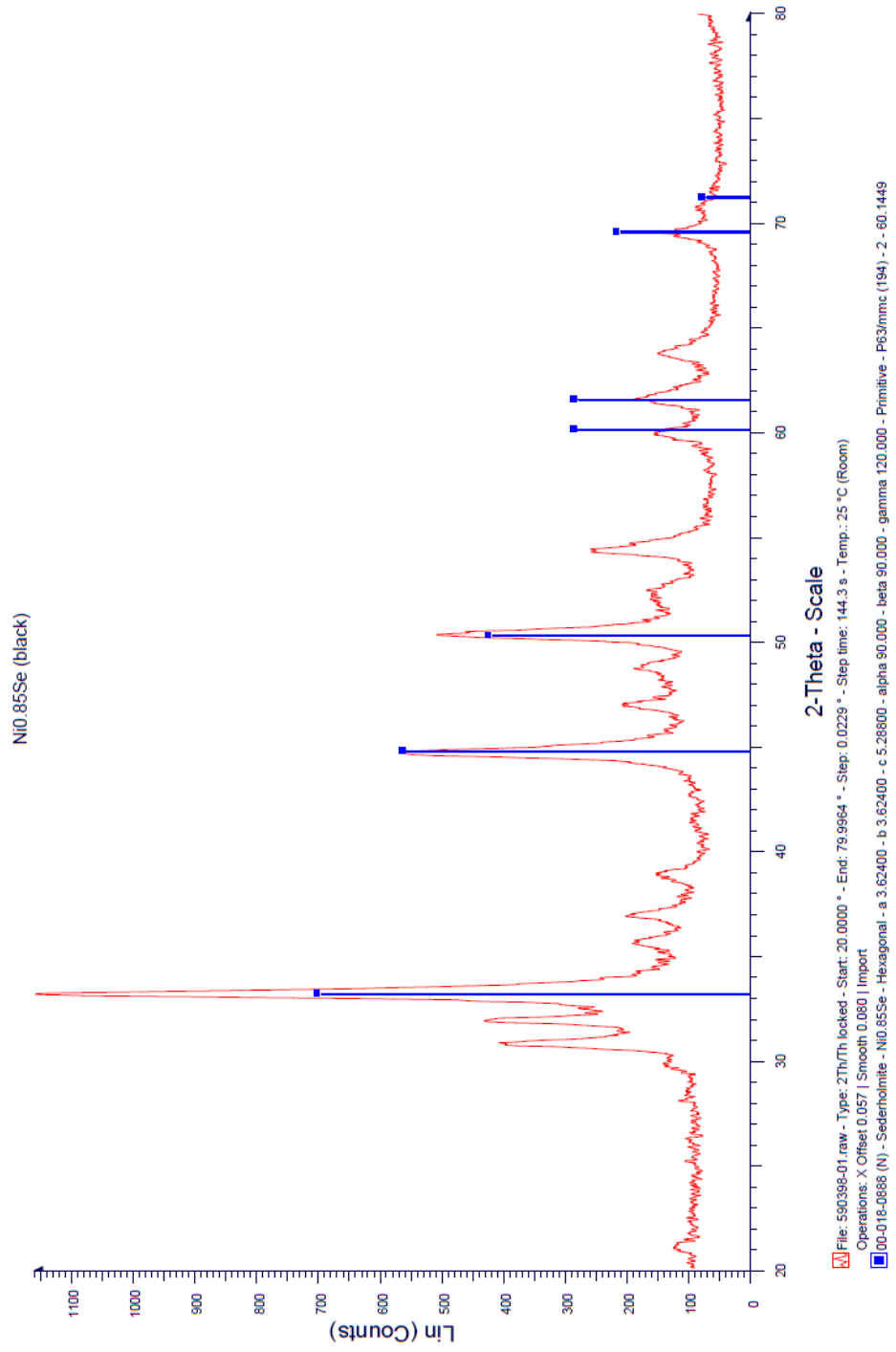




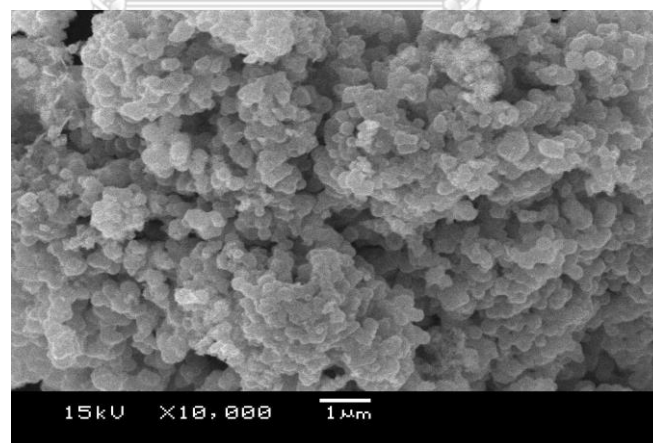
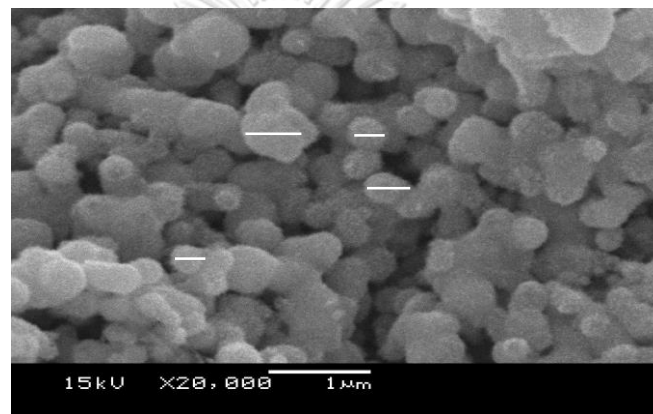
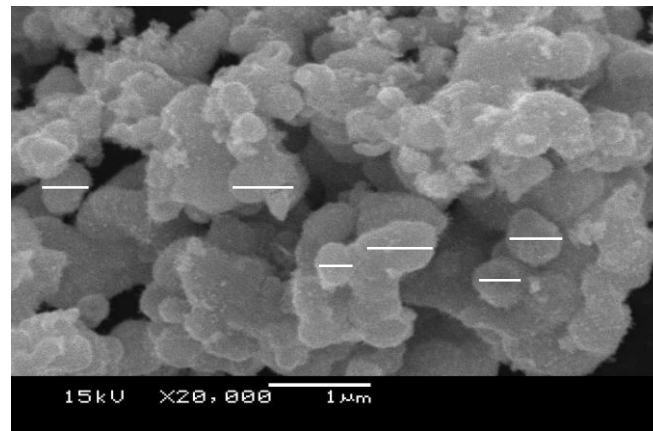
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.



ภาคผนวก ข.



