

การตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี
ยอมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์

CHARGE COLLECTION EFFICIENCY DETERMINATION OF
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี
ย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์

CHARGE COLLECTION EFFICIENCY DETERMINATION OF
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ วิทยาลัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

CHARGE COLLECTION EFFICIENCY DETERMINATION OF
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS



Mr.PONGSATORN TAPTONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ DEPARTMENT OF PHYSICS อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
 สีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์
 CHARGE COLLECTION EFFICIENCY DETERMINATION OF ZnO
 DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS

ชื่อนักศึกษา นายพงศธร เทพทอง รหัสนักศึกษา 54050557


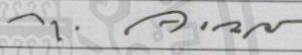
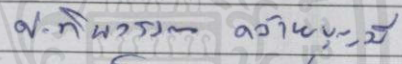
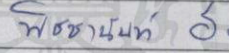
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โศภน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
 ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ		ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ	เตชิตธีระ	
ดร.กฤษกร	โล่เจริญรัตน์	
ดร.ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี	
ดร.พิชชานันท์	ธีเศรษฐ์โศภน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นายพงศธร เทพทอง รหัสนักศึกษา 54050557
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิชชานันท์ อีเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อนและศึกษาประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการกระตุ้นสีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อนอุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพสูงที่สุด (0.616%) เมื่อกระตุ้นสีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C สอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณสีย้อมบนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy) และผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุด้วยเทคนิค EIS ซึ่งพบปริมาณสีย้อมและประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุมีค่ามากที่สุดที่เมื่อย้อมสีที่อุณหภูมิ 50 °C ($8.317 \times 10^8 \text{ mol/cm}^2$ และ 97.558% ตามลำดับ) จากการวิเคราะห์ความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าการที่ประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้นเมื่อกระตุ้นกระบวนการย้อมสีด้วยความร้อนนอกจากจะเกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสีย้อมแล้วยังเกิดจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุที่ขั้วเวิร์กก็งอีกด้วย

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง, ซิงค์ออกไซด์, เทคนิคการกระตุ้นด้วยความร้อน, ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	CHARGE COLLECTION EFFICIENCY DETERMINATION OF ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS
Students	Mr.Pongsatorn Taptong Student ID 54050557
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2014
Advisor	Dr.Pichanan Teesetsopon

Abstract

This special project focuses on studying zinc oxide dye-sensitized solar cells (ZnO DSSCs) prepared by thermal stimulated N719 dye dipping process and determining charge collection efficiency by electrochemical impedance spectroscopy. The cells were prepared by stimulating N719 solution at 30 °C, 40 °C, 50 °C and 60 °C for 30 minutes. The highest efficiency cells were obtained when stimulating dye solution at 50 °C (0.616%). The highest dye loading amount and charge collection efficiency were also detected at 50 °C as determined by UV-VIS spectroscopy and electrochemical impedance spectroscopy ($8.317 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^2$ and 97.558%, respectively). Internal resistances determination indicated that efficiency enhancement in thermal stimulated ZnO-DSSCs was not only a result of dye loading increment but also charge collection efficiency enhancement at working electrodes.

Keywords: Dye-sensitized solar cells, Zinc oxide, Thermal stimulated technique, Charge collection efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ได้รับคำแนะนำและการชี้แนะต่างๆเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยความกรุณาจาก ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น รวมไปถึง รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ดร.กฤษกร ไล่เจริญรัตน์ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่ช่วยอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับสถานที่ทำการวิจัยและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการในการทำงานวิจัยที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจพร้อมทั้งคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ด้วยความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นายพงศธร

เทพทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	4
2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	4
2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	6
2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและการแสดงค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	7
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายใน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	11
2.3.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	11
2.3.2 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 กระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)	15
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า	15
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์(Counter electrode)	16
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (working electrode)	17
3.1.4 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	19
3.1.5 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้คิดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารตลอดทั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 กระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์	21
3.2.1 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า	21
3.2.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง N719 (Dye adsorption)	23
3.2.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	25
3.2.4 กระบวนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส(pH) ของสารละลายสีย้อมไวแสง N719	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C, 40°C, 50 °C และ 60°C	32
4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	34
4.3 การศึกษาสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	39
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
5.3 สิ่งที่ได้เรียนรู้จากการทำโครงงานพิเศษ	44
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	2
4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C	33
4.2 แสดงผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719	34
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นสีย้อมที่ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C	35
4.4 แสดงผลเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C	36
4.5 แสดงผลเปรียบเทียบความต่างศักย์วงจรปิดของ ZnO DSSCs เตรียมที่อุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C	37
4.6 แสดงผลเปรียบเทียบ Fill Factor ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C	38
4.7 แสดงผลเปรียบเทียบ efficiency ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C	39
4.8 ผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C โดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย	41
4.9 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C โดยใช้วงจรสมมูลอย่างละเอียด	42
4.10 แสดงประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับค่ามวลอากาศ	6
2.3 Sinusoidal Current Response in a Linear System	7
2.4 Origin of Lissajous Figure	8
2.5 Nyquist Plot with Impedance Vector	9
2.6 simple Equivalent Circuit with One Time Constant	10
2.7 Plot with One Time Constant	11
2.8 แสดงวงจร RC ต่อขนานอย่างง่าย	12
2.9 วงจรสมมูล	13
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	14
3.2 (a) มีดกรีดกระจก, (b) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 x 1.5 ซม	15
3.3 เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner)	16
3.4 (a) ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์, (b) เต้าเผา	17
3.5 (a) hot plate stirrer, (b) สีย้อมไวแสง N719	18
3.6 ขั้วไฟฟ้าเวิร์กกิ้งก่อน-หลังจุ่มสีย้อม	19
3.7 (a) ตำแหน่งการวางบล็อก, (b) การประกบเซลล์	20
3.8 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSCs	22
3.9 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye adsorption	24
3.10 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความต้านทานเชิงเชิงซ้อน	25
3.11 แสดงการจัดตำแหน่งในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 กับอุณหภูมิการจุ่มสีย้อม	33
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ซึ่งกระตุ้นสีย้อม N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C	35
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมโดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมโดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C	37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fill Factor ของ DSSCs กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมโดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า efficiency กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C	39
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง-Z" (Ω) กับ Z'(Ω)ของอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C	40
4.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NOVA 1.8	40
4.9 วงจรสมมูลอย่างละเอียดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NOVA 1.8	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
DSSCs	Dye-Sensitized solar cells
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
Z	Impedance
R	Resistance
KOH	Potassium Hydroxide
Pt	Platinum
I_{sc}	Short Circuit Current
V_{oc}	Open Circuit Voltage
J_{sc}	Short Circuit Current Density
FF	Fill Factor



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อมนุษย์และความสำคัญมากขึ้นเมื่อโลกมีการพัฒนามากยิ่งขึ้นแหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติเช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้นเริ่มลดน้อยลงไปเรื่อยๆและกำลังจะหมดไปในอนาคตข้างหน้านี้ มนุษย์จึงเสาะหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาดมาทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ตัวอย่างของพลังงานดังกล่าวได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าทดแทนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน ผลึกซิลิกอนที่บริสุทธิ์มีเทคโนโลยีการผลิตที่ซับซ้อนและยังมีราคาสูงดังนั้นนักวิจัยจึงคิดค้นและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ขึ้นเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่า “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells, DSSC)”

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่ย้อมด้วยสีย้อม สารส่งผ่านประจุหรืออิเล็กโทรไลต์ และกระจกนำไฟฟ้า การวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์ไฟฟ้าเคมีจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคือออกไซด์ทำได้โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์

อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะสามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSC) ไปใช้กับอุปกรณ์ภายนอกยังคงมีความจำเป็นต้องพัฒนาประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.2.2 เพื่อเรียนรู้วิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคกระตุ้นสีย้อมด้วยความร้อน

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคือออกไซด์เมื่อย้อมสีที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.3.2 ศึกษาขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคกระตุ้นสีย้อมด้วยความร้อน

1.3.3 ศึกษาขั้นตอนและหลักการในการวิเคราะห์ห้วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.3.4 วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 สืบค้นหาข้อมูลและศึกษาหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหลักการทำงานและการใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมอุปกรณ์ จัดซื้อสารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเชิงคอกซ์ไต์ที่จุ่มสีย้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิต่างๆ ในระยะเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์และทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเชิงคอกซ์ไต์โดยใช้เทคนิค UV-Vis spectrometer, I-V characterization, Electrochemical Impedance Spectroscopy, pH determination

ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
วิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

ปีการศึกษา	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2557	ขั้นตอนที่ 1					
	ขั้นตอนที่ 2					
	ขั้นตอนที่ 3					
	ขั้นตอนที่ 4					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี การศึกษา	การ ดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
2557	ขั้นตอนที่ 4					
	ขั้นตอนที่ 5					
	ขั้นตอนที่ 6					

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเชิงคอกซ์ไวด์ด้วยเทคนิคกระตุ้นสีย้อมด้วยความร้อน

1.5.3 มีความรู้ความสามารถในการวัดและวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิคต่างๆเช่น UV-Vis spectrometer, I-V characterization, Electrochemical Impedance Spectroscopy เป็นต้น

1.5.4 มีทักษะกระบวนการวิจัยตามหลักการทางวิทยาศาสตร์

1.5.5 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในอนาคตต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นอุปกรณ์สำหรับการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (โฟตอน) มาเปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้าโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นโมเลกุลของสีย้อมไวแสงด้วยแสงที่มากกระทบไปยังสารกึ่งตัวนำที่มีชั้นระดับพลังงานที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ ซึ่งนิยมใช้สารประกอบโลหะออกไซด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ที่มีรูพรุนเป็นทั้งตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนและตัวยึดเกาะโมเลกุลสีย้อม ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 15%[1]

2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญคือ ขั้วไฟฟ้า อนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงและสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่สำคัญดังนี้[2]

1 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมี 2 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ทำหน้าที่ปล่อยแสงผ่านไปกระตุ้นสีย้อมเพื่อสร้างและถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ นิยมใช้ fluorine doped tin oxide (FTO) เคลือบอยู่บนกระจกให้เป็นกระจกนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้านี้ ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (counter electrode) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังสีย้อมภายในเซลล์ นิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์ที่เคลือบอยู่บนกระจกสำหรับการกระตุ้นปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วไฟฟ้านี้

2 อนุภาคโลหะออกไซด์

อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะรวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น

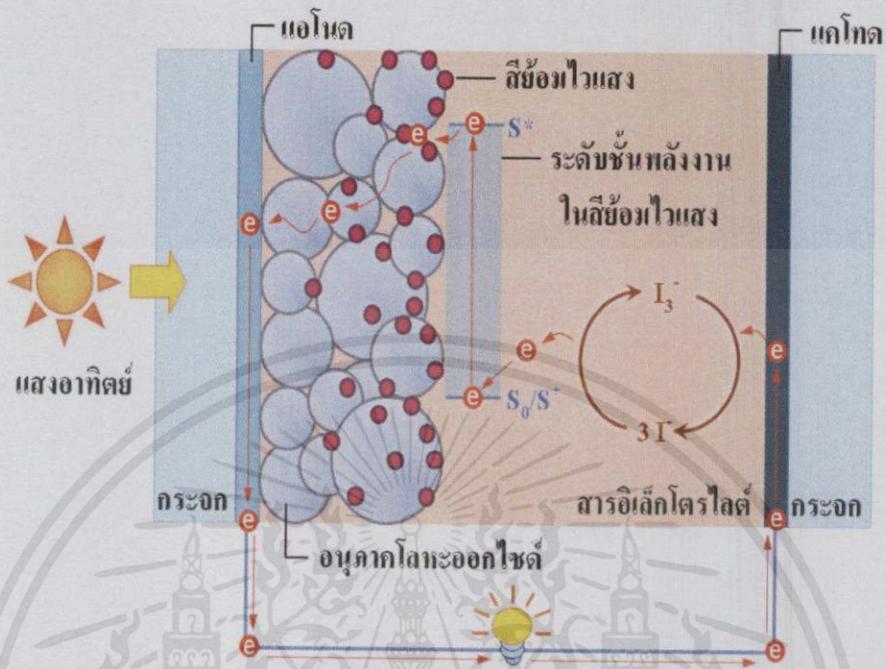
3 สีย้อมไวแสง

สีย้อมไวแสงมักทำจากโมเลกุลเชิงซ้อนของรูทีเนียม (Ruthenium complexes) ซึ่งสามารถสร้างอิเล็กตรอนได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงโดยโมเลกุลนี้จะยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ จึงสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ผ่านกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงออกไปใช้งานได้ ดังนั้นสีย้อมไวแสงจึงควรมีสมบัติการดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียรและยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

4 อิเล็กโทรไลต์

อิเล็กโทรไลต์มักอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดมาชดเชยให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) จึงเสมือนเป็นชั้นส่งผ่านประจุคืนกลับสู่สีย้อม

2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง อธิบายได้ดังนี้ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [2]

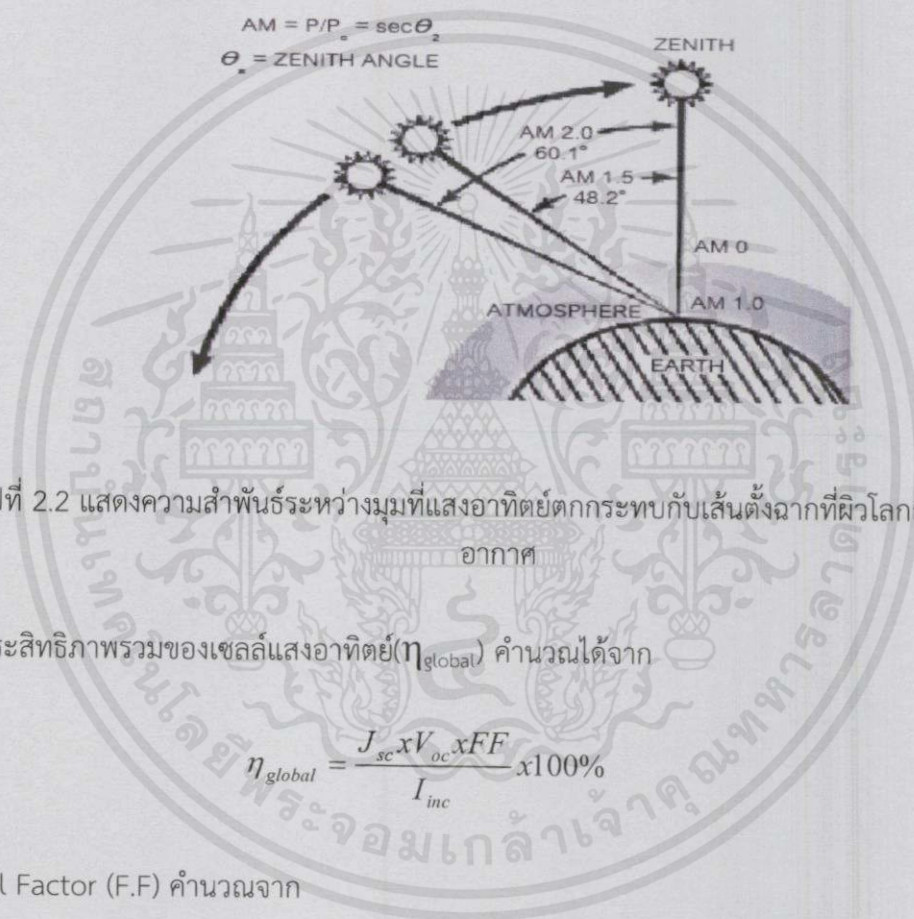
เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (จะดูดกลืนแสง เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state, S_0) ให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state, S^*) จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ของอนุภาคโลหะออกไซด์แล้วเคลื่อนที่ต่อไปยังกระจกไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดก่อนออกสู่วงจรภายนอกเซลล์

อิเล็กตรอนที่ผ่านการใช้งานจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทดซึ่งเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ที่ขั้วนี้ไอเล็กโตรไลต์จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยรับและส่งอิเล็กตรอนคืนให้กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) แต่ในระหว่างกระบวนการเหล่านี้ก็อาจมีการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ซึ่งเกิดจากการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงหรือสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับไอเล็กโตรไลต์ อิเล็กตรอนที่โมเลกุลสีย้อมสร้างได้บางส่วนจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากค่า Air Mass, AM ซึ่งมีค่า $AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$ เมื่อ θ_z คือมุม zenith ค่า AM จะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 0 องศา กับพื้นโลกและเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่นำมาทดสอบดังนั้น American Society for Testing and Materials (ASTM) จึงได้กำหนดค่า AM ขึ้นเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือ AM 1.5 โดยมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 [3]



$$\eta_{global} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{I_{inc}} \times 100\% \quad (2.1)$$

ค่า Fill Factor (F.F) คำนวณจาก

$$FF = \frac{J_{max} \times V_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.2)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

V_{oc} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานวิจัยทางเทคนิคเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและการแสดงค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน[4]

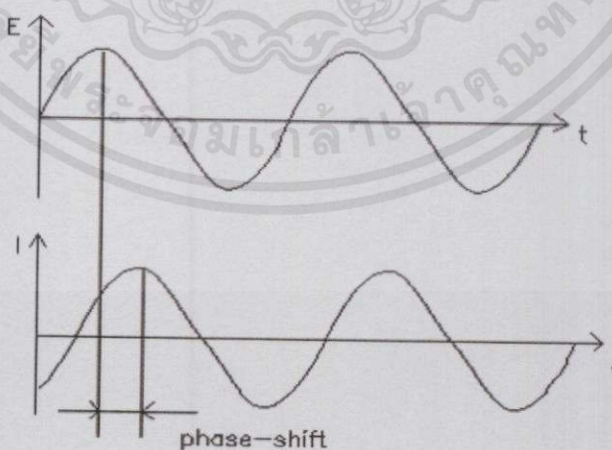
หลักการของความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอุปกรณ์ ที่ทำหน้าที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์มได้ให้คำจำกัดความของความต้านทานว่าเป็นสัดส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

แม้ว่าความสัมพันธ์นี้จะเป็นที่รู้จักแพร่หลายแต่การใช้งานยังคงสามารถใช้งานได้จำกัดกับอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียวหรือเราอาจเรียกความต้านทานนี้ว่าความต้านทานในอุดมคติ (Ideal Resistor)

ในความเป็นจริงแล้วยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนกว่าความต้านทานในอุดมคติซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ทำให้เราต้องทิ้งหลักการของความต้านทานอย่างง่ายไป แต่เราจะเรียกแทนความต้านทานนั้นว่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าที่ใช้งานได้ทั่วไปแทนโดยอิมพีแดนซ์นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับความต้านทานคือเป็นอุปกรณ์ที่ต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่สิ่งแตกต่างออกไปคืออิมพีแดนซ์นั้นอยู่นอกเหนือกฎเกณฑ์ของความต้านทานที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

การวัดค่าอิมพีแดนซ์นั้น โดยปกติจะวัดได้โดยการให้แรงดันกระแสสลับกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี และวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้านั้น โดยในที่นี้สมมติว่าเราทำการให้แรงดันที่มีการกระตุ้นแบบคลื่นไซน์กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะทำให้ได้ผลตอบสนอง ต่อแรงดันเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งประกอบไปด้วยความถี่ที่ถูกกระตุ้นและค่าฮาร์โมนิกซึ่งกระแสไฟฟ้านี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาผลรวมของฟังก์ชันไซน์

Electrochemical impedance ปกติทำการวัดโดยใช้สัญญาณกระตุ้นที่มีขนาดเล็กซึ่งทำให้ผลตอบสนองของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นจริงเชิงเส้น ผลตอบสนองต่อแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์จะเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณกระตุ้นแต่มีการเลื่อนของเฟสดังรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.3 Sinusoidal Current Response in a Linear System [5] ที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

$E(t)$ เป็นแรงดัน ณ เวลา E_0 เป็นค่าแอมพลิจูดของสัญญาณและ ω คือความถี่เชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุมโดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม และ ความถี่ คือ

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

สัญญาณตอบสนองในระบบเชิงเส้น จะมีการเลื่อนของเฟสและมีแอมพลิจูดเท่ากับ I_0

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (2.5)$$

ซึ่งอธิบายค่าโดยใช้วิธีคล้ายกับกฎของโอห์มจะทำให้เราสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{E_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \phi)} \quad (2.6)$$

ดังนั้นเราสามารถทำการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของขนาด Z_0 และค่าของเฟสที่เลื่อนไป ϕ ได้

หากทำการพลอตค่าสัญญาณคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้าบนแกน x และทำการป้อนสัญญาณตอบสนอง $I(t)$ บนแกน y จะได้รูปกราฟรูปไข่ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งวงกลมรูปไข่นี้รู้จักกันชื่อ Lissajous โดยการวิเคราะห์รูป Lissajous บนหน้าจอสซิลิโคสโคป เป็นวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เนื่องจากความสามารถ Lock-in amplifier และ Frequency response analyzer นั้นเอง

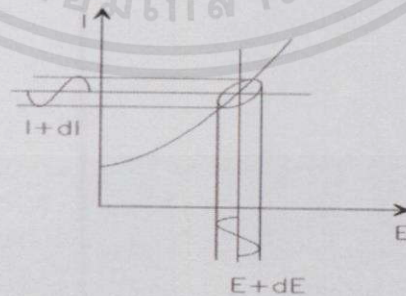


Figure 2. Origin of Lissajous Figure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 Origin of Lissajous Figure [5]

นำสมการความสัมพันธ์ของ Euler's มาใช้จะได้ว่า

$$\exp(j\phi) = \cos\phi + j\sin\phi \quad (2.7)$$

ซึ่งเป็นไปตามที่เขียนอธิบายค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของฟังก์ชันของจำนวนเชิงซ้อนได้โดยแรงดันจะสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$E_i = E_0 \exp(j\omega t) \quad (2.8)$$

และสามารถอธิบายกระแสได้ดังนี้

$$I_i = I_0 \exp(j\omega t - \phi) \quad (2.9)$$

การนำเสนอข้อมูลหากสังเกตจากสมการการแสดงค่า $Z(\omega)$ นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพโดยหากทำการทดลองการพลอตส่วนที่เป็นจำนวนจริงบนแกน x และส่วนจินตภาพบนแกน y ของกราฟเราจะได้กราฟซึ่งเรียกว่า "Nyquist Plot" ดังรูปที่ 2.5

จะสังเกตว่าในการพลอตค่านี้แกน y จะมีค่าติดลบและจุดแต่ละจุดบน Nyquist Plot จะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ความถี่ใดความถี่หนึ่ง

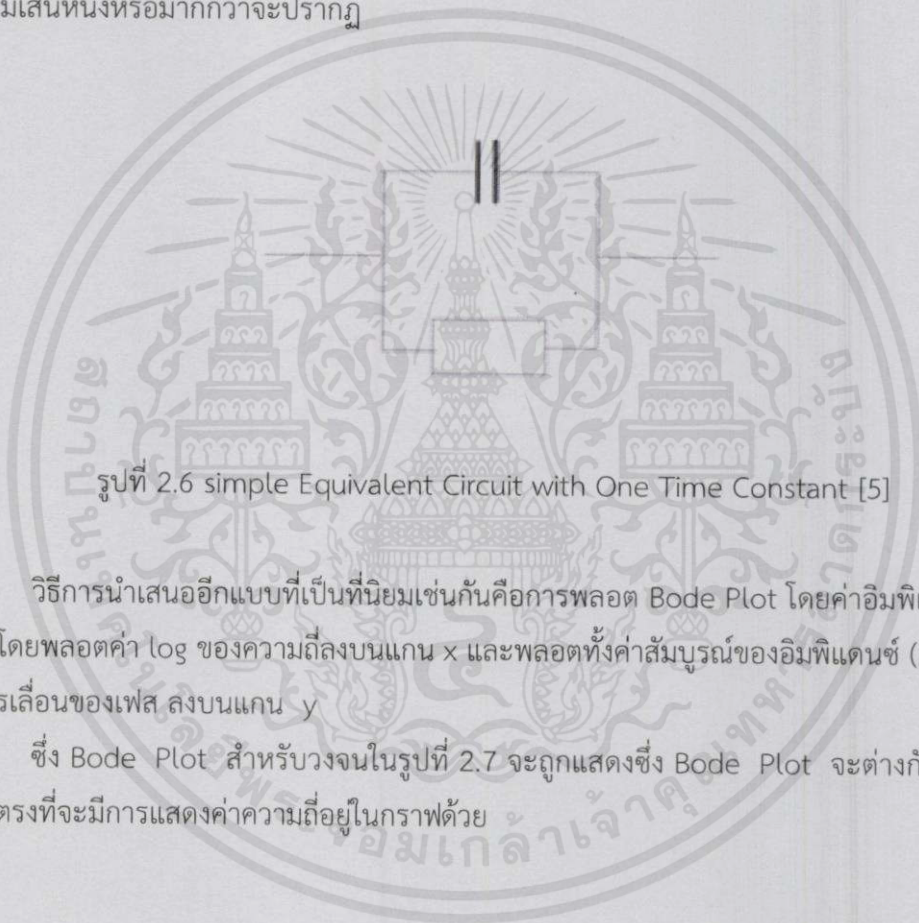


รูปที่ 2.5 Nyquist Plot with Impedance Vector [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าข้อมูลที่มีค่าความถี่ต่ำจะอยู่บริเวณด้านขวาของกราฟส่วนที่มีความถี่สูงจะอยู่ด้านซ้ายของกราฟซึ่งเป็นจริงสำหรับข้อมูลจาก EIS ที่ค่าอิมพีแดนซ์มักจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น บน Nyquist Plot นั้น ค่าของอิมพีแดนซ์จะสามารถแสดงได้ดีโดยความยาวของเวกเตอร์ Z และมุมของของเวกเตอร์เมื่อวัดจากแกน x คือค่าความถี่ f Nyquist Plot นั้นมีข้อเสียอยู่เมื่อทำการอ่านข้อมูล ณ จุดหนึ่งของกราฟเราจะไม่สามารถบอกได้เลยว่าจุดจุดนั้นถูกบันทึกโดยใช้ความถี่เท่าใด

Nyquist Plot ดังรูปที่ 2.7 นั้นเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.8 ซึ่งรูปครึ่งวงกลมนั้นเป็นคุณสมบัติเฉพาะของระบบที่มีค่า time constant ค่าเดียวในขณะที่โดยปกติแล้วการพลอตค่า Electrochemical Impedance มักจะพบค่า time constant หลายค่าและบ่อยครั้งที่ส่วนของครึ่งวงกลมเส้นหนึ่งหรือมากกว่าจะปรากฏ

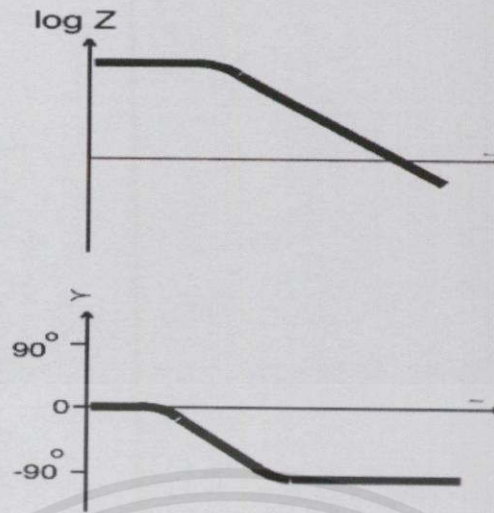


รูปที่ 2.6 simple Equivalent Circuit with One Time Constant [5]

วิธีการนำเสนออีกแบบที่เป็นที่นิยมเช่นกันคือการพลอต Bode Plot โดยค่าอิมพีแดนซ์จะถูกแสดงโดยพลอตค่า \log ของความถี่ลงบนแกน x และพลอตทั้งค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์ ($Z=Z_0$) และค่าการเลื่อนของเฟส ลงบนแกน y

ซึ่ง Bode Plot สำหรับวงจรถูกแสดงซึ่ง Bode Plot จะต่างกับ Nyquist Plot ตรงที่จะมีการแสดงค่าความถี่อยู่ในกราฟด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Bode Plot with One Time Constant [5]

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.3.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.3.11 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.10)$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น

$$Z_C = \frac{1}{j\omega c} = \frac{-j}{\omega c} \quad (2.11)$$

และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S + \frac{-j}{\omega c} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

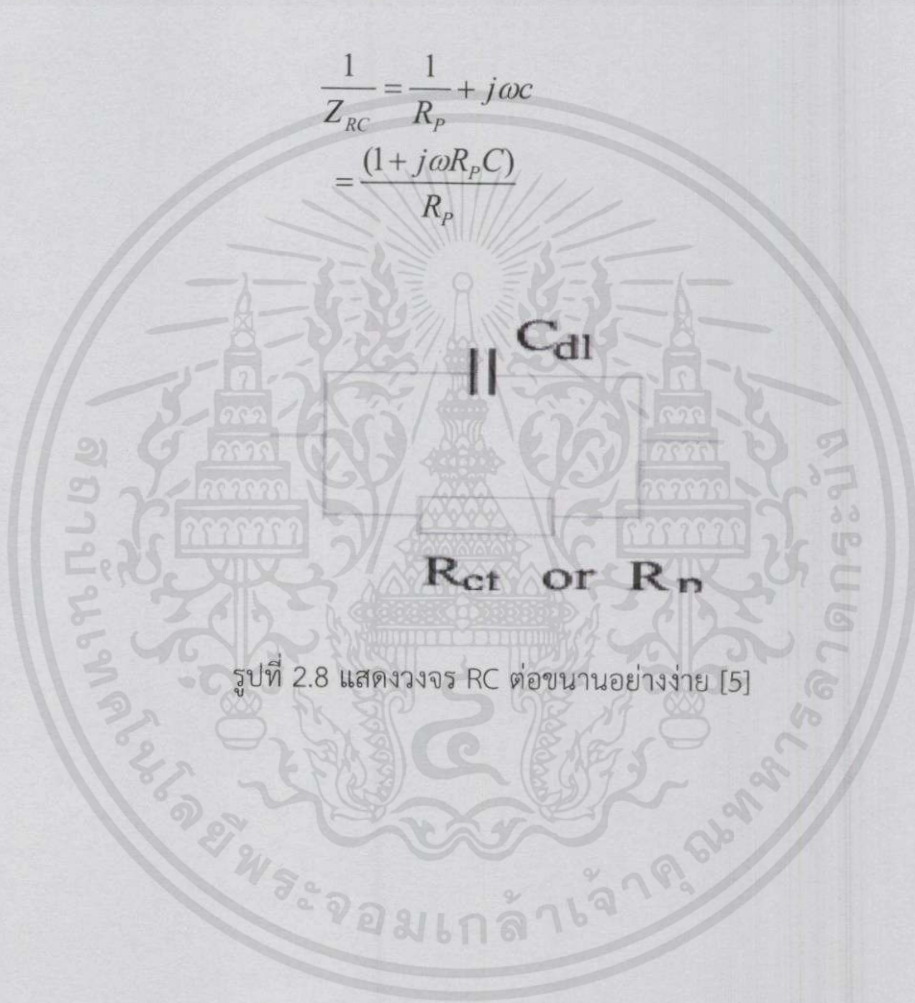
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.8 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.13)$$

ในกรณีนี้ให้ Z_R กับ R_p ดังรูปที่ 2.8 ดังสมการ (2.14) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega c \quad (2.14)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.15)$$

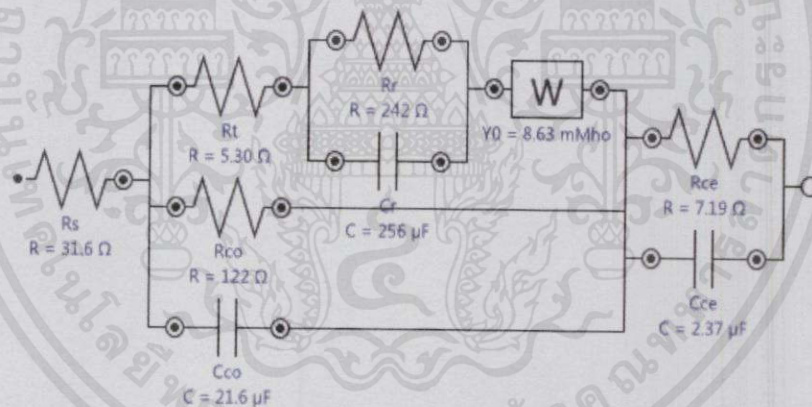


รูปที่ 2.8 แสดงวงจร RC ต่อขนานอย่างง่าย [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง[6]

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง สามารถสร้างได้โดยอาศัยการเทียบวงจรกับการไหลของอิเล็กตรอนภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ DSSCs ตัวอย่างเช่น เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านหน้าสัมผัสต่างๆที่ขั้วไฟฟ้าลบซึ่งประกอบไปด้วย กระจกนำไฟฟ้า อนุภาคซิงค์ออกไซด์และโมเลกุลสีย้อม อิเล็กตรอนบางส่วนจะสามารถไหลผ่านรอยต่อที่หน้าสัมผัสนี้ได้ เสมือนผ่านตัวต้านทานแต่ อิเล็กตรอนอิเล็กตรอนบางส่วนอาจตกค้างอยู่ที่รอยต่อซึ่งจะเปรียบเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ แต่ละหน้าสัมผัสจึงเปรียบเสมือนเป็นวงจรขนาน RC สำหรับอิเล็กตรอนในกรณีของ DSSCs มีหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุต่างประเภทหลักๆอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าลบ และขั้วไฟฟ้าบวก จึงสามารถสร้างวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ R_s คือ ความต้านทานรวมภายในวงจรซึ่งเกิดจากความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าเป็นหลัก วงจรขนานระหว่าง R_{ce} และ C_{ce} แทนหน้าสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้าบวก และในขั้วลบประกอบไปด้วย R_e คือค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนผ่านอนุภาคสารกึ่งตัวนำซึ่งต่ออนุกรมกับวงจรขนานระหว่าง R_f และ C_f ซึ่ง R_f คือค่าความต้านทานการสูญเสียประจุ ซึ่งทั้งหมดต่อขนานกับวงจรขนานระหว่าง R_{co} และ C_{co} ซึ่ง R_{co} คือค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโตรโพลต์กับกระจก และ W แทนความต้านทานการแพร่ของไอออนในอิเล็กโตรโพลต์



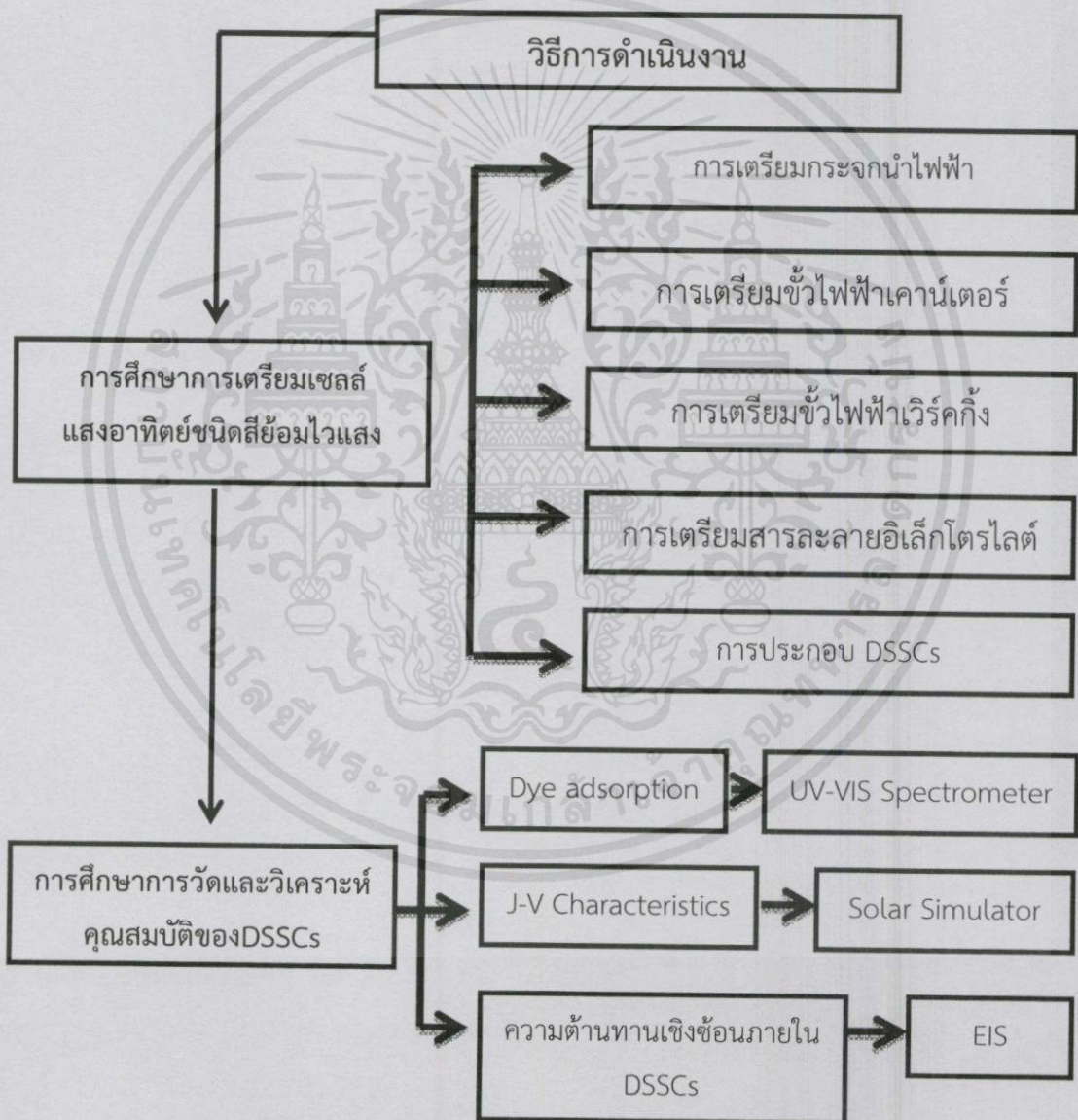
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยจะทำการศึกษากระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง(Dye-Sensitized Solar cells : DSSCs) โดยใช้สีย้อมไวแสง N719 เพื่อพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง(DSSCs) มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์ ซึ่งแบ่งหัวข้อการดำเนินงานวิจัยดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 กระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า

1. วัดขนาดกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass, $15\Omega/\text{square}$) ให้มีขนาด 1×1.5 ซม. จากนั้นตัดกระจกโดยใช้มีดกรีดกระจกตามขนาดที่วัดไว้ แล้วหักกระจกตามรอยที่กรีดก็จะได้กระจกนำไฟฟ้าตามขนาดที่ต้องการ

2. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการตัดแล้วมาเจาะรู โดยใช้สว่านและดอกสำหรับเจาะกระจก ซึ่งจะวางกระจกนำไฟฟ้าไว้ในจานเพาะเชื้อ (petridish) ที่บรรจุน้ำ (เพื่อลดอุณหภูมิและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการเจาะกระจก) เจาะรู 2 รู เพื่อทำเป็นรูสำหรับหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปสู่พื้นที่เซลล์ กระจกนำไฟฟ้าที่เจาะรูนี้จะถูกนำไปใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)



รูปที่ 3.2 (a) มีดกรีดกระจก, (b) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม.

3. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเจาะรูและกระจกนำไฟฟ้าที่จะนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (working electrode) ไปทำความสะอาด ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ล้างกระจกด้วยผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดคราบสกปรก(น้ำยาล้างจาน) โดยเทน้ำยาลงบนฟองน้ำผสมน้ำสะอาดเล็กน้อย ให้นำหัวกระจกหลังจากนั้นล้างฟองออกด้วยน้ำสะอาด

3.2 ล้างกระจกด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionized Water) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำปลอดประจุให้ท่วมกระจก นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

3.3 ล้างกระจกด้วยอะซิโตน (Acetone) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทอะซิโตนให้ท่วมกระจก นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

3.4 ล้างกระจกด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionized Water) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำปลอดประจุให้ท่วมกระจก นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

3.5 ล้างกระจกด้วยเอทานอล (Ethanol) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทเอทานอลให้ท่วมกระจก นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

3.6 ล้างกระจกด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionized Water) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำปลอดประจุให้ท่วมกระจก นำเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

4. นำกระจกที่ผ่านกระบวนการล้างเสร็จสิ้นแล้ว เก็บไว้ในภาชนะปิดที่บรรจุน้ำปลอดประจุ (Deionized Water) โดยให้ปริมาณของน้ำปลอดประจุท่วมกระจก



รูปที่ 3.3 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)

1. อุปกรณ์และสารเคมี

1.1 กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม.

1.2 มีดโกนมีด้าม

1.3 บล็อกสกรีนขนาด 0.7×0.7 ซม.

1.4 โวลต์มิเตอร์

1.5 แพลทินัม (Pt) ผลิตโดยบริษัท A Aldrich Chemistry

1.6 เตาเผา (Isotemp Programmable Muffle Furnace 650-750 Series)

2. การเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

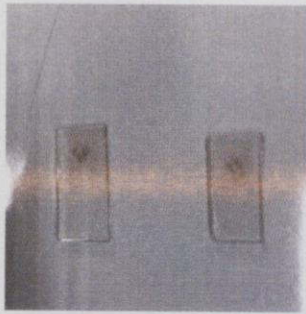
2.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม. ที่ผ่านการเจาะรูสำหรับฉีดยาละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำความสะอาดแล้ว วางลงบนพื้นที่สะอาดโดยให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น

2.2 นำบล็อกสกรีน (สติ๊กเกอร์) ทาบลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้า ให้บริเวณของบล็อกสกรีนอยู่บนพื้นผิวกระจกยึดกับพื้นรองให้แน่น

2.3 หยดแพลทินัมปริมาณ 0.5 ไมโครลิตร ลงบนบล็อกสกรีนที่ติดอยู่บนกระจก รอจนคริมแพลทินัมแห้ง

2.4 นำกระจกที่เคลือบคริมแพลทินัมแล้วเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 3.4 (a) ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์, (b) เตาเผา

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (working electrode)

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1 กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 x 1.5 ซม.
- 1.2 มีดโกนมีด้าม
- 1.3 บล็อกสกรีนขนาด 0.7 x 0.7 ซม.
- 1.4 โวลต์มิเตอร์
- 1.5 เตาเผา (Isotemp Programmable Muffle Furnace 650-750 Series)
- 1.6 เครื่อง Hot Plate & Stirrer ผลิตโดยบริษัท Bangkok Equipment & Chemical
- 1.7 ครีมซิงค์ออกไซด์
- 1.8 หลอดทดลอง

2. ขั้นตอนการเตรียมครีมซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ส่วนประกอบของครีมซิงค์ออกไซด์

- ซิงค์ออกไซด์ ผลิตโดยบริษัท A Aldrich Chemistry
- เอทานอล ความเข้มข้น 0.79 M
- ตัวประสาน (Triton X-100)

ทำการเตรียมซิงค์ออกไซด์ต่อเอทานอลในอัตรา 1:1.25 โดยน้ำหนัก โดยมีขั้นตอนการเตรียม

ดังนี้

2.1 ทำการเตรียมปริมาณสาร

- ซิงค์ออกไซด์ (MW 81.39) จำนวน 0.50 g
- เอทานอล (MW 46.07 g/mol) จำนวน 0.79 ml
- ตัวประสาน (Triton X-100) จำนวน 0.15 ml

2.2 นำ Magnetic bar ขนาด 10 x 6 mm ใส่หลอดทดลอง เทซิงค์ออกไซด์ประมาณ

0.25 g จากนั้นเติมเอทานอล ปริมาณ 0.4 ml ตามลงไป ในหลอดทดลอง ปิดจุกหลอดทดลองให้แน่น

2.3 นำหลอดทดลองไปเข้าเครื่อง Hot Plate & Stirrer กวนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้น เทซิงค์ออกไซด์อีกประมาณ 0.15 g แล้วเติมเอทานอลเพิ่มอีก 0.23 ml กวนต่ออีก 10 นาที

2.4 หลังจากนั้นเทซิงค์ออกไซด์ส่วนที่เหลือทั้งหมด แล้วเติมเอทานอล อีก 0.16 ml และสุดท้ายเติมตัวประสาน จำนวน 0.15 ml กวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมไวแสง N719

ส่วนประกอบในการเตรียมสีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น 0.5 mM

-สีย้อมไวแสง N719 (MW 1187.7 g/mol)

-เอทานอล (MW 46.07 g/mol)

3.1 การเตรียมปริมาณ

-สีย้อมไวแสง N719 จำนวน 0.1068 g

-เอทานอลจำนวน 180 ml

3.2 นำสีย้อมไวแสง N719 เทลงบนภาชนะ(โหล)ที่เตรียมไว้ จากนั้นเทเอทานอลลงไป ปิดฝาภาชนะให้สนิท

3.3 จากนั้นนำไปกวนบนเครื่อง hot Plate & Stirrer เป็นเวลา 15 ชั่วโมงก็จะได้สีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น 0.5 mM ปริมาณ 180 ml



(a)



(b)

รูปที่ 3.5 (a) hot plate stirrer, (b) สีย้อมไวแสง N719

4. การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง

4.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 x 1.5 ซม. ที่ทำความสะอาดแล้วไปเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ โดยวางลงบนพื้นที่สะอาดโดยให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น

4.2 นำบล็อกสกรีน(สติ๊กเกอร์) ทาบลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้า ให้บริเวณของบล็อกสกรีนอยู่บนพื้นผิวกระจกยึดกับพื้นรองให้แน่น

4.3 ตักครีมซิงค์ออกไซด์ใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีนที่ติดอยู่บนกระจกใช้มีดโกนมีดามบาดครีมซิงค์ออกไซด์ให้เต็มบล็อกสกรีน รอจนครีมซิงค์ออกไซด์แห้ง

4.4 นำกระจกที่เคลือบคริมซิงค์ออกไซด์แล้วเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับค่า heating rate 5 °C ต่อ 1 นาที

4.5 ปลอ่ยกระจกที่ผ่านการเผาทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือจนกว่ากระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในบริเวณที่ไม่มีควมชื้น

4.6 นำกระจกที่เคลือบคริมซิงค์ออกไซด์และผ่านกระบวนการเผาแล้วไปจุ่มสีย้อม N719 โดยจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที

4.7 ทำความสะอาดกระจกโดยเช็ดส่วนของสีย้อมที่เกินออกมาจากพื้นผิวของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ด้วยเอทานอล



รูปที่ 3.6 ขั้วไฟฟ้าเวิร์กกิ้งก่อน-หลังจุ่มสีย้อม

3.1.4 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1. ส่วนประกอบเซลล์และอุปกรณ์ประกอบเซลล์

1.1 กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์กกิ้ง

1.2 กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

1.3 บล็อกขนาด 0.5 x 0.5 ซม.

1.4 เครื่อง Hot Plate & Stirrer ผลิตโดยบริษัท Bangkok Equipment & Chemical

1.5 คีมคีบ

1.6 สารละลายอิเล็กโตรไลต์ ผลิตโดยบริษัท Solaronix

2. วิธีประกอบเซลล์

2.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์กกิ้งวางบนพื้นผิวเรียบ จากนั้นเอาบล็อกทาบลงบนกระจกให้บริเวณบล็อกตรงกับพื้นที่เซลล์

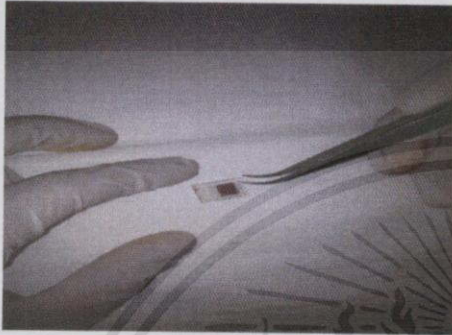
2.2 จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ประกบโดยให้บริเวณที่เคลือบแพลทินัมตรงกับช่องของบล็อก

2.3 จากนั้นนำเซลล์ที่ประกบแล้วไปวางบนเครื่อง Hot Plate ที่อุณหภูมิ 150 °C สังเกตการละลายของบล็อก ใช้คีมคีบตะแตะเพื่อให้ขั้วทั้งสองผนึกกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับงานวิจัยของงานวิจัยและพัฒนาของงานวิจัยและพัฒนา

2.4 จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เข็มฉีดยาเข้าไปตรงรูข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปแทนที่อากาศภายในเซลล์

2.5 หลังจากนั้นปิดรูสำหรับเติมสารด้วยสก็อตเทปเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เราก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เสร็จสมบูรณ์สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



(a)



(b)

รูปที่ 3.7 (a) ตำแหน่งการวางบล็อก, (b) การประกบเซลล์

3.1.5. ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH)

1. ส่วนประกอบของสารละลาย KOH

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (MW 56.11 g/mol)
- น้ำปอดประจุ (Deionized water)(MW 18.02 g/mol)

2. วิธีการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 mM

2.1 เตรียมปริมาณสาร

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จำนวน 0.02244g
- น้ำปอดประจุ (Deionized water) ปริมาณ 200ml

2.2 นำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เทใส่บีกเกอร์ จากนั้นเทน้ำปอดจทั้งหมดลงไปปิดฝาให้แน่นสนิท

2.3 นำไปผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner ให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำปอดประจุจนกลายเป็นสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์

3.2.1 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

3.2.1.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของ DSSCs

ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์หาได้จากสมการ 3.1

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% \text{ หรือ } \eta = \frac{J_{\max} V_{\max}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ J_{\max} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด

V_{\max} คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

การคำนวณหาค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) หาได้จากสมการ 3.2

$$FF = \frac{J_{\max} V_{\max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (3.2)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

เมื่อ V_{oc} คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด

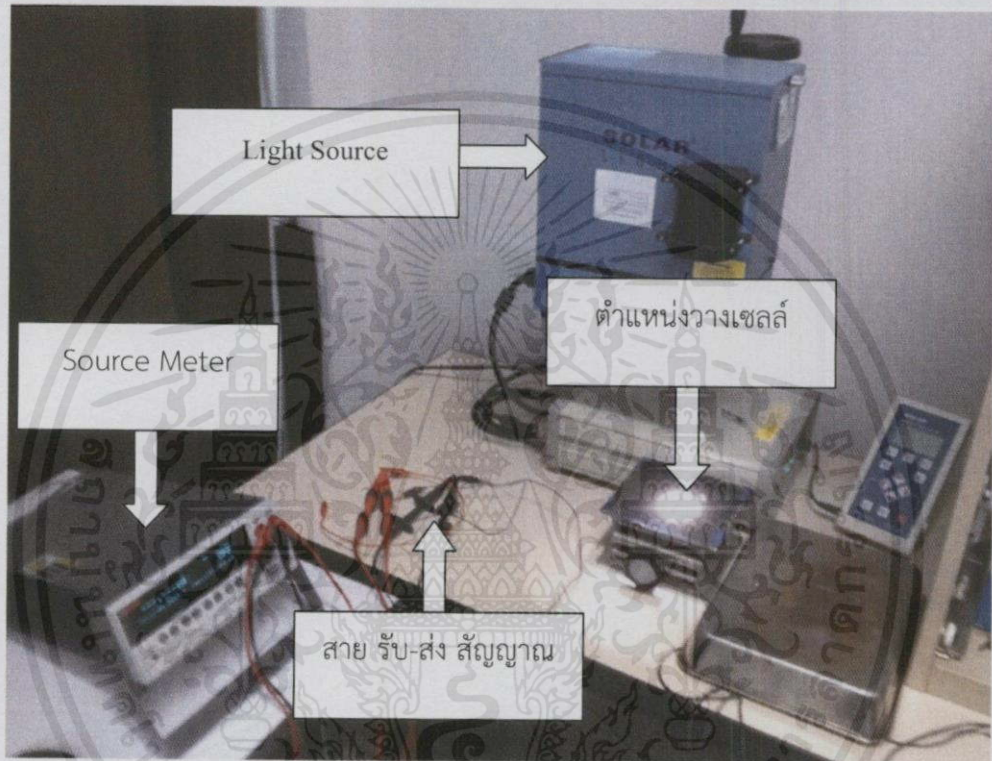
ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงสามารถหาได้จากสมการ 3.3

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSCs อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source)(Xenon lamp Power Supply รุ่น XPS-300)
2. เครื่อง 2400 Broad Purpose Sourcemeter บริษัท KEITHLEY
3. สายรับ-ส่งสัญญาณ
4. Silicon Reference cell (s/n:13696)



รูปที่ 3.8 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSCs

3.2.1.3 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์

1. เปิดแหล่งกำเนิดแสง ตั้งค่า Lamp Output ต่ำสุด ทิ้งไว้ 30 นาที
2. เปิดโปรแกรม Pecell IV Curve Analyzer
3. นำ Silicon Reference cell ทดสอบประสิทธิภาพความเข้มของแสง ให้มีกำลังของแสงอยู่ที่ 100 mW/cm^{-2}
4. นำ DSSCs ที่เตรียมไว้ไปวัดค่าประสิทธิภาพ โดยหนีบสายส่งสัญญาณกับขั้วไฟฟ้าทั้งเอกสารนี้ 2 ของเซลล์ (ขั้วบวกหนีบกับขั้วแคโทด, ขั้วลบหนีบกับขั้วเวิร์คกิ้ง) ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้
5. นำ DSSCs ไปวางตรงกลางของแสงที่ได้ปรับค่าไว้ข้างของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
6. บันทึกผลการวัดค่าประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรม Pecell IV Curve Analyzer

3.2.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง N719 (Dye adsorption)

3.2.2.1 การคำนวณค่า Dye adsorption

ค่า Dye adsorption หาได้จากสมการ 3.4

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3.4)$$

ตามหลักการของ Beer- Lambert Law หรือ Beer's law จะได้สมการ 3.5

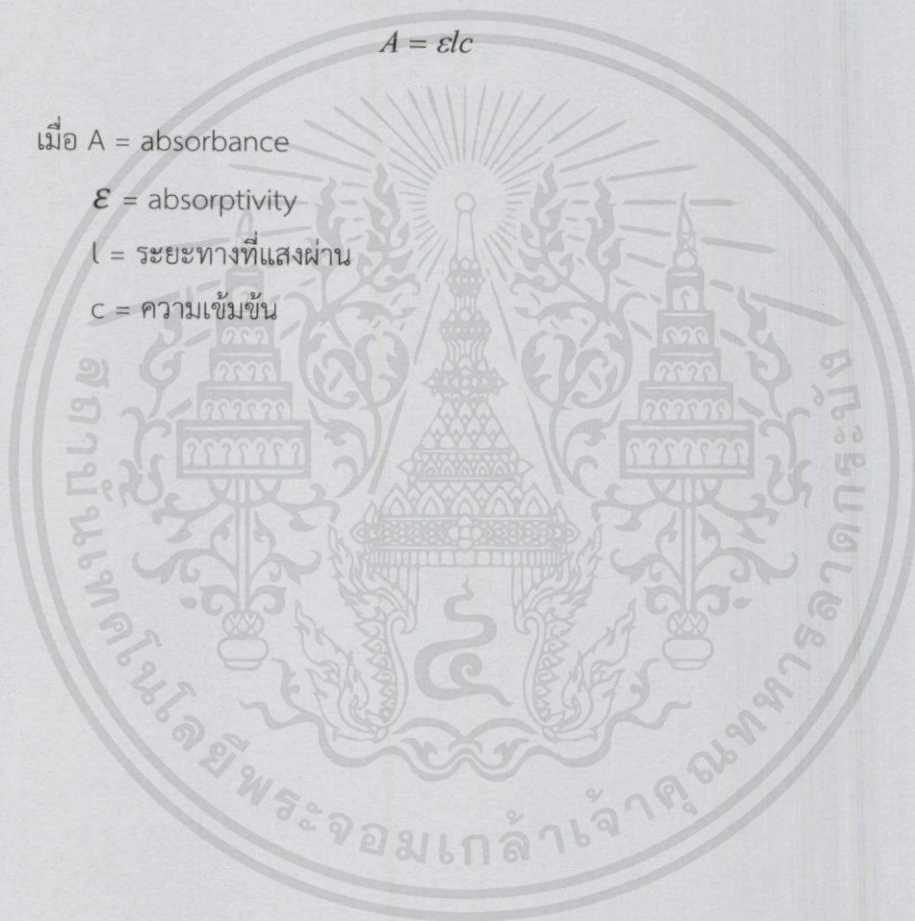
$$A = \epsilon lc \quad (3.5)$$

เมื่อ A = absorbance

ϵ = absorptivity

l = ระยะทางที่แสงผ่าน

c = ความเข้มข้น

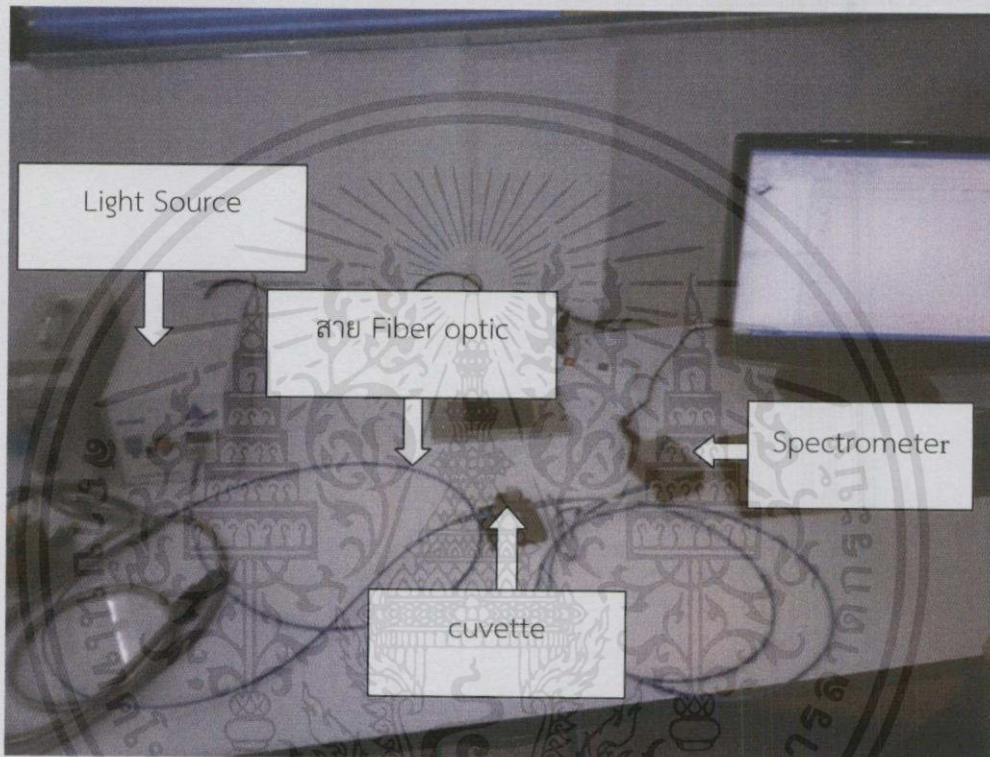


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye adsorption

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า Dye adsorption

1. แหล่งกำเนิดแสง (UV-VIS-NIR LIGHTSOURCE รุ่น DH-2000)
2. สาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร
3. คิวเวทท์
4. Ocean Optics Spectrometer รุ่น USB4H04940



รูปที่ 3.9 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye adsorption

3.2.2.3 ขั้นตอนการวัดค่า Dye adsorption

1. เปิดโปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite
2. นำสารละลาย KOH ปริมาณ 2 ml ใส่คิวเวทท์ (cuvette) ที่วางอยู่บนแท่นจับยึดคิวเวทท์ (cuvette holder)
3. เปิดแหล่งกำเนิดแสง
4. บันทึกค่า absorbance ของสารละลาย KOH โดยใช้โปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite
5. นำสารละลาย KOH ที่มีโมเลกุลของสีย้อมไวแสงผสมอยู่ปริมาณ 2 ml ใส่คิวเวทท์นำไปใช้
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของ N719 โดยใช้โปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite

3.2.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์หาค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.2.3.1 ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของ DSSCs

1.เปิดเครื่อง Electrochemical Impedance Spectroscopy

2.เปิดโปรแกรม NOVA Diagnostics 1.6 พร้อมตั้งค่าเริ่มต้นที่ต้องการดังนี้

-first frequency scan ที่ 1 MHz

-Last frequency scanที่ 0.1 Hz

-Amplitude ที่ 10 mV

- Number scan ที่ 50 points

3.นำปากคีบหนีบขั้วของ DSSCs โดยขั้วบวกต่อกับขั้วเคาน์เตอร์ และขั้วลบต่อกับขั้วเวิร์กกิ้ง

4. วาง DSSCs ตรงกลางแสง (1000 W/m^2)

5. วัดและวิเคราะห์หาค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์ โดยใช้โปรแกรม NOVA Diagnostics 1.8

3.2.3.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน

1.เครื่อง AUTOLABรุ่น M204 ฟังก์ชัน Potentiostat

2.แหล่งกำเนิดแสง(Light source)(Xenon lamp Power Supply รุ่น XPS-300)

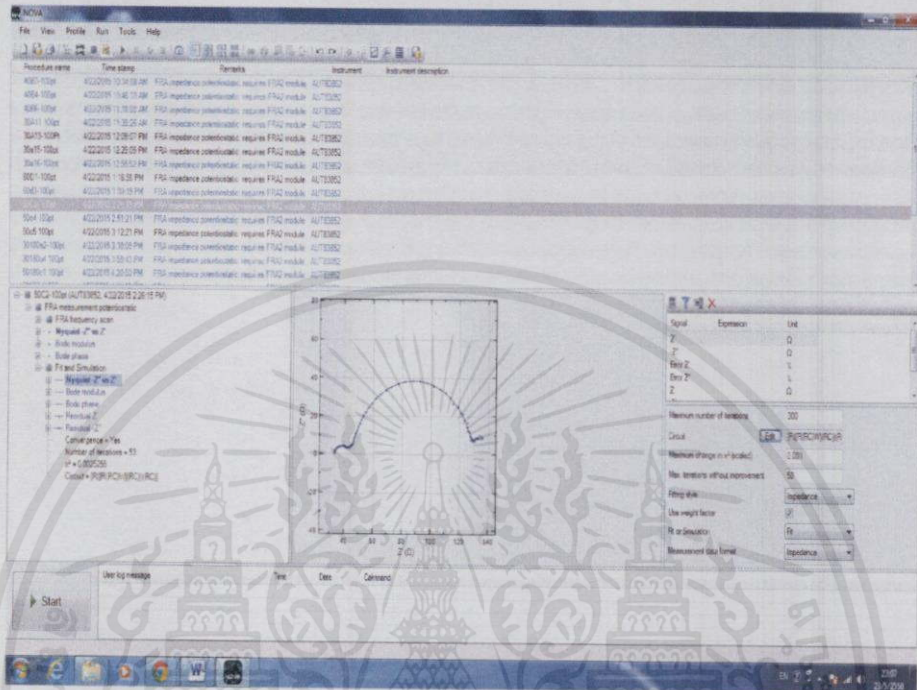


รูปที่ 3.10 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน

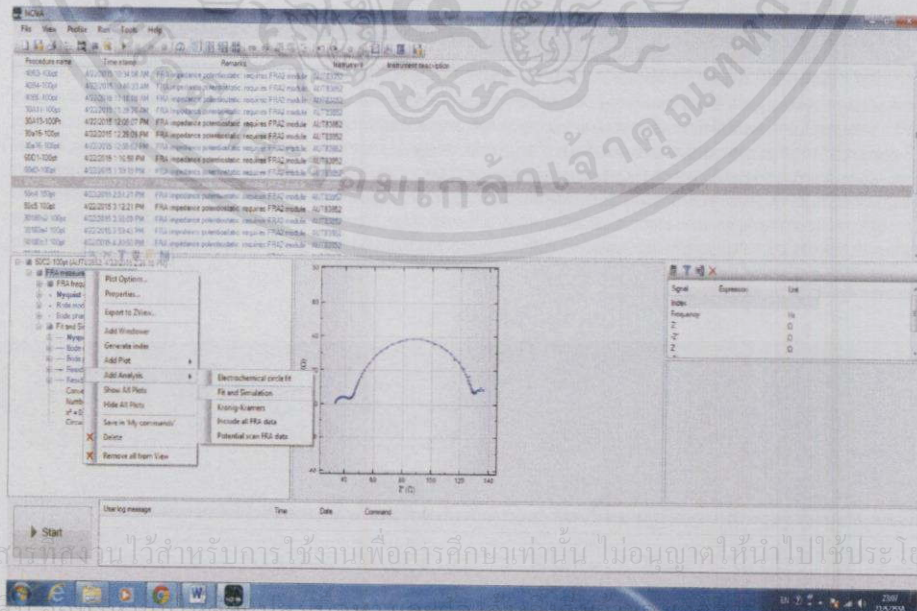
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์ โดยใช้วงจรสมมูลจากโปรแกรม NOVA 1.8

1. เปิดข้อมูลของเซลล์ที่ต้องการจะวิเคราะห์บนโปรแกรม NOVA 1.8

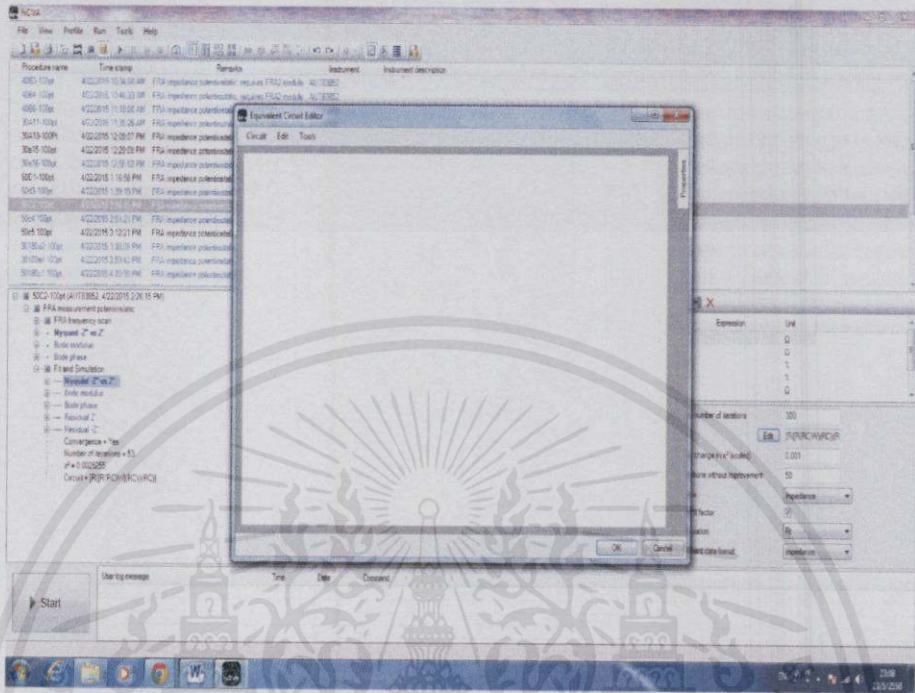


2. คลิกขวาที่ FRA measurement potentiostatic เลือก Add Analysis เลือก Fit and Simulation

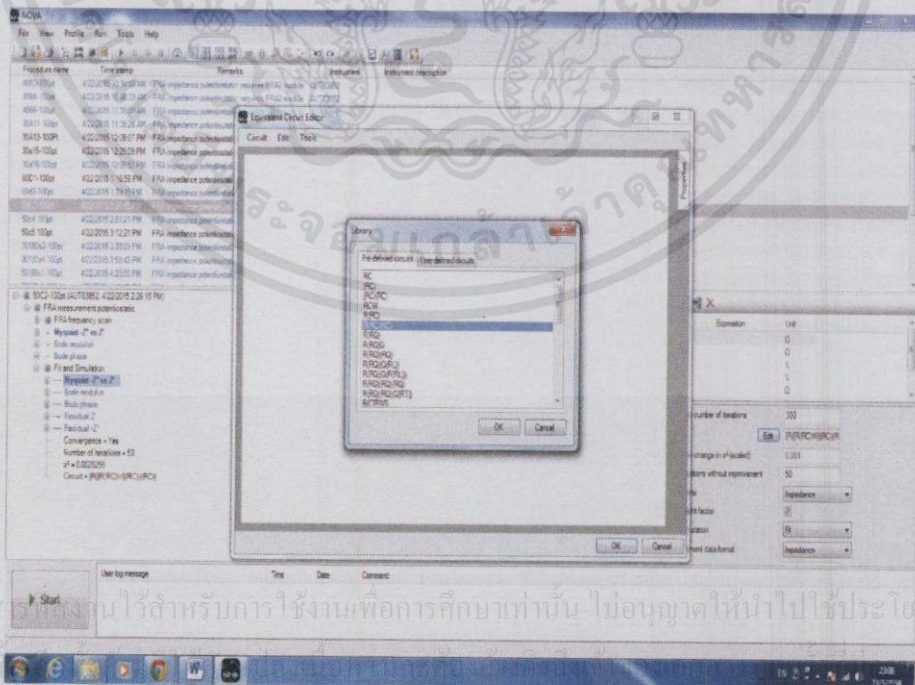


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีเหตุพิเศษเฉพาะที่แจ้งให้ขออนุญาตของงานวิจัยเพื่อให้นำไปใช้นำไปใช้

3.คลิกที่ Nyquist -Z” vs Z’ กดปุ่ม Ctrl ค้างไว้แล้วคลิกที่Nyquist -Z” vs Z’ แล้วเลือก Edit เพื่อสร้างวงจรมุมูล

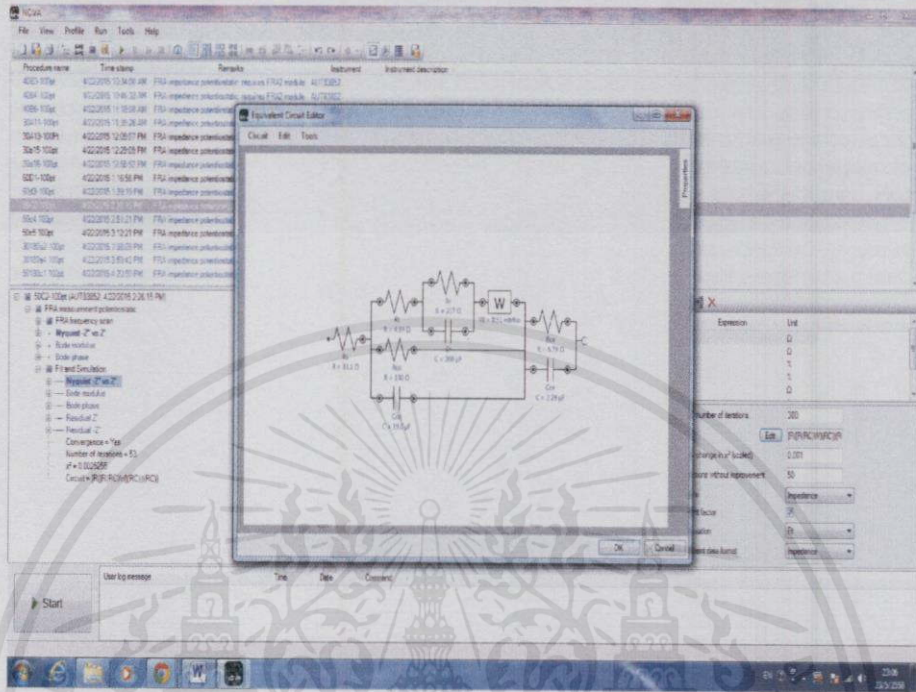


4.สร้างวงจรมุมูลโดยคลิกที่ Circuit เลือก open circuit จากนั้นให้เลือกลักษณะของวงจรมุมูลที่เหมาะสมกับเซลล์ที่ต้องการวิเคราะห์

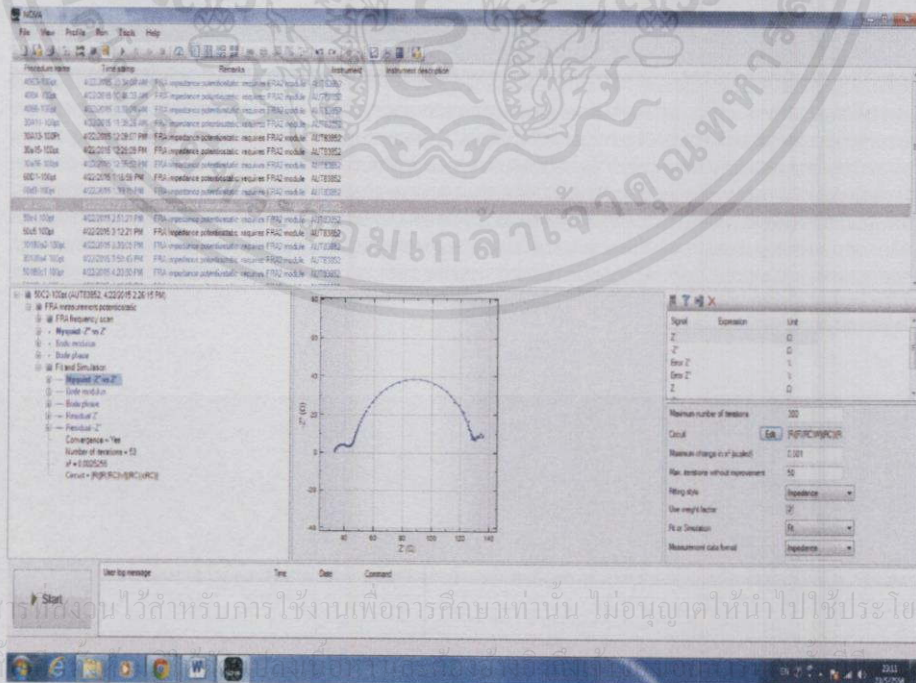


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น" หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

5. กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยคลิกที่ตัวอุปกรณ์เลือก Properties แล้ว กำหนดค่าเริ่มต้น

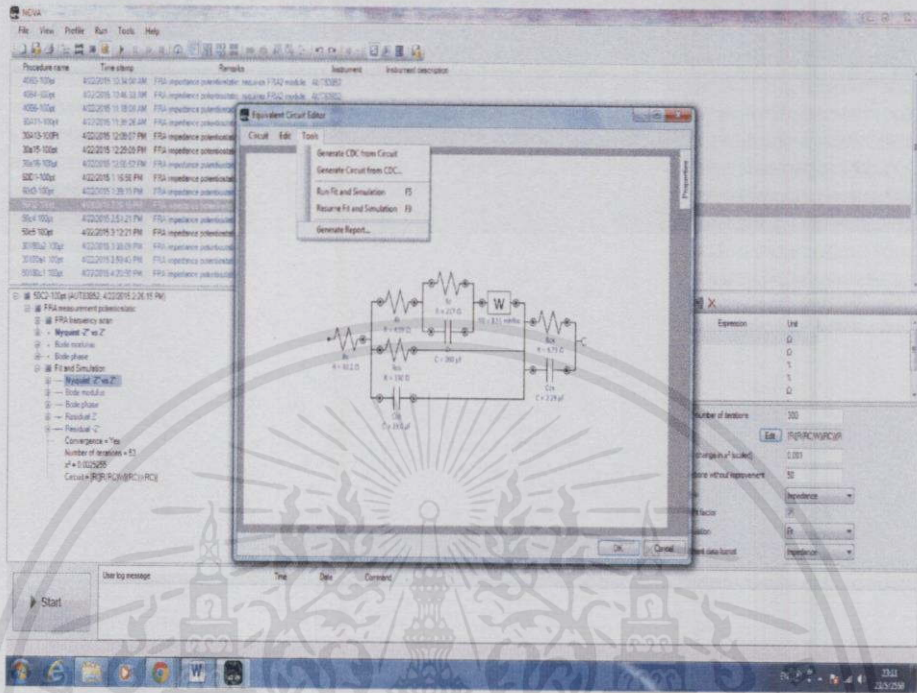


6. กราฟNyquist plot ของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์จะถูกคำนวณผ่านโปรแกรม (Curve fitting) โดยเส้นโค้งที่เกิดจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของวงจรสมมูลข้างต้น

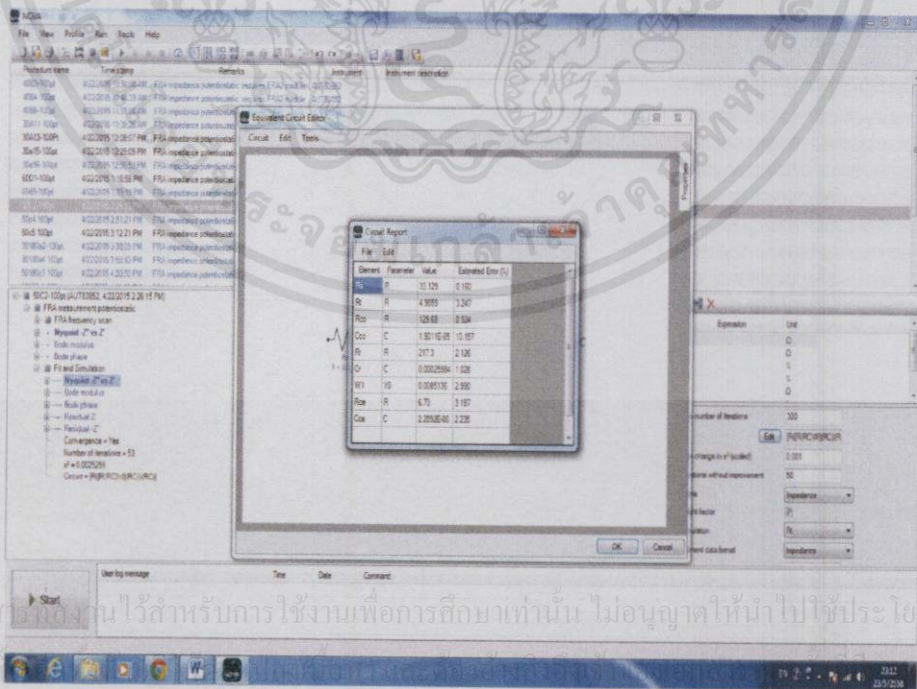


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

7. จากนั้นวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ จากวงจรสมมูลโดยเลือก Edit เลือก Tools และเลือก Generate Report...



8. ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในวงจรสมมูลที่เลือกใช้ก็จะแสดงออกมาพร้อมค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

3.2.4 กระบวนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส(pH) ของสารละลายสียอมไวแสง N719

3.2.4.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส

1. เครื่อง pH / mV / Temp Meter (Model UB-10) ผลิตโดยบริษัท Bangkok Equipment & Chemical
2. เครื่อง Hot Plate & Stirrer) ผลิตโดยบริษัท Bangkok Equipment & Chemical
3. หลอดทดลองและบีกเกอร์



รูปที่ 3.11 แสดงการจัดตำแหน่งในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส

3.2.4.2 ขั้นตอนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

1. การ Standardize (การปรับเทียบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน) เครื่องก่อนใช้งาน
 - 1.1 กดปุ่ม setup เพื่อเลือกชุดบัฟเฟอร์ที่ต้องการใช้งาน (pH4, 7, 10 ตามลำดับ) แล้วกด enter เพื่อยืนยัน
 - 1.2 นำ Electrode จุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ กด Standardize เพื่อ Standardize
 - 1.3 เมื่อ Standardize เรียบร้อยแล้ว หน้าจอจะแสดงค่า % slope
 - 1.4 ล้าง Electrode ด้วยน้ำกลั่น ซับให้แห้งทำการ Standardize ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ค่าตัวถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

2. การวัดค่าความเป็นกรด-เบส

2.1 จุ่ม electrode ลงในสารละลายสีย้อมไวแสง N719 รอจนสัญญาณ S ปรากฏบนหน้าจอแล้วอ่านค่าที่ได้

2.2 ล้าง Electrode ด้วยน้ำกลั่น ล้างให้แห้งแล้วทำการวัดสารละลายสีย้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทที่ 4 นี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง(DSSCs) โดยศึกษาผลการดูดซับของสีย้อมไวแสง N719 บนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม รวมถึงจะศึกษาผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs ด้วยเทคนิค J-V Characterization และศึกษาผลการทดสอบสมบัติภายในของ DSSCs ด้วยเทคนิควิเคราะห์ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) ซึ่งผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์ โดยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่อุณหภูมิการจุ่มต่างๆ เพื่อคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อม N719 ที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์

การคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อม N719 ที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่า Absorbance จาก Beer-Lambert Law ดังสมการที่ 4.1

$$A = \epsilon lc \quad (4.1)$$

โดยค่าความยาวคลื่นที่ 515 นาโนเมตร ค่าโมลาร์แอบซอร์บทิวิตี(Molar absorptivity, ϵ) ของสีย้อม N719 มีค่าเท่ากับ $1.41 \times 10^4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ จึงสามารถนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมได้ และนำค่าความเข้มข้นของสารละลายมาคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อมที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์ที่มีพื้นที่ 0.25 ตารางเซนติเมตร และ 1 ตารางเซนติเมตร ได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$n(0.25\text{cm}^2) = \frac{cv}{1000} \quad (4.2)$$

$$n(1\text{cm}^2) = \left[\frac{n(0.25\text{cm}^2)}{0.25\text{cm}^2} \right] \times 1\text{cm}^2 \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n = จำนวนโมล

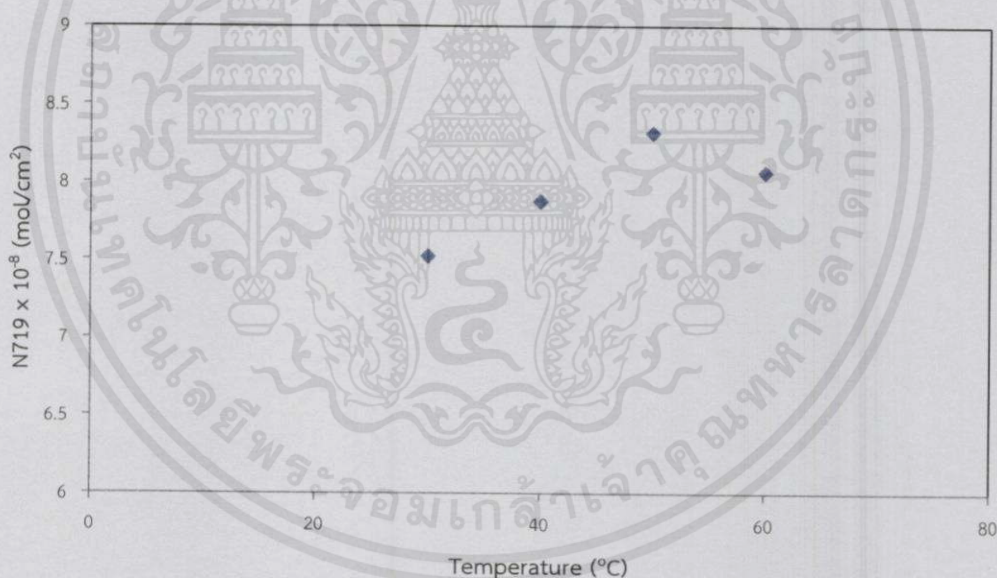
c = ความเข้มข้นของสารละลาย

v = ปริมาตรของสารละลาย

ผลของการคำนวณจำนวนโมลของสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	N719 x 10 ⁸ (mol/cm ²)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	7.523	0.006	0.002
40	7.873	0.003	0.001
50	8.317	0.003	0.001
60	8.063	0.004	0.001



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 กับอุณหภูมิการจุ่มสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719

อุณหภูมิสี ย้อม	ค่า pH			ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาด เคลื่อน
	1	2	3		
30	6.73	6.80	6.87	6.80	0.040
40	6.69	6.69	6.73	6.70	0.013
50	6.62	6.60	6.63	6.61	0.008
60	6.47	6.46	6.47	6.46	0.003

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงเป็นค่าปริมาณของสีย้อม N719 ต่อตารางเซนติเมตร กับอุณหภูมิการจุ่มสีย้อม พบว่า ปริมาณสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 50 °C หลังจากนั้นปริมาณสีย้อมจะมีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งด้วยการกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 °C มีผลต่อปริมาณสีย้อม กล่าวคือที่ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมเท่ากันเซลล์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 30 °C สีย้อมมีปริมาณน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ และการจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C มีปริมาณสีย้อมมากที่สุด ซึ่งเราสามารถอธิบายผลเพิ่มเติมได้จากค่า pH ซึ่งจากตารางที่ 4.2 แสดงค่า pH ของสีย้อม N719 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเป็นกรดจะสูงขึ้น จึงมีผลทำให้อนุภาคของซิงค์ออกไซด์บางส่วนละลายออก ทำให้ขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เล็กลงหรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้โมเลกุลของสีย้อมเกาะกับซิงค์ออกไซด์ได้มากขึ้น ทำให้เมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณสีย้อมก็จะมีมากขึ้นนั่นเองและที่การจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C มีปริมาณสีย้อมมากกว่า 60 °C ทั้งที่ การจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 60 °C มีความเป็นกรดมากกว่านั้น เกิดจากในการจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 60 °C มีการระเหยของสีย้อมเนื่องจากอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดมากขึ้น ทำให้สีย้อมเริ่มเสียดสภาพและเกิดการเกาะกันเองจนตกตะกอน ปริมาณสีย้อมที่อุณหภูมิ 60 °C จึงมีปริมาณน้อยกว่าการจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C นอกจากนี้เมื่ออนุภาคซิงค์ออกไซด์เล็กลงการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคของซิงค์ออกไซด์จะเป็นไปได้ยากขึ้นด้วย

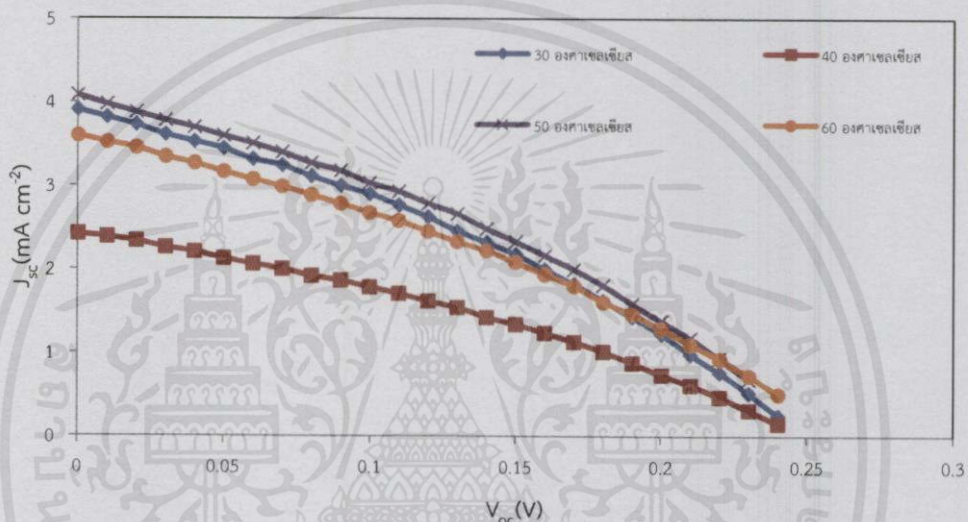
4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการวัดค่าความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์ (J-V Characteristics) เพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงถึงค่าประสิทธิ ภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในพื้นที่ 0.25 cm² ที่ตอบสนอง ต่อแสงที่มีกำลังต่อพื้นที่เท่ากับ 100 mWcm⁻² หรือ 1000 Wm⁻² ผลการทดลอง สมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs นั้น โดยทำการวัดค่า J และ V ของ DSSCs ด้วยเครื่อง solar simulator และค่า J, V, Fill Factor และ Efficiency ที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม Peccell IV Curve Analyzer 2.1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นสีย้อมที่ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C

พารามิเตอร์	อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม (องศาเซลเซียส)			
	30	40	50	60
J_{sc} (mA cm ⁻²)	3.859	3.079	4.080	3.598
V_{oc} (V)	0.354	0.347	0.354	0.361
Fill Factor	0.412	0.399	0.425	0.415
Efficiency (%)	0.561	0.428	0.616	0.541



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ซึ่งกระตุ้นสีย้อม N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C

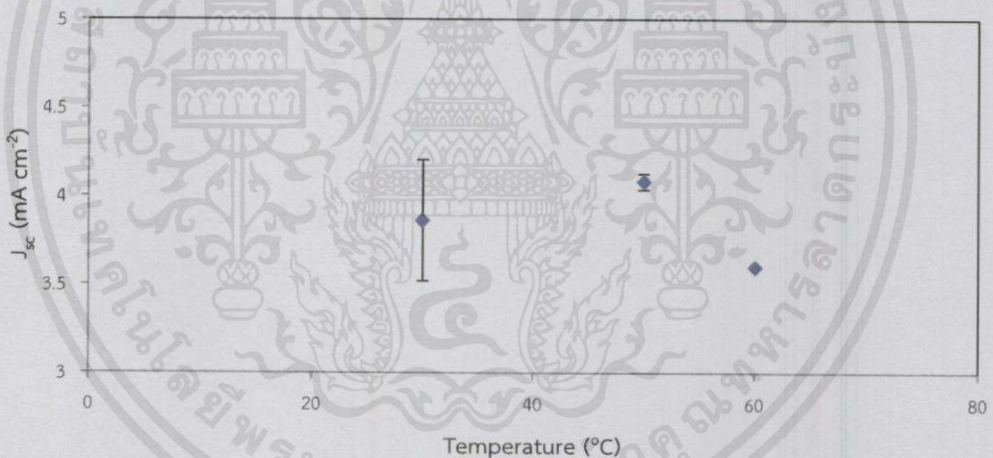
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 40 °C, 50 °C และ 60 °C ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์มี 4 ค่าคือ J_{sc} , V_{oc} , Fill Factor และ Efficiency พบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ในส่วนของอุณหภูมิการจุ่มสีย้อมที่ 40 °C มีค่าต่ำผิดปกติ สืบเนื่องจากกระบวนการสร้างเซลล์มีความผิดพลาดในขั้นตอนการเผากระจกชั้นเวิร์กกิ้ง โดยข้อผิดพลาดดังกล่าวส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 40 °C ต่ำลงเนื่องจากการเผากระจกชั้นเวิร์กกิ้งทำการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C, 50 °C และ 60 °C (วางถาดตัวอย่างชุด 40 °C ซ้อนไว้ด้านบนตัวอย่างชุดอื่นๆ เนื่องจากเนื้อที่วางในเตาเผาไม่พอ) ทำให้การยึดเกาะของซิงค์ออกไซด์กับกระจกและระหว่างอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีคุณภาพต่ำลง ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยากขึ้น

ดังผลที่เห็นได้จากค่า R_f เมื่อวิเคราะห์ด้วย EIS เปรียบเทียบกับข้อมูลชุดอื่นๆดังตารางที่ 4.9 จึงเป็นผลให้เซลล์มีประสิทธิภาพต่ำลงผิดจากกลุ่ม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงไม่นำผลในส่วนของเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 40°C มาพิจารณาพารามิเตอร์อื่นๆในส่วนต่อไป

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์พบว่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าสอดคล้องกับค่าความต้านทานหน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเวิร์กกิ้งที่ได้จากผลการทดสอบสมบัติภายในของเซลล์จากเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผลของค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด จะอธิบายในส่วนต่อไป

ตารางที่ 4.4 แสดงผลเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของอุณหภูมิที่ 30°C , 50°C และ 60°C

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	J_{sc} (mA cm^{-2})	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	3.859	0.343
50	4.080	0.044
60	3.598	0.000



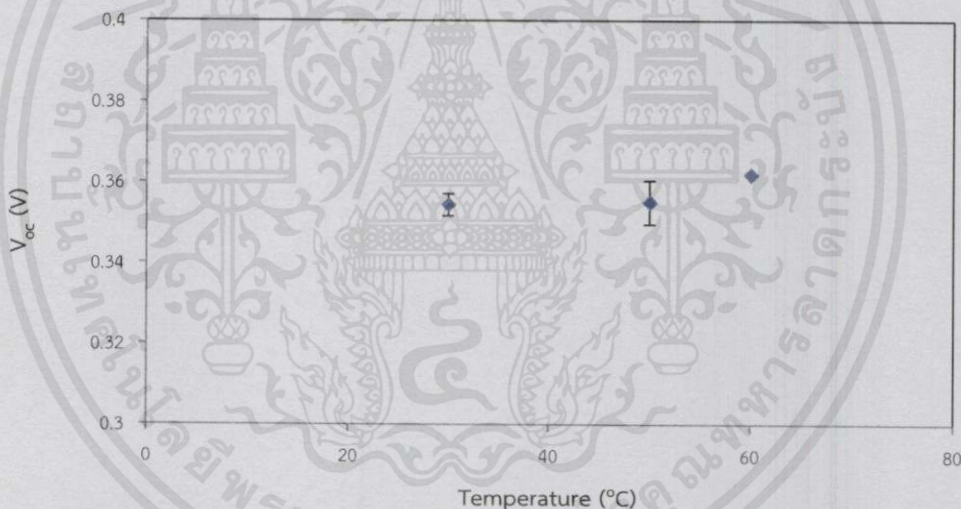
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ 30°C , 50°C และ 60°C

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่การจุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50°C จากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสจะลดลง เนื่องจากความหนาแน่นกระแสสอดคล้องกับอิเล็กทรอนิกส์และจำนวนอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับปริมาณสีย้อม จึงสรุปได้ว่ากราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการจุ่มสีย้อมขึ้น ปริมาณสีย้อมจะมากขึ้น และจะมีปริมาณสีย้อมมากที่สุดที่อุณหภูมิ 50°C จากนั้นปริมาณสีย้อมจะลดลง ส่วนสาเหตุที่เซลล์

ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 30 °C มีความหนาแน่นกระแสมากกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C ทั้งที่มีปริมาณสีย้อมน้อยกว่านั้น เกิดจากเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C สีย้อมเริ่มเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการเกาะกันเองจนตกตะกอน เมื่อหยดอิเล็กโทรไลต์มันจึงไม่สามารถซึมผ่านไปได้เต็มอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่เกาะอยู่กับขั้วออกไซด์ชั้นในได้ และยังเพิ่มโอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่เกาะทับกันมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลให้การการจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ 4.5 แสดงผลเปรียบเทียบความต่างศักย์วงจรเปิดของ ZnO DSSCs เตรียมที่อุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	V_{oc} (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	0.354	0.007
50	0.354	0.005
60	0.361	0.000



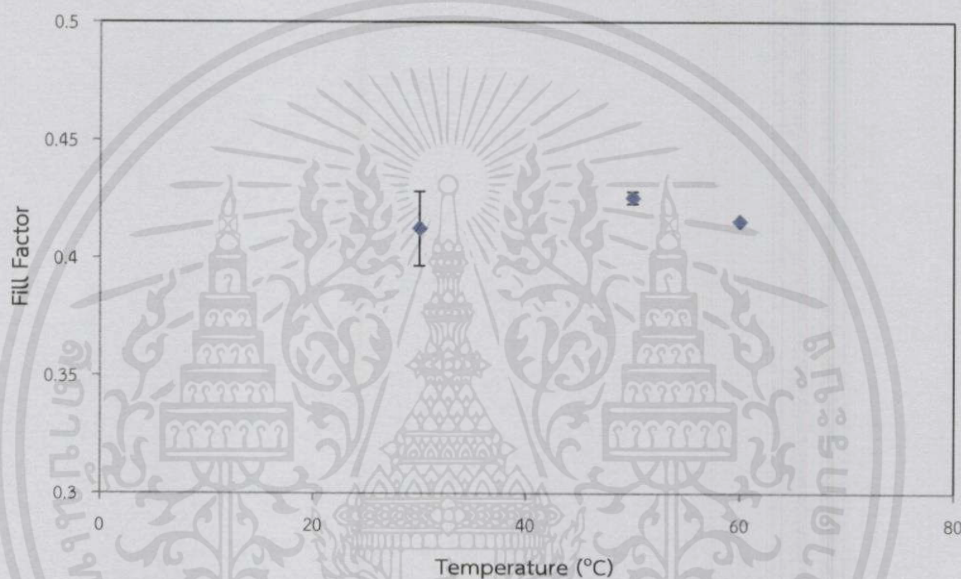
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกิดเนื่องจากเซลล์ที่จุ่มสีย้อม 60 °C สีย้อมเริ่มเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการเกาะกันเองจนตกตะกอน เมื่อหยดอิเล็กโทรไลต์มันจึงไม่สามารถซึมผ่านไปได้เต็มอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่เกาะอยู่กับขั้วออกไซด์ชั้นในได้ ทำให้ที่ระดับพลังงานของอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ความต่างศักย์

ระหว่างระดับพลังของอนุภาคสารกึ่งตัวนำกับระดับพลังงานของอิเล็กโตรไลต์สูงขึ้น เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C จึงมีค่า V_{oc} สูงที่สุด

ตารางที่ 4.6 แสดงผลเปรียบเทียบ Fill Factor ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Fill Factor	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	0.412	0.015
50	0.425	0.002
60	0.415	0.000



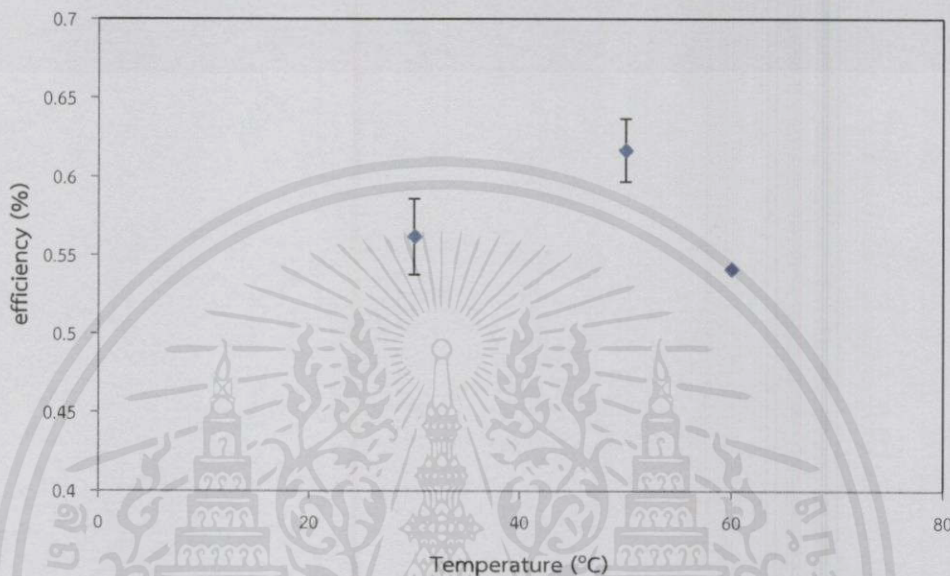
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fill Factor ของ DSSCs กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 พบว่าค่า Fill Factor เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่การจุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C จากนั้นค่า Fill Factor จะลดลง เนื่องจากค่า Fill Factor สามารถอธิบายได้จากโอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมจะสามารถเกาะอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้มากขึ้นและเริ่มเกาะทับกันจนเต็มพื้นที่ เมื่อหยุดสารละลายอิเล็กโตรไลต์เข้าไป โอกาสที่อิเล็กโตรไลต์จะซึมผ่านโมเลกุลสีย้อมไปยังซิงค์ออกไซด์มีน้อยลง โอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับอิเล็กโตรไลต์จึงน้อยลงด้วย ส่วนสาเหตุที่เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C มีค่า Fill Factor มากกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C เกิดจาก เซลล์ที่จุ่มสีย้อม

อุณหภูมิ 60 °C สีย้อมเริ่มเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการเกาะกันเองจนตกตะกอน เมื่อหยุดอิเล็กโตรไลต์ มันจะไม่สามารถซึมผ่านไปเติมอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่เกาะอยู่กับซิงค์ออกไซด์ชั้นในได้ และยังเพิ่มโอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่เกาะทับกันมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.7 แสดงผลเปรียบเทียบ efficiency ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Efficiency (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	0.561	0.024
50	0.616	0.019
60	0.541	0.000

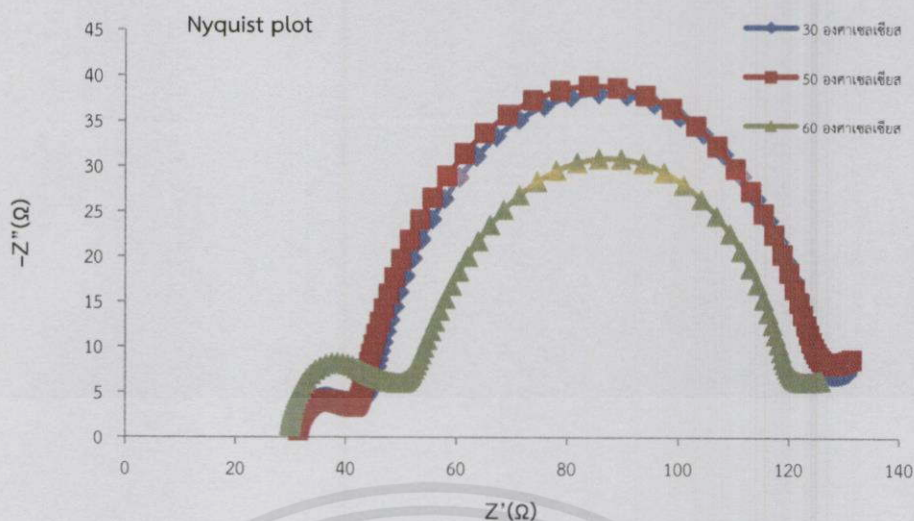


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า efficiency กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม 30 °C, 50 °C และ 60 °C

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 พบว่า เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด 0.609% และ เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 30 °C และ 60 °C มีประสิทธิภาพ 0.571% และ 0.538% ตามลำดับจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 30 °C มีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C ทั้งที่มีปริมาณสีย้อมน้อยกว่า สาเหตุเกิดจาก เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 30 °C มีค่าความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) มากกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 60 °C และยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุ ดังตารางที่ 4.10 ที่จะกล่าวในส่วนต่อไป

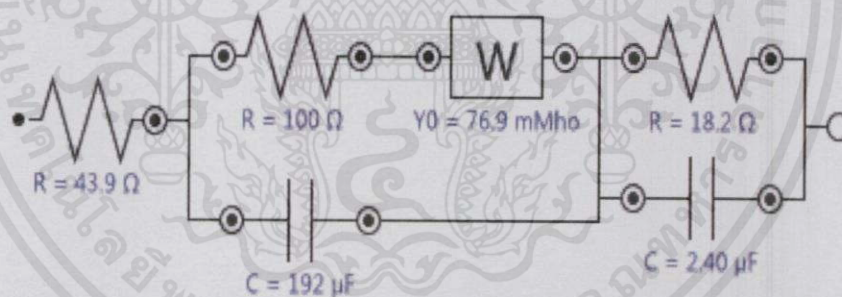
4.3 การศึกษาสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ เพื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเซลล์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z''$ (Ω) กับ Z' (Ω) ของอุณหภูมิสี่ย้อม $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากข้อมูลดังรูปที่ 4.7 สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสต่างๆผ่านวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ย้อมไวแสงดังแสดงในรูปที่ 4.8, 4.9 และได้ผลดังตารางที่ 4.8, 4.9



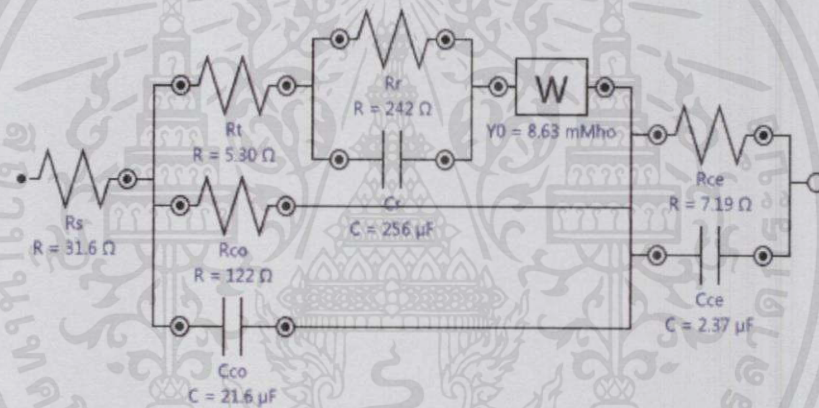
รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ย้อมไวแสง โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

NOVA 1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะริ่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิตั้งที่ 30°C , 50°C และ 60°C โดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย

Element	Parameter	Value		
		30°C	50°C	60°C
R_s	$R(\Omega)$	42.270	31.924	30.492
Estimated Error (%)		0.575	0.646	1.010
R_{ce}	$R(\Omega)$	11.841	10.448	18.074
Estimated Error (%)		2.468	2.574	2.247
R_{pe}	$R(\Omega)$	75.748	78.720	65.005
Estimated Error (%)		0.965	0.998	1.703
χ^2		0.097	0.070	0.160



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลอย่างละเอียดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NOVA 1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C โดยใช้วงจรสมมูลอย่างละเอียด

Element	Parameter	Value		
		30°C	50°C	60°C
R_s	$R(\Omega)$	41.596	31.252	29.746
Estimated Error (%)		0.172	0.172	0.252
R_{ce}	$R(\Omega)$	7.114	5.782	13.973
Estimated Error (%)		6.656	3.143	2.711
R_t	$R(\Omega)$	5.361	5.049	7.900
Estimated Error (%)		7.505	5.524	4.218
R_r	$R(\Omega)$	211.850	206.785	225.130
Estimated Error (%)		2.976	2.309	4.180
R_{co}	$R(\Omega)$	126.425	134.23	100.720
Estimated Error (%)		1.390	1.127	0.924
χ^2		0.003	0.002	0.007

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสทั้ง 3 ค่า คือ ค่าความต้านทานอนุกรมรวม (R_s), ค่าความต้านทานที่ขั้วแคโทด (R_{ce}) และค่าความต้านทานที่ขั้วแอโนด (R_{pe}) พบว่าค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ R_s และ R_{ce} มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับตารางที่ 4.9 และค่า R_{pe} จะสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ 3 ค่าคือค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนผ่านอนุภาคสารกึ่งตัวนำ (R_r), ค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรไลต์กับกระจก (R_{co}) และค่าความต้านทานการสูญเสียประจุ (R_r) ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 นั้นไม่สามารถหาเหตุผลได้ว่าที่ค่าความต้านทานที่ขั้วแอโนดนั้นมากน้อย มีผลมาจากสาเหตุใด จึงต้องทำการวิเคราะห์ที่วงจรสมมูลอย่างละเอียด (รูปที่ 4.9)

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่า R_{co} มีค่ามากที่สุดที่เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C กล่าวคือเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C มีโอกาสที่อิเล็กโทรไลต์จะซึมเข้ามาถึงกระจกน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่น ซึ่งเป็นผลทำให้ลดการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างกระจกกับอิเล็กโทรไลต์ด้วย และจากตารางที่ 4.9 สามารถหาค่า R_s และ R_r เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุดังตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิจุ่มสีย้อมที่ 30 °C, 50 °C และ 60 °C

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุ (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	97.469	0.396
50	97.558	0.155
60	96.490	0.000

ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุหาได้จากสมการที่ 4.4

$$\eta = \left(1 - \frac{R_r}{R_p}\right) \times 100 \quad (4.4)$$

เมื่อนำค่าความต้านทานที่ได้จากตารางที่ 4.9 มาคำนวณประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุ (ตารางที่ 4.10) พบว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50 °C มีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุมากที่สุด (97.558%) เมื่อเทียบกับเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C (97.469) และ 60 °C (96.490%) ตามลำดับ กล่าวคือเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่ 50 °C จะมีอิเล็กตรอนที่สูญเสียไประหว่างทางน้อยกว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิอื่นๆ ส่งผลให้เซลล์มีความหนาแน่นกระแสและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ทั้งนี้ปัจจัยหลักเกิดจากการมีค่าความต้านทานการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ (R_r) น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยเรื่องการศึกษาการตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบซิงค์ออกไซด์ได้เตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยจุ่มสีย้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 50°C และ 60°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์ด้วยเทคนิค I-V characterization และปริมาณสีย้อมที่เกาะอยู่บนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectrometer และวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy พบว่า เซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50°C มีประสิทธิภาพสูงสุด(0.616%)และเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 30°C (0.561%)และ 60°C (0.541%)ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์ยืนยันว่าเซลล์ที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 50°C มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวประจุมากที่สุด(97.558%) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวประจุส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ในการเตรียมขั้วเวิร์กกิ้ง การผสม ZnOควรใส่ส่วนผสมอย่างระมัดระวัง มิเช่นนั้นจะทำให้การปั่นสารเป็นไปอย่างยากลำบาก และอาจทำให้ครีมZnOเสียได้
2. ในการปาดเคลือบ ZnOบนกระจกต้องปาดให้เรียบและสม่ำเสมอ ความปาดด้วยความรวดเร็ว เพราะครีม ZnO ค่อนข้างแห้งไวเพราะใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย
- 3.การเผาขั้วไฟฟ้า ควรจัดเซลล์ให้อยู่ในระดับเดียวกันเพื่อให้มีอุณหภูมิเท่ากัน มิเช่นนั้นอาจทำให้เซลล์ประสิทธิภาพลดลงได้ เหมือนกับเซลล์ชุดที่จุ่มสีย้อมอุณหภูมิ 40°C
- 4.การหยดอิเล็กโทรไลต์ ต้องหยดให้เต็มบล็อคเพื่อทำให้การวัดประสิทธิภาพมีความถูกต้องมากที่สุด
- 5.ในการวิเคราะห์ความต้านทานภายใน ควรวิเคราะห์กับวงจรที่เหมาะสมกับข้อมูล มิเช่นนั้นอาจทำให้ได้ผลผิดพลาดได้

5.3 สิ่งที่ได้เรียนรู้จากการทำโครงการพิเศษ

- 1.ความรับผิดชอบต่อนหน้าที่ตัวเอง ซึ่งในการทำงานให้สำเร็จนั้น ต้องมีความรับผิดชอบสูง
- 2.การเรียนรู้เพิ่มเติม สิ่งที่เราเรียนจากห้องเรียนนั้นบางที่อาจไม่เพียงพอ เราจึงต้องหาความรู้มาเพิ่มเติมอยู่เรื่อยๆ
- 3.ความอดทน ความอดทนอดกลั้นต่องานที่ทำนั้น เป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลกับตัวงาน ถ้าเราใจร้อน หรือ เร่งรีบเกินไป จะทำให้งานที่ทำการออกมานั้นมีคุณภาพต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2329-1000 หรือ 0-2329-1001

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nozawa, T. 2013. EPFL Develops dye-sensitized solar cell with 15% conversion efficiency. [Online]. Available : http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20130716/292380.
- [2] สุรวุฒิ ช่วงโชติ. 2013. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.kmutt.ac.th/hynae/สีย้อมไวแสง>.
- [3] วินิช พรหมอารักษ์ และคณะ. 2550. “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.” *วารสารวิชาการ ม.อบ.9(2)* : 14-31.
- [4] กสิณ ประกอบไวยกิจ. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.ee.eng.cmu.ac.th/~kasin/Courses/252282/Lesson7.pdf>.
- [5] Beasley, C. 2015. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. [Online]. Available : <http://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy>.
- [6] ณัฐพงษ์ พงษ์ดนตรี และ วิรุฬห์ รุ่งเรือง. 2556. “การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งค้ ออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์.” *ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

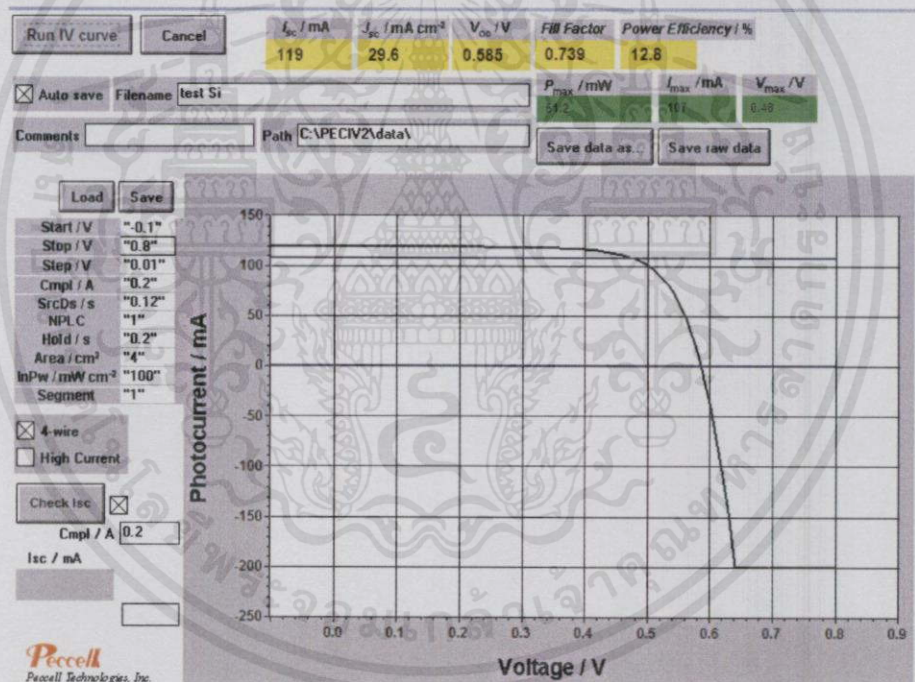


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนและวิธีการใช้โปรแกรม Pecell IV Curve Analysis 2.1 ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

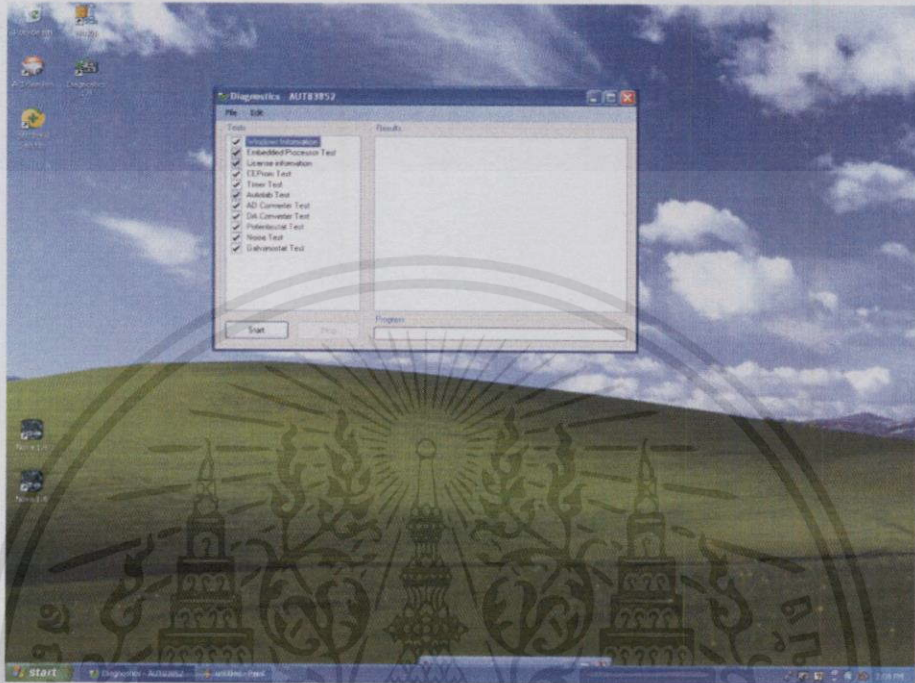
1. เปิดโปรแกรม Pecell IV Curve Analysis 2.1
2. ตั้งค่าเริ่มต้นก่อนทดสอบ IV Curve (กด Save) พร้อมเลือกไฟล์ที่ต้องการจัดเก็บข้อมูลตรงช่อง Path
3. ทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (กด Run IV curve)
4. ทดสอบประสิทธิภาพทางแสง บันทึกค่า Active Area แล้วกด Run IV curve ข้อมูลที่วัดได้จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ที่เลือกไว้โดยอัตโนมัติ



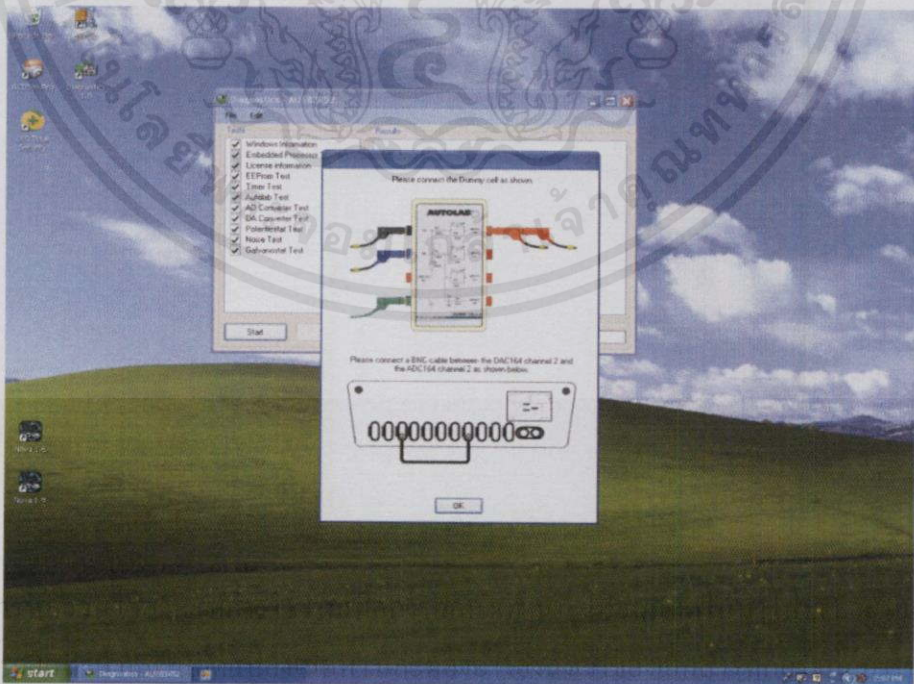
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้เครื่อง AUTOLAB ฟังก์ชัน Potentiostat ร่วมกับโปรแกรม NOVA 1.8

1.เปิดโปรแกรม Diagnostics 1.8



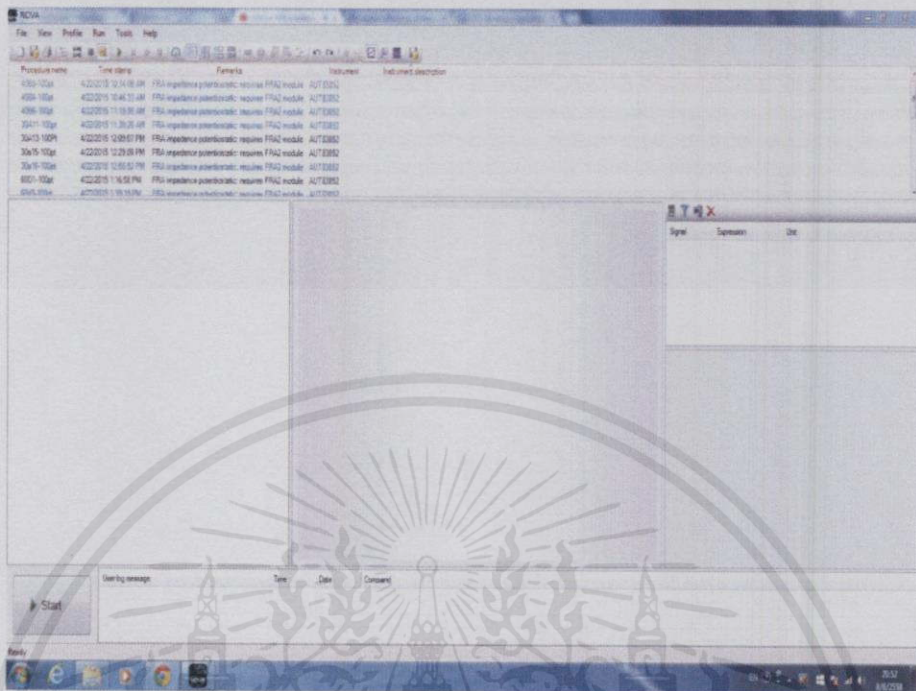
2.กด start เช็คว่าตำแหน่งการเชื่อมต่อของเครื่อง AUTOLAB (กด OK)



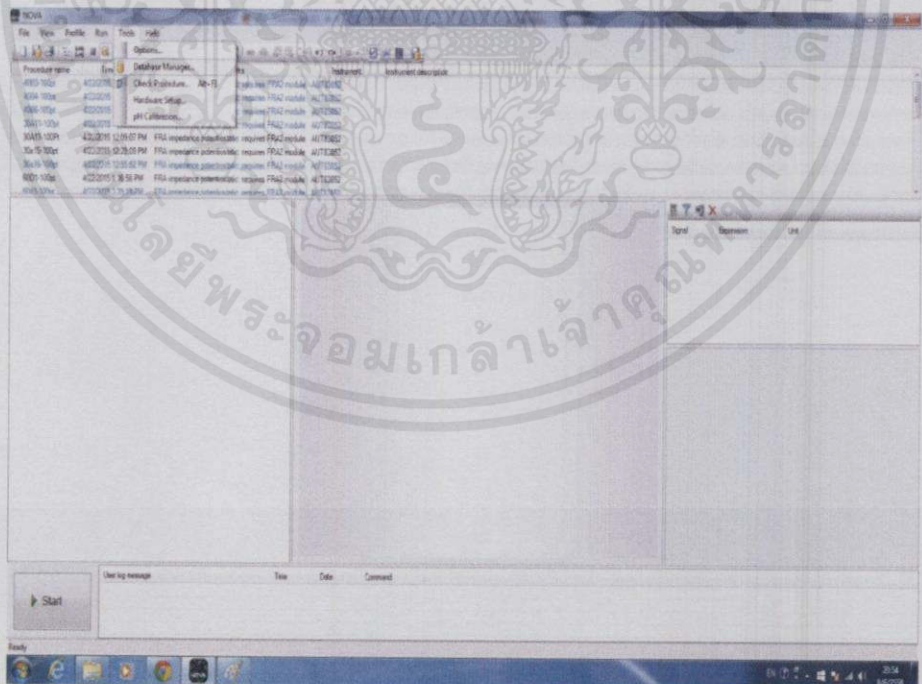
เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ขั้นตอนการคำ
กาไปใช้

3.เปิดโปรแกรม NOVA 1.8

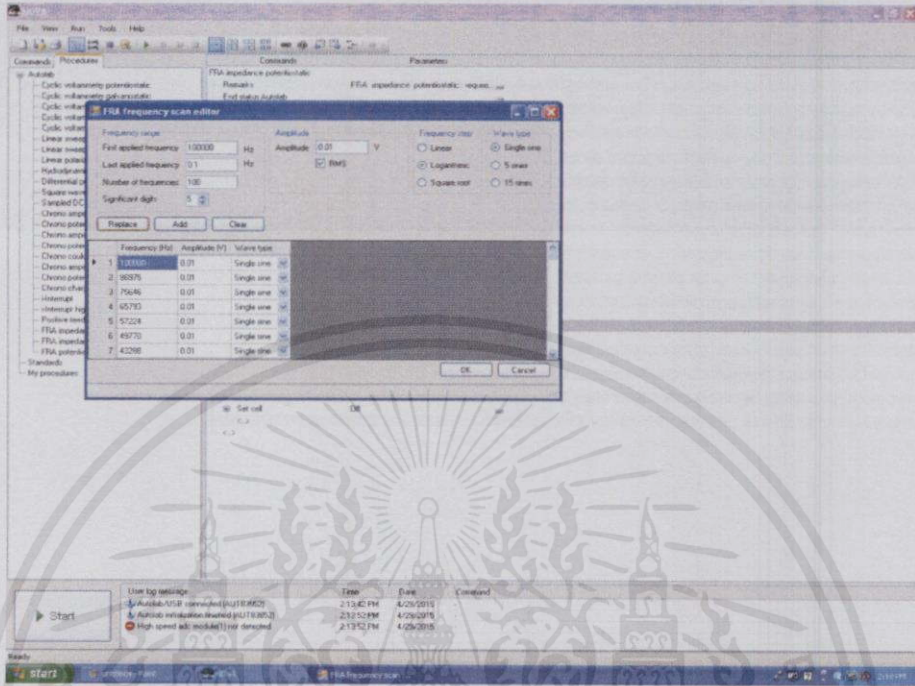


4.คลิกที่ Tool เลือก Database management

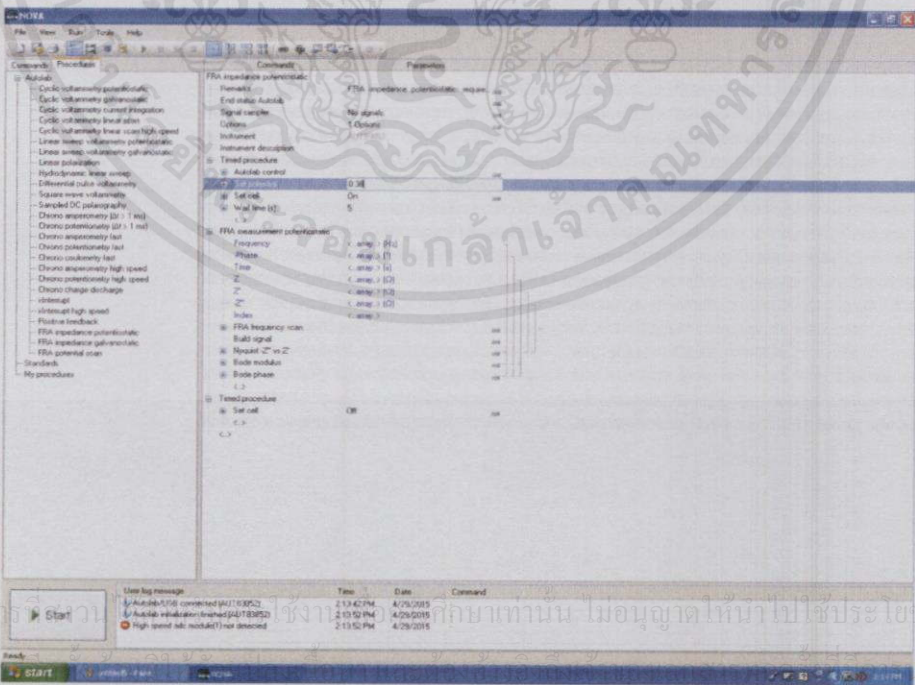


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เลือก FRA frequency scan ตั้งค่าความถี่และค่าพารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กด Replace และกด OK)

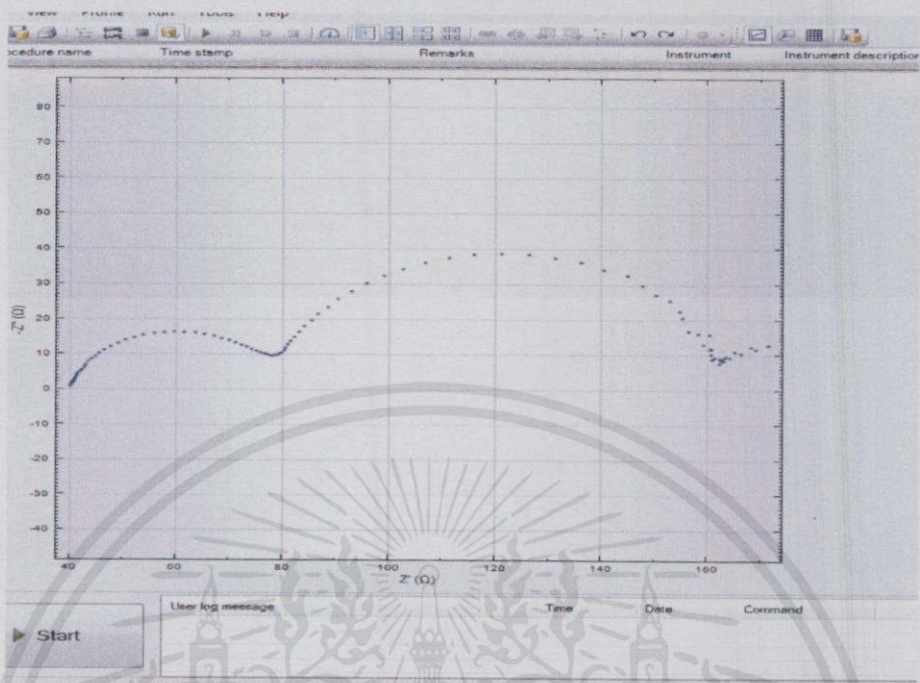


8. ป้อนค่าความต่างศักย์ที่แสดงบนจอแสดงผลของเครื่อง AUTOLAB ลงตรงช่อง Set potential (กด Start)

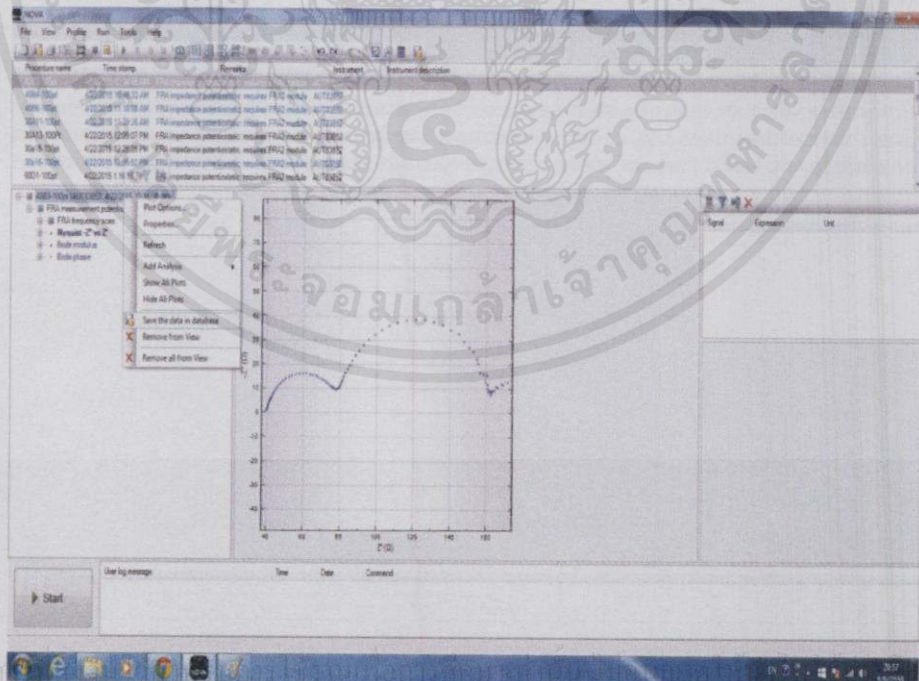


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยอัตโนมัติของระบบอัตโนมัติของห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

9. แสดงผลการทดสอบ



10. คลิก Analysis View ดับเบิลคลิกที่ชุดข้อมูลที่ผ่านการทดสอบ คลิกขวาที่ข้อมูลที่แสดงด้านล่าง เลือก Save the data in database ตั้งชื่อชุดข้อมูลใหม่ (กด OK)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสียอม (สียอมไวแสง N719 ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 515 nm.)

อุณหภูมิ (°C)	Absorbance	ค่าความคลาดเคลื่อน
30	0.052	0.002
40	0.058	0.001
50	0.056	0.001

2. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง

Parameter	30 °C		50 °C		60 °C
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	
$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	4.202456	3.516378	4.036096	4.125666	3.598495
V_{oc} / V	0.351578	0.357111	0.349557	0.360403	0.36193
Fill Factor	0.396635	0.428227	0.423068	0.428261	0.415581
Efficiency / %	0.586025	0.53774	0.596884	0.636782	0.541254

3. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง

Element	Parameter	30 °C		50 °C		60 °C
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	
R_s	R	31.604	51.589	33.129	29.375	29.746
R_t	R	5.2987	5.4235	4.9859	5.1125	7.9009
R_{co}	R	121.62	131.23	129.68	138.78	100.72
C_{co}	C	2.16E-05	1.23E-05	1.90E-05	1.11E-05	1.76E-05
R_r	R	241.93	181.77	217.3	196.27	225.13
C_r	C	0.000256	0.000248	0.00026	0.000266	0.000247
W	Y	0.008634	0.011491	0.008514	0.012084	0.005641
R_{ce}	R	7.1927	7.0367	6.73	4.8352	13.973
C_{ce}	C	2.37E-06	2.45E-06	2.29E-06	3.01E-06	1.51E-06
X^2		0.003639	0.003716	0.002526	0.003112	0.007934

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้