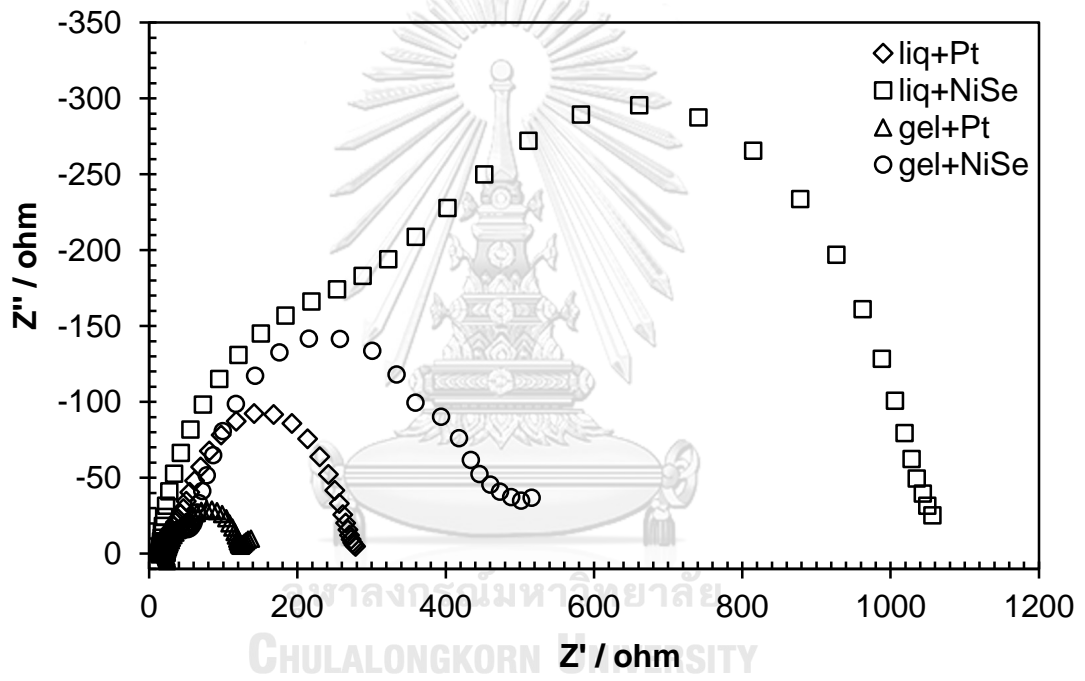
อนุภาคของสารประกอบนิกเกิลเจลลาตินที่เตรียมได้มีขนาดค่อนข้างเล็ก มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.3-0.5 ไมโครเมตร ซึ่งจากรูปภาพ SEM ทั้ง 3 รูป อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.4 ไมโครเมตร

ภาคผนวก ค.

DSSCs 0.25 cm ²	Samples	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	%PCE
Liq EL + Pt	STD1	0.68	6.9	0.65	3.0%
	STD2	0.67	6.3	0.66	2.8%
	STD3	0.65	7.1	0.64	2.9%
Liq EL + Ni _{0.85} Se	N1	0.67	5.8	0.66	2.6%
	N2	0.66	5.5	0.60	2.2%
	N3	0.63	6.0	0.64	2.4%
GPE 8% + Pt	W1	0.71	5.6	0.64	2.6%
	W2	0.71	4.3	0.69	2.1%
	W3	0.70	5.0	0.67	2.3%
GPE 8% + Ni _{0.85} Se	H1	0.72	6.5	0.46	2.2%
	H2	0.70	6.3	0.47	2.1%
	H3	0.72	6.3	0.45	2.0%

ภาคผนวก ง.

Nyquist plot at applied potential 0.7 V



ภาคผนวก จ.

DSSCs 2.25 cm ²		V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	%PCE	R _{shunt} (Ohm cm ²)	R _{series} (Ohm cm ²)
Liq EL/Pt- DSSC*	E1	0.68	7.8	0.54	2.8%	157	21
	E2	0.69	8.1	0.50	2.8%	150	25
	E3	0.69	7.9	0.51	2.7%	154	25
GPE/Pt- DSSC*	O1	0.61	8.7	0.41	2.1%	83	23
	O2	0.63	8.4	0.40	2.0%	84	22
GPE/NiSe- DSSC*	K4	0.61	7.4	0.32	1.4%	64	72
	K3	0.63	7.1	0.26	1.3%	42	79
	K5	0.61	7.1	0.30	1.3%	59	73

*Apply silver paint to produce conductive paths

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีระยุทธ์ เก้าเอี้ยน เกิดวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2534 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสภาราชนิ จังหวัดตรัง ในปีการศึกษา 2552 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และเข้าต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และเข้าร่วมประชุมวิชาการ TICHe & ITICHe 2016 ที่กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 26-28 ตุลาคม พ.ศ.2559 นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวเรื่อง "การพัฒนาอนุจุลเซลล์สุริยะเคมีไฟฟ้าเชิงแสงต้นทุนต่ำ"



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY