

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์ด้วย
เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS ANALYSIS USING
ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY

นายณัฐพงษ์ พงษ์คนตรี
นายวีรุทธิ์ รุ่งเรือง

โครงการพิเศษเป็นหน่วยหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งค่ออกไซด์ด้วย
เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS ANALYSIS USING
ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY



นายณัฐพงษ์ พงษ์ดนตรี
นายวิรุพห์ รุ่งเรือง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

**ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS ANALYSIS USING
ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY**



Mr.NUTTAPONG PONGDONTREE

Mr.WIRUN RUNGRUENG

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

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคอกซ์ไซด์ด้วยเทคนิค
วิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์
ZnO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS ANALYSIS USING
ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY

ชื่อนักศึกษา นายณัฐพงษ์ พงษ์คนตรี
นายวิรุพห์ รุ่งเรือง

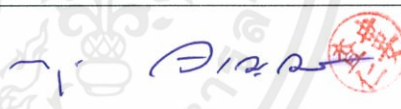
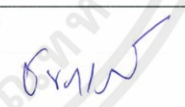

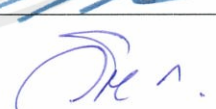
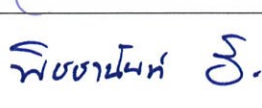
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์	
อ.ชนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
รศ.วิชิต ศิริโชติ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงซึ่งค้อออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐพงษ์ พงษ์คนตรี นายวิรุพห์ รุ่งเรือง
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมและศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย้อมสียอมไวแสงต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงระบบซึ่งค้อออกไซด์ N719 (ZnO-N719 DSSCs) ด้วยเทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) โดยการกระตุ้นสียอมไวแสง N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30°C และ 50°C และย้อมสีที่ระยะเวลาต่างๆ จากการทดสอบปริมาณการดูดซับของสียอมบนอนุภาคซึ่งค้อออกไซด์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy พบว่าปริมาณสียอมไวแสงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอุณหภูมิการจุ่มสียอม แต่จากผลการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์ พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย้อมสีจนถึงค่าหนึ่งหลังจากนั้นประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์จากการเตรียมที่อุณหภูมิ 30°C คือ 0.918 % เมื่อย้อมสีเป็นเวลา 180 นาที และประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์จากการเตรียมที่อุณหภูมิ 50°C คือ 0.922 % เมื่อย้อมสีเป็นเวลา 30 นาที สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค EIS ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์ที่ดีขึ้นและการลดลงของระยะเวลาการย้อมสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสียอมจึงเกิดจากการลดลงของการ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ **คำสำคัญ :** เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง, ซึ่งค้อออกไซด์, N719, การจุ่มสียอม, เทคนิควิเคราะห์ค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

Title	ZnO Dye-Sensitized Solar Cells Analysis Using Electrochemical Impedance Spectroscopy
Students	Mr.Nuttapong Pongdontree Mr.Wirun Rungrueng
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr.Pichanan Teesetsopon
Co-Advisor	Assoc. Prof. Wicharn Techitdheera

ABSTRACT

This special project studied ZnO dye-sensitized solar cells (ZnO-DSSCs) preparation as well as the effect of temperature and time on the cells performance by investigating internal interface resistances through electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technique. Various dye dipping times were used for solar cells fabrication under two different dye solution temperatures, 30°C and 50 °C. The results showed that dye adsorption amount increased with dye dipping time and temperature as examined by UV-Vis spectroscopy. However, the cells efficiency increased with dipping time up to an optimum point then decreased for both temperatures. The optimum dipping time was 180 minutes for 30 °C dye solution with 0.918% efficiency while that of 50 °C was 30 minutes with 0.922% efficiency. The internal interface resistances investigation indicated that the higher efficiency and shorter dipping time for 50 °C dye solution could be due to charge recombination reduction at the working electrode.

Keywords: Dye-sensitized solar cell, ZnO, N719, Dye dipping, Electrochemical impedance spectroscopy

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ได้รับคำแนะนำและการชี้แนะต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยความกรุณาจาก ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น รวมไปถึงขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วราวุฒิ เกตุคัตตา ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ ดร.กฤษกร โฉมเจริญรัตน์ และดร.ภัทริยา กิตติเดชาชาญ ที่ช่วยอนุเคราะห์อุปกรณ์และสารเคมีในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่ทำการวิจัยและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการในการทำงานวิจัยที่ติดขัดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

ด้วยความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นายณัฐพงษ์ พงษ์คนตรี

นายวิรุพห์ รุ่งเรือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	4
2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	4
2.1.1.1 สีย้อมไวแสง	4
2.1.1.2 สารอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก	5
2.1.1.3 ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์	5
2.1.1.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง	5
2.1.2 หลักการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	6
2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	7
2.1.4 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษตามกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อสิ่งใดก็ตามที่นำออกไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.4.1 พัฒนาโมเลกุลสีย้อมไวแสง(Dye)	8
2.1.4.2 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์	9
2.1.4.3 การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	9
2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและการแสดงค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	10
2.2.1 อุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า	14
2.2.2 การต่ออุปกรณ์เป็นวงจรอนุกรมและวงจรขนาน	15
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	17
2.3.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	17
2.3.1.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	17
2.3.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	17
2.3.1.3 กราฟของ โบดี(Bode plot)และ กราฟของไนควิสต์(Nyquist)	21
2.3.2 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 กระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)	26
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้าและวิธีทำความสะอาดพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้า	26
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)	27
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode)	29
3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์	32
3.1.5 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)	33
3.1.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	35
3.2 กระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้า (Solar Simulator) ของ DSSCs	36
3.2.1.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของ DSSCs	36
3.2.1.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSCs	37
3.2.1.3 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์	37
3.2.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีข้อมไวแสง N719	38
3.2.2.1 การคำนวณค่าDye adsorption	38
3.2.2.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าDye de-adsorption	39
3.2.2.3 ขั้นตอนการวัดค่าDye adsorption	40
3.2.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายใน ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง	40
3.2.3.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน ภายในเซลล์	40
3.2.3.2 ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของDSSCs	41
3.2.3.3 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายใน	42
3.2.4 กระบวนการวัดค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายสีข้อมไวแสง N719	46
3.2.4.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส	46
3.2.4.2 ขั้นตอนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส	47

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 48

4.1 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของสีข้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส	48
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ 71

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน	3
2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	8
2.2 Common Electrical Element	14
4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30°C	49
4.2 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 50°C	49
4.3 แสดงผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719	50
4.4 แสดงผลค่าความหนืดของเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	50
4.5 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	52
4.6 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	53
4.7 แสดงผลเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของ DSSCs สำหรับอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 และ 50°C	54
4.8 แสดงผลเปรียบเทียบความต่างศักย์ของ DSSCs เมื่อกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 กับ 50°C	56
4.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Fill Factor ของกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 กับ 50°C	57
4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Efficiency ของ DSSCs เมื่อกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 กับ 50°C	59
4.11 แสดงผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30°C	61
4.12 แสดงผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 50°C	62

เอกสารนี้เป็นฉบับร่างที่นำเสนอเพื่อขอความเห็นชอบจากคณะกรรมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30°C กับ 50°C เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	4
2.2 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.3 แสดงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	6
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์กระทบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับ ค่ามวลอากาศ	7
2.5 Sinusoidal Current Response in a Linear System	11
2.6 Origin of Lissajous Figure	12
2.7 Nyquist Plot with Impedance Vector	13
2.8 Simple Equivalent Circuit with One Time Constant	13
2.9 Bode Plot with One Time Constant	14
2.10 Impedances in Series	15
2.11 Impedances in Parallel	15
2.12 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	17
2.13 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	18
2.14 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของ รูปครึ่งวงกลม	19
2.15 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	20
2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนต เชิงขั้วมุมเฟส	22
2.17 แสดงกราฟแบบ Nyquist plotแบบ Bode phase plotและแบบBode plot	23
2.18 แสดงการเคลื่อนที่ของแต่ละหน้าสัมผัส	24
2.19 วงจรสมมูล	24
3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	25
3.2 (a) มีดกรีดกระจก ,(b) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม.	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 (a) เครื่องอัลตราโซนิก(Ultrasonic Cleaner) , (b) ภาชนะสำหรับเก็บ กระจกนำไฟฟ้า	27
3.4 (a) เตาเผา ,(b) ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์(Counter electrode)	28
3.5 (a) HOT PLATE , (b) สีย้อมไวแสง N719	30
3.6 (a) การย้อมสีย้อมไวแสง N719 , (b) ขั้วไฟฟ้าเวิร์กคิงที่สภาวะต่างๆ	32
3.7 สารละลายอิเล็กโทรไลต์	33
3.8 (a) ตำแหน่งการวางบล็อกพาราฟิล์ม ,(b) การประกบเซลล์ DSSCs	34
3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง	34
3.10 (a) การฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ,(b) ปิดรูด้วยสก็อตเทป	34
3.11 (a) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) , (b) สารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 mM	35
3.12 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSCs	37
3.13 (a)การวัดการดูดกลืนของสารละลาย KOH ,(b) การวัดค่า (Dye adsorption)	38
3.14 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่า Dye adsorption	39
3.15 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดความต้านทานเชิงซ้อน	41
3.16 แสดงการจัดตำแหน่งในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส	46
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน โมลของสีย้อมN719กับเวลาการจุ่มสีย้อม	50
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส(J)กับความต่างศักย์ (V) ซึ่งกระตุ้นสีย้อม N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30°C	52
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส(J)กับความต่างศักย์ (V) ซึ่งกระตุ้นสีย้อม N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C	53
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส(J)กับความต่างศักย์(V) ของDSSCsที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม30°Cกับ50°C	55
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (J)กับเวลาการย้อมสี	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
DSSCsเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสีย้อม30°Cกับ50°Cที่ระยะเวลาต่างๆ 55
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V)กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719ที่อุณหภูมิ 30°C และ อุณหภูมิ 50°C	57
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fill Factor ของ DSSCs กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม ของอุณหภูมิสีย้อม 30 และ 50°C	58
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าEfficiencyกับเวลาที่ทำการย้อมสี N719 ที่อุณหภูมิ 30°C และ อุณหภูมิ 50°C	60
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z''$ (Ω) กับ Z' (Ω) ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 30°C	64
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z''$ (Ω) กับ Z' (Ω) ของอุณหภูมิสีย้อมที่ 50°C	64
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $ Z $ (Ω) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิสีย้อม 30°C	65
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $ Z $ (Ω) กับ Frequency (Hz)ของอุณหภูมิสีย้อม 50°C	66
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างPhase($^{\circ}$) กับFrequency(Hz) ของอุณหภูมิ 30°C	67
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างPhase($^{\circ}$) กับFrequency(Hz) ของอุณหภูมิ 50°C	67
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 30°C	68
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 30°C เทียบกับ 50 °C	69
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 50°C	69
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่หน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งกับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 30°Cเทียบกับ 50°C	70

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
DSSCs	Dye -Sensitized solar cells
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
TiO ₂	Titanium Dioxide
FTO	Fluoride Doped Tin Dioxide
cm.	Centimeter
I ₃ ⁻	Tri-iodide Ion
I ⁻	Iodide Ion
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 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในประเทศไทยมีพลังงานทางเลือก (alternative energy) มากมายให้เราได้เลือกใช้ อาทิเช่น พลังงานชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สะอาดที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่อให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การพัฒนาพลังงานทดแทนยังช่วยการลดการพึ่งพาพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่สามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells , DSSCs) การวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์ไฟฟ้าเคมีจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคือออกไซด์สามารถทำได้ โดยการใช้เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์ ณ ปัจจุบันได้มีผู้วิจัยมากมายที่สนใจศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อที่จะก้าวไปสู่ยุคแห่งพลังงานทดแทนของโลก (alternative energy of world) [1-3]

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะสามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ไปใช้กับอุปกรณ์ภายนอกยังคงมีความจำเป็นต้องพัฒนาประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)
2. เพื่อเรียนรู้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)
3. เพื่อวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์ไฟฟ้าเคมีจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคือ-

ออกไซด์โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์

4. เพื่อศึกษาผลของการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งคือออกไซด์เมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการกระตุ้นสีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยการกระตุ้นสีย้อมไวแสง N719 ด้วย ความร้อน
2. ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมด้วยการกระตุ้น สีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อน
3. ศึกษาขั้นตอนและหลักการในการสร้างวงจรมูลของ (DSSCs) สำหรับการหาค่าความต้านทานของวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อน โดยใช้เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการทำงานและวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
2. ศึกษาหาเทคนิคการวัดและวิเคราะห์ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเครื่อง Electrochemical Impedance Spectroscopy
3. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์ โดยใช้การกระตุ้นขั้วไฟฟ้าสีย้อมไวแสง N719 ด้วยความร้อน
4. วิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ ดังนี้
 - 4.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ด้วย Current density -Voltage characteristic analysis
 - 4.2 วิเคราะห์ค่า Dye adsorption ด้วย UV-Vis spectrometer
 - 4.3 วิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน ด้วย Electrochemical Impedance Spectroscopy
5. วิเคราะห์และทำรายงานสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่	สิงหาคม 2556	กันยายน 2556	ตุลาคม 2556	พฤศจิกายน 2556	ธันวาคม 2556	มกราคม 2557	กุมภาพันธ์ 2557
1							
2							
3							
4							
5							

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์
2. ความรู้ความเข้าใจในวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์
3. ความรู้ในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย UV-Vis spectrometer, Solar simulator, Electrochemical Impedance Spectroscopy
4. ความสามารถในการสร้างวงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์
5. ทักษะในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานในขั้นตอนต่างๆ
6. ทักษะกระบวนการวิจัยตามหลักการทางวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [4]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งในวงการวิชาการและวงการพาณิชย์ เนื่องจากแนวโน้มที่จะผลิตในเชิงการค้าได้ ในราคาที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ผลิตในปัจจุบัน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 15%



รูปที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง สีย้อมไวแสงอนุภาคของโลหะออกไซด์และอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้

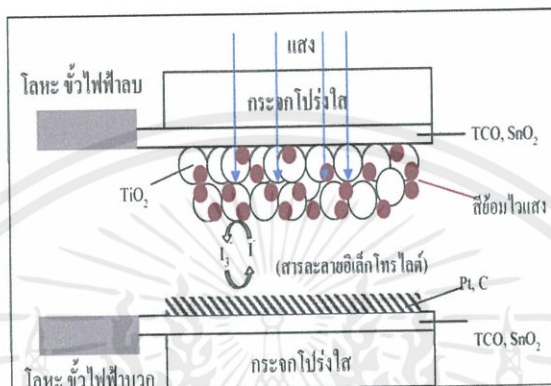
2.1.1.1 สีย้อมไวแสง (Dye-Sensitizer)

สีย้อมไวแสงทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และ โมเลกุลของสีย้อมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนเข้าไปในชั้นนำไฟฟ้า (Conduction band, CB) ของโลหะออกไซด์ และเคลื่อนที่ไปสู่กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง การส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องมีสมบัติที่สำคัญเช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็น (Visible Light) และใกล้อินฟราเรด เพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับ

แสงโฟตอนที่ตกกระทบมีคุณสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสมมีเสถียรภาพสูง ในสภาวะถูกออกซิไดส์และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

2.1.1.2 สารอิเล็กโทรไลต์

สารอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ซัดเซยอิเล็กตรอนให้กับ โมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทดหรืออิเล็กโทรดอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมควรจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นและมีอายุการใช้งานยาวนาน



รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [5]

2.1.1.3 ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์

ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอนและเป็นพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของ โมเลกุลสีย้อมไวแสง โลหะออกไซด์ที่ใช้ควรต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) มีพื้นที่ผิวมาก เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการยึดเกาะของสีย้อมมากและไม่ดูดกลืนแสงในย่านที่ต้องการใช้งาน

2.1.1.4 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

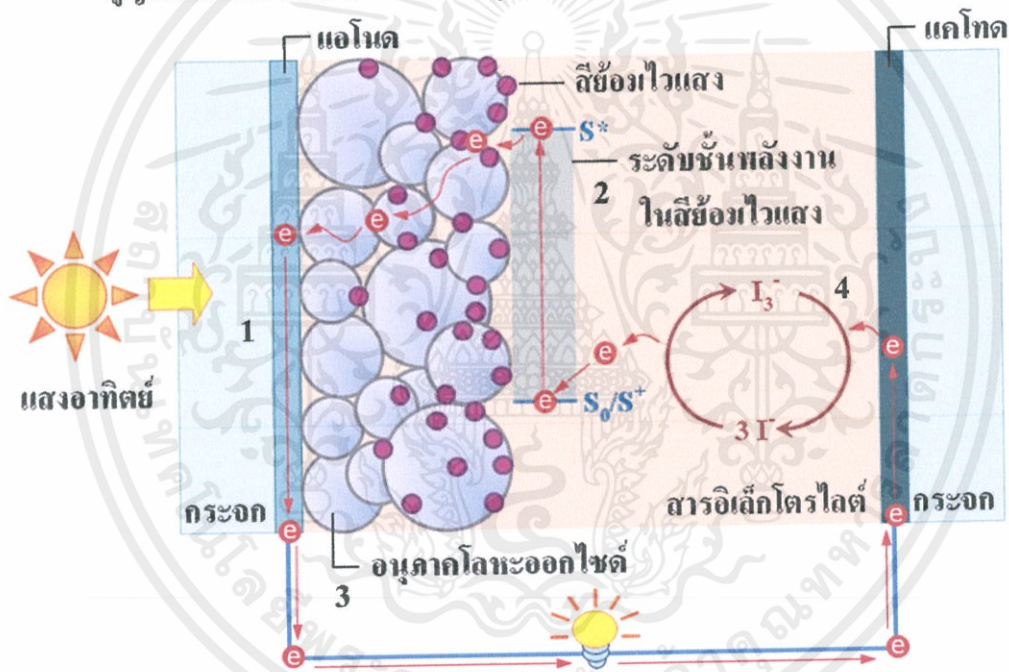
2.1.1.4.1 ขั้วเวิร์คกิ้งอิเล็กโทรด (Working Electrode) ขั้วเวิร์คกิ้งอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ในการสร้างอิเล็กตรอนและถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรรภายนอก ประกอบด้วย สีย้อมไวแสง อนุภาคโลหะออกไซด์ และกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงส่วนมากนิยมใช้

2.1.1.4.2 ขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter Electrode) ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโทรไลต์จึงต้องนำไฟฟ้าดี มีพื้นที่ผิวมากและมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Over potential) สำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโทรไลต์ด้านนิยมใช้โลหะแพลททินัม(Platinum)หรือแกรไฟต์ (Graphite) เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [4], [5]

1. แสงตกกระทบ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนบริเวณผิวของสารกึ่งตัวโลหะออกไซด์ จะดูดกลืนแสงแล้วอิเล็กตรอนในสถานะพื้น(S^0)กระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้า(S^*)
2. อิเล็กตรอนในสถานะเร้า(S^*)ถูกส่งผ่านไปสู่อิเล็กตรอนนำไฟฟ้า (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
3. อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อนำไปใช้งาน
4. ที่ขั้วแคโทดอิเล็กโทรด สารอิเล็กโทรไลต์เกิดกระบวนการรีดออกซ์โดยจะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วแคโทดอิเล็กโทรด และให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน(S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น(S^0)



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ

ปฏิกิริยาที่ขั้วเวิร์คกิ้งอิเล็กโทรด

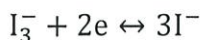


ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดอิเล็กโทรด



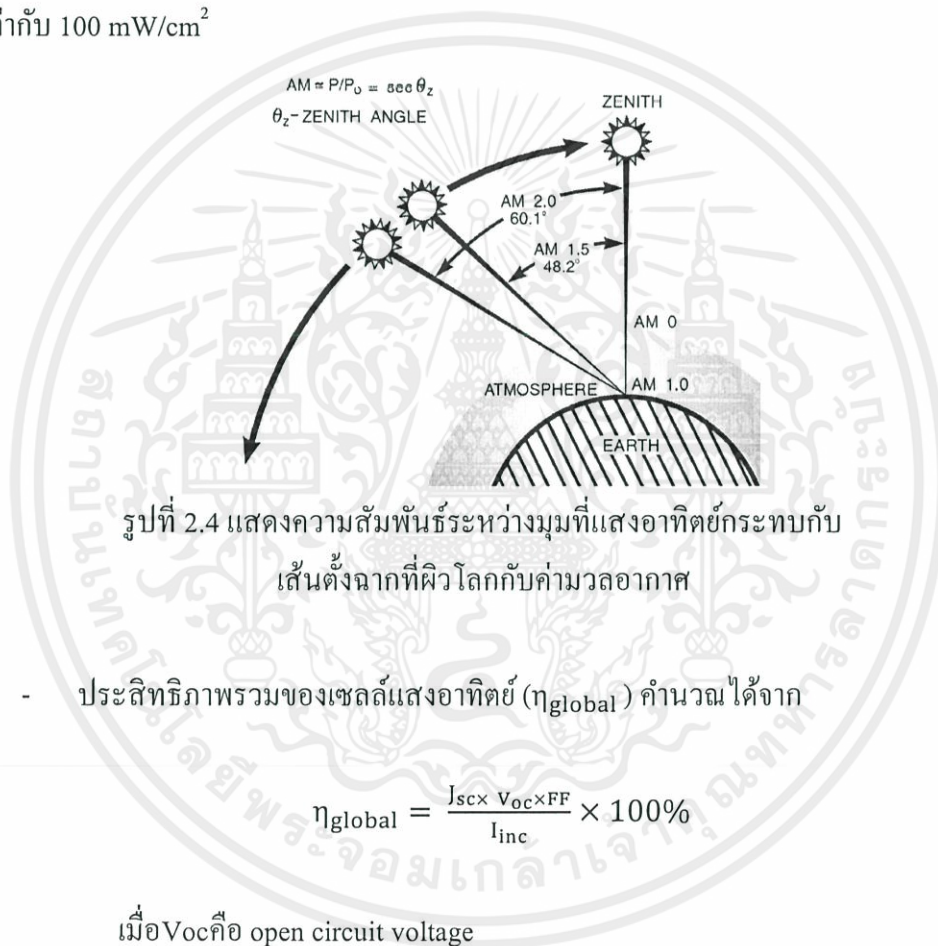
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

ปฏิบัติการรวม



2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [5]

ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงผิวโลกสามารถอธิบายได้ในรูปของมวลอากาศ (Air Mass, AM) โดยค่า $AM = \frac{1}{\cos\theta_z}$ เมื่อ θ_z คือ มุม zenith เช่น เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี มีค่า $\theta_z = 0^\circ$ ดังนั้นมี AM เท่ากับ 1.0 ความเข้มแสงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศ AM เท่ากับ 0.0 สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จะนิยมศึกษาภายใต้ความเข้มแสงที่ AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2



- ประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ (η_{global}) คำนวณได้จาก

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

เมื่อ V_{oc} คือ open circuit voltage

- ค่า fill factor (ff) คำนวณจาก

$$\text{fill factor} = \frac{P_{\text{max}}}{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีก P_{max} คือค่ากำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ึ่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

สารกึ่งตัวนำ	สีย้อมไวแสง	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η_{global} (%)	ความเข้มแสง (mW/cm ²)
TiO ₂	RuL ₂ (μ - (CN)Ru(CN)L'' ₂) ₂	12.0	0.60	7.1	100 (AM 1.5)
TiO ₂	Black Dye	20.5	0.72	10.4	100 (AM 1.5)
TiO ₂	N3	18.0	0.72	10.0	100 (AM 1.5)
TiO ₂	A natural cyanin-dye	1.5	0.40	0.56	100 (AM 1.5)
SnO ₂ /ZnO	N3	22.8	0.67	8.0	90 (direct sunlight)
ZnO	mercurochrome	7.4	0.52	2.5	99 (AM 1.5)
Nb ₂ O ₅	N3	4.9	0.63	2.0	100 (AM 1.5)
ZnO	N3	4.2	0.46	2.0	56

L = 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylicL" = 2,2'-bipyridine

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ต้องการ ควรมีค่าใกล้เคียงกันกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของผลึกเดี่ยวซิลิคอนหรือของแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) มากที่สุด โดยให้ประสิทธิภาพรวมมีค่าประมาณ 15%

2.1.4 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง[6]

2.1.4.1 พัฒนาโมเลกุลสีย้อมไวแสง (Dye) ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสง ตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงตาเห็นจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด (near IR)

การพัฒนาสีย้อมไวแสงสามารถแบ่งเป็น 3 แนวทางหลักคือ

1. หาสีย้อมไวแสงชนิดใหม่ที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงกว้าง ตั้งแต่ช่วงแสงตาเห็นจนถึงแสงใกล้อินฟราเรดเพื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนในสถานะเร้าให้มากที่สุด
2. เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวของโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มปริมาณสีย้อมไวแสงให้เกาะกับโลหะออกไซด์ในปริมาณมาก
3. เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ เพื่อไม่ให้เกิดสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ [5]

ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาเช่นกัน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับผลิตในเชิงการค้า ในระยะเริ่มแรกระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบที่เตรียมได้ง่ายไม่ยุ่งยากคืออิเล็กทรอนิกส์ของเหลวมีส่วนประกอบของคู่อิเล็กทริคคอกซ์ของไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I/I_3) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์เช่นอะซีโตรไนล์ โพรพิโอนไนล์ เมทริกซ์อะซีโตรไนล์ โพรพิลีนคาร์บอนเนตเป็นต้น ในปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถให้ประสิทธิภาพรวมของเซลล์สูงกว่า 10% เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการขนส่งของไอออนที่รวดเร็วแต่มีข้อเสียคือ ตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่ายจึงทำให้เกิดปัญหาการหายไปหรือรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมอายุการใช้งานและความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงลดลง ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวและต้องได้รับการแก้ไขให้แล้วเสร็จ ก่อนที่จะผลิตต้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงออกสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.4.3 การพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ [5]

เพื่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงสุด ชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะต้องมีเสถียรภาพสูงมีพลังงานแถบช่องว่าง (E_g) ที่กว้างมีพื้นที่ผิวมาก เพื่อให้โมเลกุลสีย้อมยึดเกาะได้ในปริมาณมากมีการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอ เพื่อให้การแพร่ผ่านของไอออนอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีและแต่ละอนุภาคจะต้องเชื่อมติดกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถแพร่ผ่านได้ดีคืออนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่กลุ่มของGrätzel[7] เลือกใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงครั้งแรก คืออนุภาคผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างกว้างประมาณ 3.2 eV มีเสถียรภาพสูง ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้มีความพยายามเปลี่ยนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างชนิดอื่นๆแทน เช่น ทินออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) และสตรอนเชียมไททาเนต ($SrTiO_3$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารกึ่งตัวนำผสมระหว่างทินออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมชนิด N3 ให้ประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 8% ที่ความเข้มแสง 90 mW/cm^2 ในปัจจุบันอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังคงเป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพรวมสูงสุด ตัวอย่างประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้อนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 นอกจากการเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำแล้ว อีกแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้ปริมาณโมเลกุลสีย้อมไวแสงสามารถยึดเกาะได้มากขึ้นทำให้มีการ

กระจายตัวของช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและเพิ่มระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้นเพื่อลดการเกิดการรีคอมไบเนชันของประจุ

2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและการแสดงค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน [8]

คำจำกัดความของอิมพีแดนซ์และหลักการของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

หลักการของความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical Resistance) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์มได้ให้คำจำกัดความของความต้านทานว่าเป็นสัดส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage: E) และกระแสไฟฟ้า (Current)

แม้ว่าความสัมพันธ์นี้จะเป็นที่รู้จักแพร่หลายแต่การใช้งานยังคงสามารถใช้งานได้จำกัดกับอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียวหรือเราอาจเรียกความต้านทานนี้ว่าความต้านทานในอุดมคติ (Ideal Resistor) ซึ่งความต้านทานในอุดมคตินั้นมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

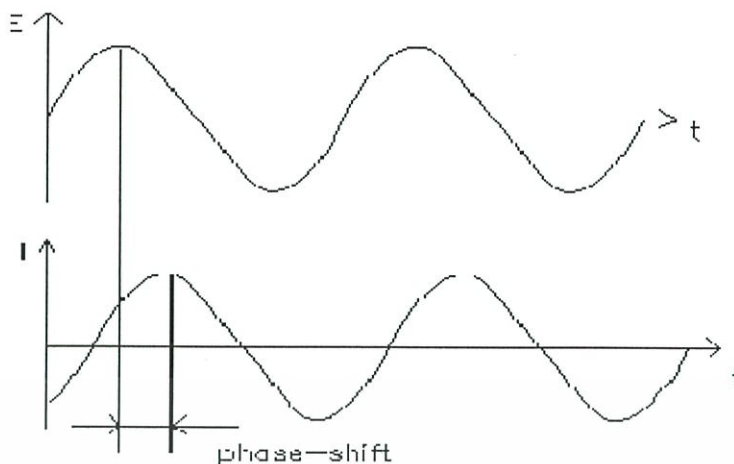
1. ความต้านทานในอุดมคติจะเป็นไปตามกฎของโอห์มในทุกๆระดับของกระแส และแรงดัน
2. ค่าความต้านทานไม่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่
3. สัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่เป็นกระแสสลับซึ่งไหลผ่านความต้านทานจะมีเฟสตรง (In phase)

ในความเป็นจริงแล้วยังมีอุปกรณ์อื่นๆที่มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนกว่าความต้านทานในอุดมคติซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ทำให้เราต้องทิ้งหลักการของความต้านทานอย่างง่ายไป แต่เราจะเรียกแทนความต้านทานนั้นว่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าที่ใช้งานได้ทั่วไปแทนโดยอิมพีแดนซ์นั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับความต้านทานคือเป็นอุปกรณ์ที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่สิ่งที่แตกต่างกันคืออิมพีแดนซ์นั้นอยู่นอกเหนือกฎเกณฑ์ของความต้านทานที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

การวัดค่าอิมพีแดนซ์นั้น โดยปกติจะวัดได้โดยการให้แรงดันกระแสสลับกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี และวัดกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้านั้น โดยในที่นี้สมมติว่าเราทำการให้แรงดันที่มีการกระตุ้นแบบคลื่นไซน์กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะทำให้ได้ผลตอบสนอง (Response) ต่อแรงดันเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งประกอบไปด้วยความถี่ที่ถูกกระตุ้นและค่าอาร์โมนิกซึ่งกระแสไฟฟ้านี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (ซึ่งเป็นอนุกรมฟูเรียร์)

Electrochemical Impedance ปกติจะทำการวัดโดยใช้สัญญาณกระตุ้นที่มีขนาดเล็กซึ่งทำให้ผลตอบสนองของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้นไป (Pseudolinear) การค้า

ไม่ว่าการผลตอบสนองต่อแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์จะเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณกระตุ้นแต่มี การเลื่อนของเฟสดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Sinusoidal Current Response in a Linear System

สัญญาณกระตุ้นสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันกับเวลา

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

$E(t)$ เป็นแรงดัน ณ เวลา E_0 เป็นค่าแอมพลิจูดของสัญญาณและ ω คือค่าความถี่เชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุม โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (มีหน่วยเป็น radians/second) และค่าความถี่ f (มีหน่วยเป็น hertz) คือ

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

สัญญาณตอบสนองในระบบเชิงเส้น $I(t)$ จะมีการเลื่อนของเฟสและมีแอมพลิจูดเท่ากับ I_0

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

ซึ่งการอธิบายค่าโดยใช้วิธีคล้ายกับกฎของโอห์มจะทำให้เราสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้
ดังนี้

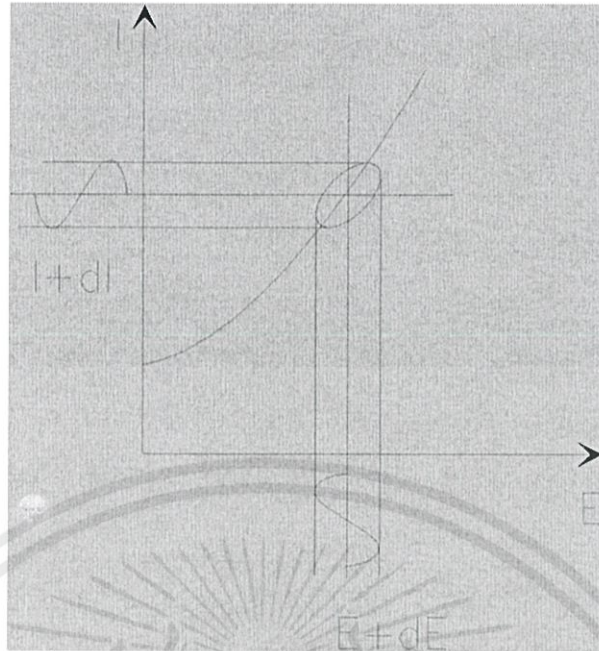
$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{E_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \phi)} \quad (2.6)$$

ดังนั้นเราสามารถทำการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของขนาด Z_0 และค่าของเฟสที่เลื่อนไป (phase shift) ϕ ได้

หากเราทำการพลอตค่าสัญญาณคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้าบนแกน x และทำการป้อนสัญญาณตอบสนอง $I(t)$ บนแกน y จะได้รูปกราฟรูปไข่ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งวงกลมรูปไข่นี้รู้จักกันในชื่อ “Lissajous” โดยการวิเคราะห์รูป Lissajous บนหน้าจอของออสซิลโลสโคป เป็นวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เนื่องจากความสามารถ Lock-in amplifier และ Frequency

response analyzer นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Origin of Lissajous Figure

นำสมการความสัมพันธ์ของ Euler's มาใช้จะได้ว่า

$$\exp(j\phi) = \cos\phi + j\sin\phi \tag{2.7}$$

ซึ่งเป็นไปได้ที่จะเขียนอธิบายค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของฟังก์ชันของจำนวนเชิงซ้อนได้โดยแรงดันจะสามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$E_t = E_0 \exp(j\omega t) \tag{2.8}$$

และสามารถเขียนอธิบายกระแสได้ดังนี้

$$I_t = I_0 \exp(j\omega t - \phi) \tag{2.9}$$

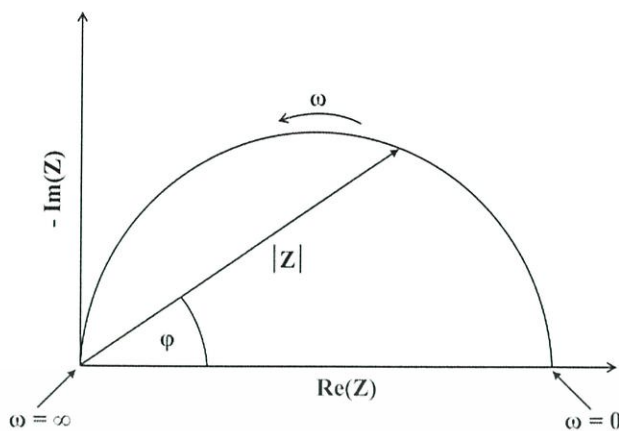
ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ก็จะสามารถเขียนแสดงในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เช่นกันดังนี้

$$Z = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\phi) = Z_0(\cos\phi + j\sin\phi) \tag{2.10}$$

การนำเสนอข้อมูลหากสังเกตจากสมการการแสดงค่า $Z(\omega)$ นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพโดยหากทำการพลอตส่วนที่เป็นจำนวนจริงบนแกน x และส่วนจินตภาพบนแกน y ของกราฟเราจะได้กราฟซึ่งเรียกว่า “Nyquist Plot” ดังรูปที่ 2.7

จะสังเกตว่าในการพลอตค่านี้แกน y จะมีค่าติดลบและจุดแต่ละจุดบน Nyquist Plot จะแสดง

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

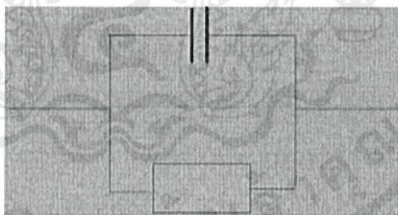


รูปที่ 2.7 Nyquist Plot with Impedance Vector

จะเห็นว่าข้อมูลที่มีค่าความถี่ต่ำจะอยู่บริเวณด้านขวาของกราฟส่วนบริเวณที่มีความถี่สูงจะอยู่ด้านซ้ายของกราฟซึ่งเป็นจริงสำหรับข้อมูลจาก EIS ที่ค่าอิมพีแดนซ์มักจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น (ซึ่งไม่เป็นจริงเสมอไปสำหรับทุกวงจร) บน Nyquist Plot นั้น ค่าของอิมพีแดนซ์จะสามารถแสดงได้โดยความยาวของเวกเตอร์ $|Z|$ และมุมของเวกเตอร์เมื่อวัดจากแกน x คือค่าความถี่ f

Nyquist Plot นั้นมีข้อเสียอยู่คือเมื่อทำอ่านข้อมูลณจุดใดจุดหนึ่งของกราฟเราจะไม่สามารถสามารถบอกได้ว่าจุดจุดนั้นถูกบันทึกโดยใช้ความถี่เท่าใด

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

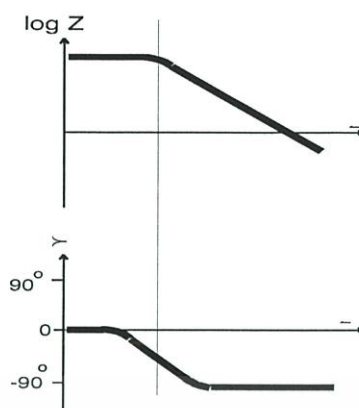


รูปที่ 2.8 Simple Equivalent Circuit with One Time Constant

วิธีการนำเสนออีกแบบที่เป็นที่นิยมเช่นกันคือการพลอต “Bode Plot” โดยค่าอิมพีแดนซ์จะถูกแสดงโดยพลอตค่า log ของความถี่บนแกน x และพลอตทั้งค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์ ($|Z| = Z_0$) และค่าการเลื่อนของเฟส (phase-shift) ลงบนแกน y

ซึ่ง Bode Plot สำหรับวงจรในรูปที่ 2.9 จะถูกแสดงซึ่ง Bode Plot จะต่างกับ Nyquist Plot ตรงที่จะมีการแสดงค่าความถี่อยู่ในกราฟด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Bode Plot with One Time Constant

2.2.1 อุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit Elements) [9]

ข้อมูลของ EIS มักจะทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองวงจรเทียบเท่าอุปกรณ์ส่วนใหญ่ในวงจรเทียบเท่านั้นก็คืออุปกรณ์ต่างๆ ปลายทางไฟฟ้า เช่น ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ ในการที่จะใช้ประโยชน์ได้นั้นอุปกรณ์ที่อยู่ในแบบจำลองจะต้องมีพื้นฐานใกล้เคียงกับไฟฟ้าเคมีเชิงกายภาพของระบบตัวอย่าง เช่นแบบจำลองส่วนใหญ่ประกอบด้วยตัวต้านทานที่เป็นตัวแทนของความต้านทานในสารละลายของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ดังนั้นความรู้พื้นฐานด้านอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มาตรฐานต่างๆจึงค่อนข้างมีประโยชน์โดยตารางที่ 2.2 เป็นรายการของอุปกรณ์พื้นฐาน, สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันและค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์

ตารางที่ 2.2 Common Electrical Element

Component	Current Vs. Voltage	Impedance
resistor	$E = IR$	$Z = R$
inductor	$E = L di/dt$	$Z = j\omega L$
capacitor	$I = C dE/dt$	$Z = 1/j\omega C$

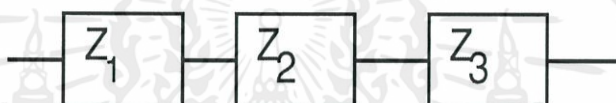
โปรดสังเกตว่าค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และมีเฉพาะปริมาณในส่วนที่เป็นจำนวนจริงจากการที่ไม่มีส่วนของจำนวนจินตภาพทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสตรงกับแรงดัน (In-phase)

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำนั้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นซึ่งตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะปริมาณในส่วนที่เป็นจินตภาพเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีการร้าวไม่ว่ากรณีใดเลื่อนของเฟส (Phase shift) เท่ากับ 90 องศาเทียบกับแรงดัน ข้างของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อเทียบกับความถี่ของตัวเก็บประจุนั้นจะมีลักษณะตรงข้ามกับตัวเหนี่ยวนำคืออิมพีแดนซ์จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นตัวเก็บประจุนั้นก็มค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพเช่นกัน โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีการเลื่อนของเฟส (Phase shift) เท่ากับ -90 องศาเมื่อเทียบกับแรงดัน

2.2.2 การต่ออุปกรณ์เป็นวงจรอนุกรมและวงจรขนาน[9]

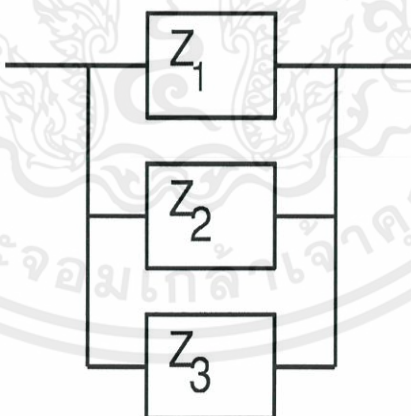
เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่สามารถสร้างแบบจำลองวงจรเทียบเท่าด้วยอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียวมีน้อยมาก ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องต่ออุปกรณ์หลายชิ้นเข้าด้วยกันซึ่งอาจเป็นวงจรอนุกรมหรือวงจรขนานเราสามารถใส่สูตรอย่างง่ายในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรแบบต่างๆดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 Impedances in Series

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์เชิงเส้นของวงจรอนุกรมนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.11 Impedances in Parallel

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์เชิงเส้นของวงจรขนานนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \quad (2.12)$$

เราจะทำการคำนวณตัวอย่างสองตัวอย่างโดยสมมติว่าเรามีตัวต้านทานขนาด 1 โอห์มและ 4 โอห์มอย่างละหนึ่งตัวค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานมีค่าเท่ากับค่าของตัวต้านทานเองเราจะสามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 = R_1 + R_2 = 1\Omega + 4\Omega = 5\Omega \quad (2.13)$$

ความต้านทานและ Impedance จะเพิ่มขึ้นทั้งคู่เมื่อมีการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม สมมติว่าเราทำการต่อตัวเก็บประจุขนาด 2 μF แบบอนุกรมกันค่าคาปาซิแตน (Capacitance) ของตัวเก็บประจรรวมกันจะมีค่าเท่ากับ 1 μF

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= Z_1 + Z_2 = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} \\ &= \frac{1}{j\omega(2e-6)} + \frac{1}{j\omega(2e-6)} \\ &= \frac{1}{j\omega(1e-6)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

ค่าอิมพีแดนซ์จะเพิ่มขึ้นแต่ค่าคาปาซิแตนจะลดลงเมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการแปรผกผันของความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์และอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมีในเชิงกายภาพและอุปกรณ์ในวงจรเทียบเท่า Electrolyte Resistance

ความต้านทานของสารละลายนั้นมักเป็นตัวแปรสำคัญต่อค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยโพเทนชิโอเมตริก (Potentiostat) แบบ 3 อิเล็กโทรดสมัยใหม่นั้นจะทำหน้าที่ชดเชยความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วแคโทดและขั้วอ้างอิงแล้วอย่างไรก็ตามความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วอ้างอิงและขั้วของชิ้นงานก็ยังคงต้องถูกพิจารณาในแบบจำลองอยู่

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

ในที่นี้ r คือค่า Solution resistivity โดยค่าการนำ (Conductivity) ของสารละลาย k มักจะถูกใช้ในการคำนวณความต้านทานของสารละลายตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{l}{k \cdot A} \rightarrow k = \frac{l}{RA} \quad (2.16)$$

หนังสือคู่มือด้านเคมีทั่วไปจะมีรายละเอียดของค่า k สำหรับสารละลายบางชนิดสำหรับสารละลายอื่นๆเราสามารถคำนวณหาค่า k ได้จากค่า Specific conductance โดยหน่วยของ k นั้นมีหน่วยเป็นซีเมนท์ต่อเมตร (S/m) โดยหน่วยซีเมนท์นี้เป็นส่วนกลับของโอห์มดังนั้น

$$1 \text{ S} = 1/\text{Ohm}$$

แต่เซลล์ไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่จะไม่มีกรไหลของกระแสเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform) ปัญหาหลักในการคำนวณค่าความต้านทานของสารละลายจึงต้องพิจารณาการหาเส้นทางกรไหลของกระแสและรูปร่างของอิเล็กโทรดที่กระแสไหลผ่านแต่รายละเอียดของการคำนวณนั้นก็นอกเหนือขอบเขตของเอกสารนี้

โดยปกติเราจะไม่คำนวณค่าความต้านทานของสารละลายจากค่าคอนดักแตนซ์ของไอออนแต่จะสามารถหาความต้านทานได้โดยใช้แบบจำลอง

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.3.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.3.1.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.17)$$

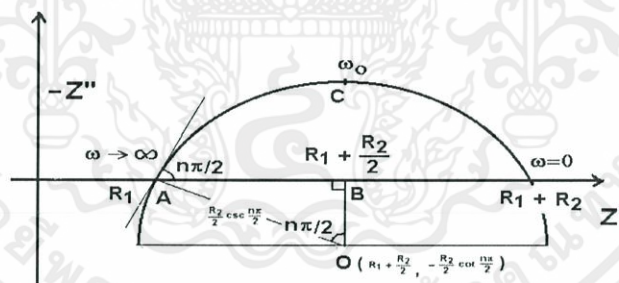
อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นจะต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น

$$Z_C = 1/j\omega C = -j/\omega C \quad (2.18)$$

และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.19)$$

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่ค่า R_S จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.3.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

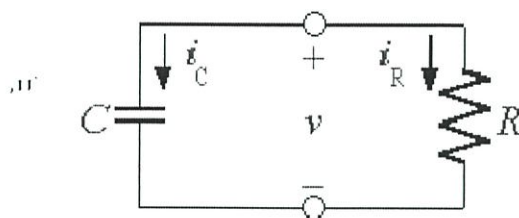
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.13 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ในกรณีนี้ให้ Z_R กับ R_p ดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นสมการ (2.21) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.21)$$

$$= \frac{(1+j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.13 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกันจำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $(j\omega R_p C - 1)$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ(2.23) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \\ &= - \left[\frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right] \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$Z_{RC} = - \left[\frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.24)$$

$$Z_{RC} = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left(\frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) = Z' - jZ''$$

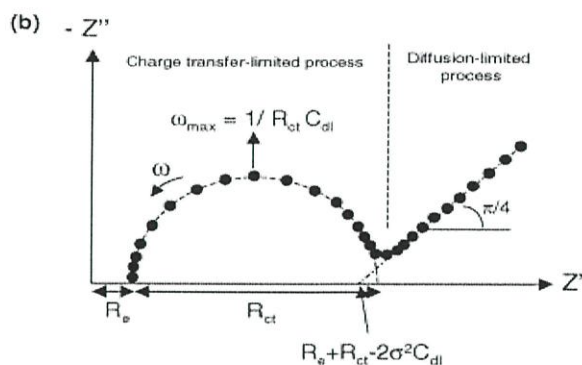
โดยที่ $Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.25)$

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ $\tau = R_p C =$ ค่าคงที่เวลา (time constant) = อายุการใช้งานของอิเล็กตรอน (Electron life time) ในกรณีของ DSSCs

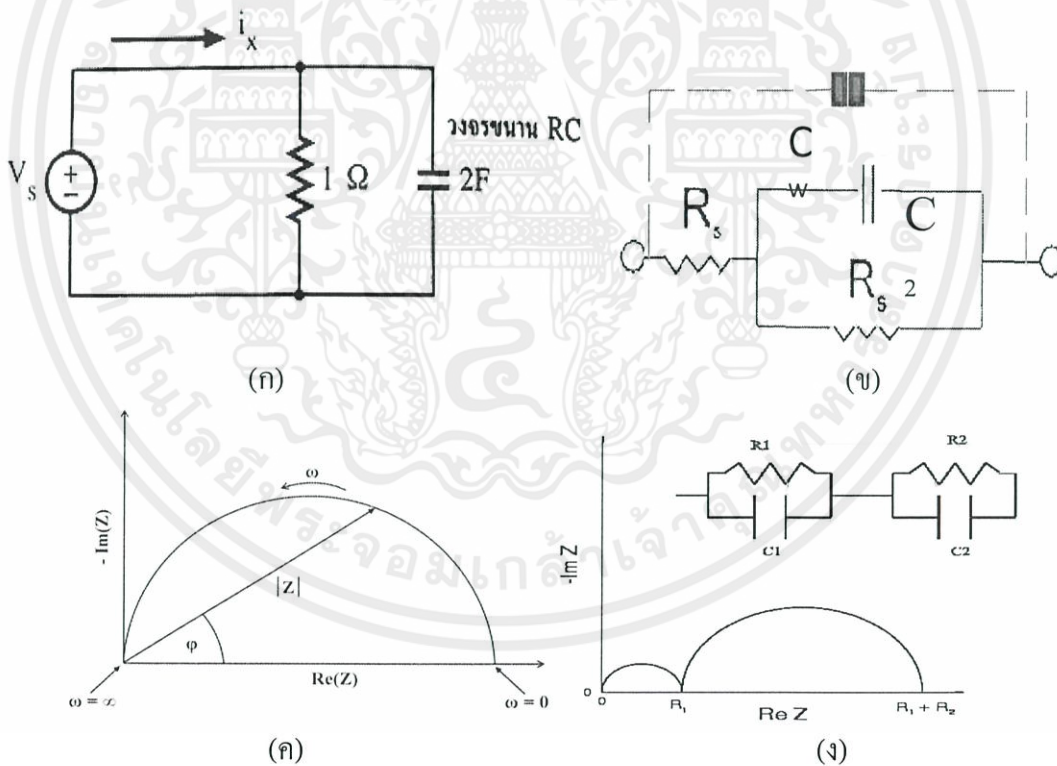
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูป 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

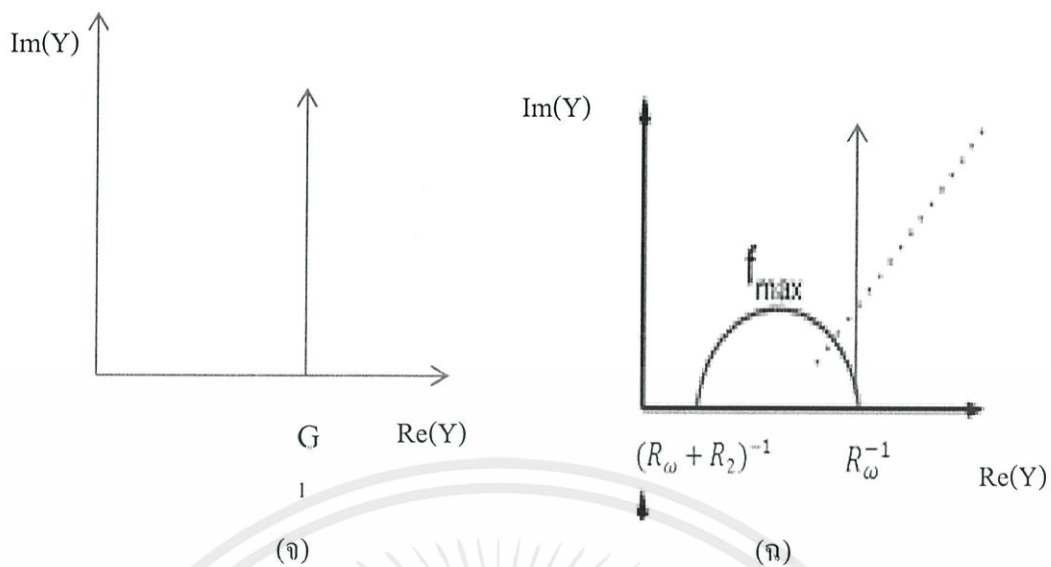


รูปที่ 2.14 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบ ที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง จะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance, C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.15(ก) ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance, R_{∞}) หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุดคือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.15(ค) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_p\tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z'' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีที่ $R_1 = R_{\infty}$ และ $C_1 = C_{\infty}$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.15(ข) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูปที่ 2.15 (ง) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ $R_{\infty}C_{\infty} \leq R_2C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_{∞} และ C_{∞} จะแสดงจุดไขว้ปลาดังรูปที่ 2.15 (ง) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้

ในกราฟอิมพีแดนสเปกโตรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเรียกกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนท์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z' = Z - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z')$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.15(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.27)$$

ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.15(ข) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1+j\omega R_2 C_2]}{[(R_2+R_\infty)+j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.28)$$

อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.15(ก),(จ),(ง)และ(ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือ แกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ และพบว่า Z' และ Z'' มีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.29)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.30)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในรูป 2.14 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_s) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.3.1.3 กราฟของโบดี(Bode plot)และ กราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot)

อิมพีแดนซ์ $Z = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก(rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น(polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.16 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \theta \quad (2.31)$$

และ

$$\begin{aligned} \text{Im}(Z) &\equiv Z'' = |Z| \sin \phi \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

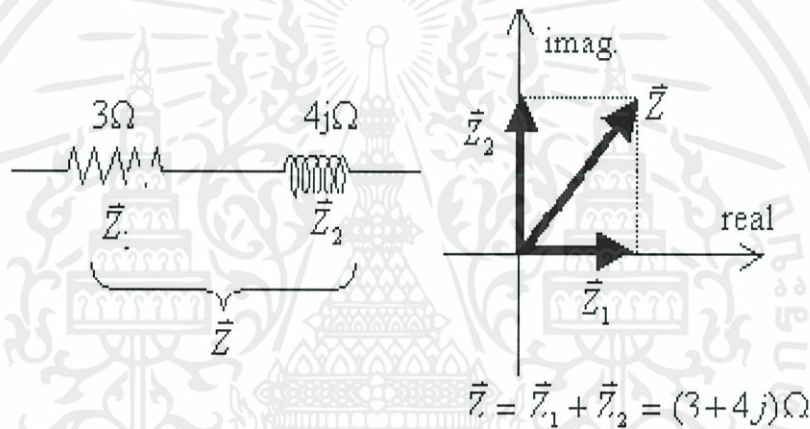
$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad (2.33)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์(Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi \quad (2.34)$$

ดังนั้น

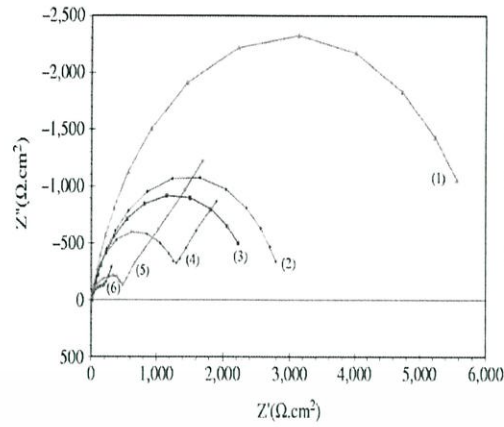
$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.35)$$



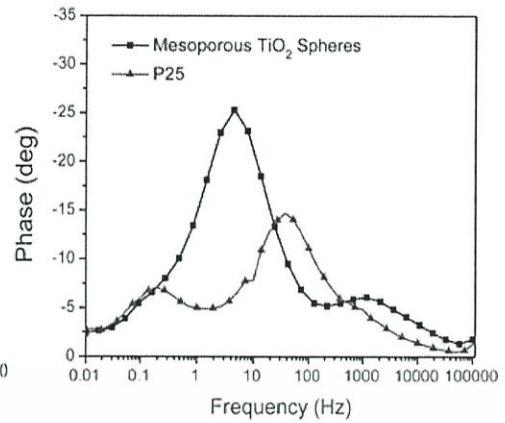
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของ โคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุม เฟสระหว่างทิศทางของ Z หรือ Z' และ Z'' หรือ Z_2 จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัด ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุ สมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดีจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดีคือน้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของนักวิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่สูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi \rightarrow 90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์

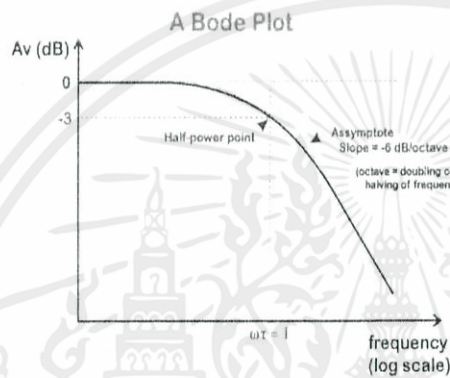
เฟสคงที่ (constant phase element, CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดีสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะไม่ว่ากรณีใดก็ตาม แสดงดังรูปที่ 2.17 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.17 (ก) แสดงกราฟแบบ Nyquist plot

(ข) แสดงลักษณะกราฟแบบ Bode phase plot

(ค) แสดงลักษณะกราฟแบบ Bode plot

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ T และ P เมื่อ T คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน P เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq P \leq 1$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ $Z(CPE)$ จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน(resistance) และแปรตาม ω^{-P} ด้วยเหมือนกันซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{T(j\omega)^P} \tag{2.36}$$

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด (double-layer capacitance, C_{dl}) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = P \sqrt{\frac{T}{R_s^{(P-1)}}} \tag{2.37}$$

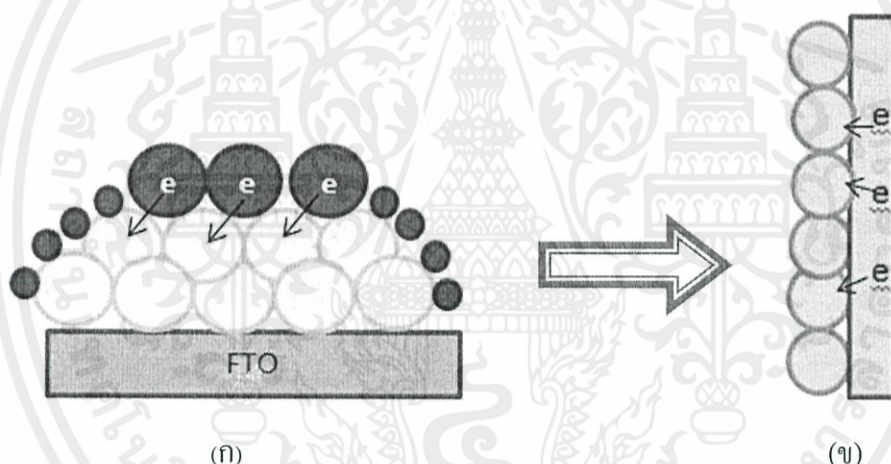
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้คัดลอกไปเป็นของตนเองหรือผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ไปใช้

พารามิเตอร์ P จะสัมพันธ์กับมุมเฟส θ ดังนี้คือ $\theta = P \frac{\pi}{2}$ ถ้ามุมเฟส θ เข้าใกล้ 1 ก็จะมีประพอดิตัวเป็นตัวแทนประจุสมบูรณโดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

2.3.2 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง[10]

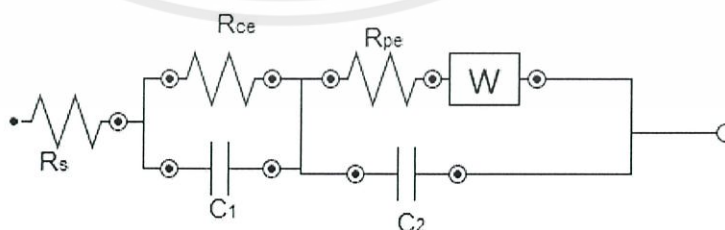
วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง สามารถสร้างได้โดยอาศัยการเทียบวงจรกับการไหลของอิเล็กตรอนภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ DSSCs ตัวอย่างเช่น เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านหน้าสัมผัสต่างๆที่ขั้วไฟฟ้าลบซึ่งประกอบไปด้วย กระจกนำไฟฟ้า อนุภาคซิงค์ออกไซด์และโมเลกุลสีย้อมอิเล็กตรอนบางส่วนจะสามารถไหลผ่านรอยต่อที่หน้าสัมผัสนี้ไปได้ เสมือนผ่านตัวต้านทานแต่อิเล็กตรอนบางส่วนอาจตกค้างอยู่ที่รอยต่อซึ่งจะเปรียบเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ แต่ละหน้าสัมผัสจึงเปรียบเสมือนเป็นวงจรขนาน RC สำหรับอิเล็กตรอนในกรณีของ DSSCs มีหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุต่างประเภทหลักๆอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าลบ (ZnO/Dye/Electrolyte) และขั้วไฟฟ้าบวก (Electrolyte/Pt)จึงสามารถสร้างวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.19 โดยที่ R_s คือ ความต้านทานรวมภายในวงจรซึ่งเกิดจากความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าเป็นหลัก วงจรขนานระหว่าง R_{ce} และ C_1 แทนหน้าสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้าบวก วงจรขนานระหว่าง R_{pe} และ C_2 แทนหน้าสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้าลบ และ W แทนความต้านทานการแพร่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.18 แสดงการเคลื่อนที่ของแต่ละหน้าสัมผัส

(ก) หน้าสัมผัส dye กับ ZnO

(ข) หน้าสัมผัส กระจกนำไฟฟ้ากับPt (Platinum)

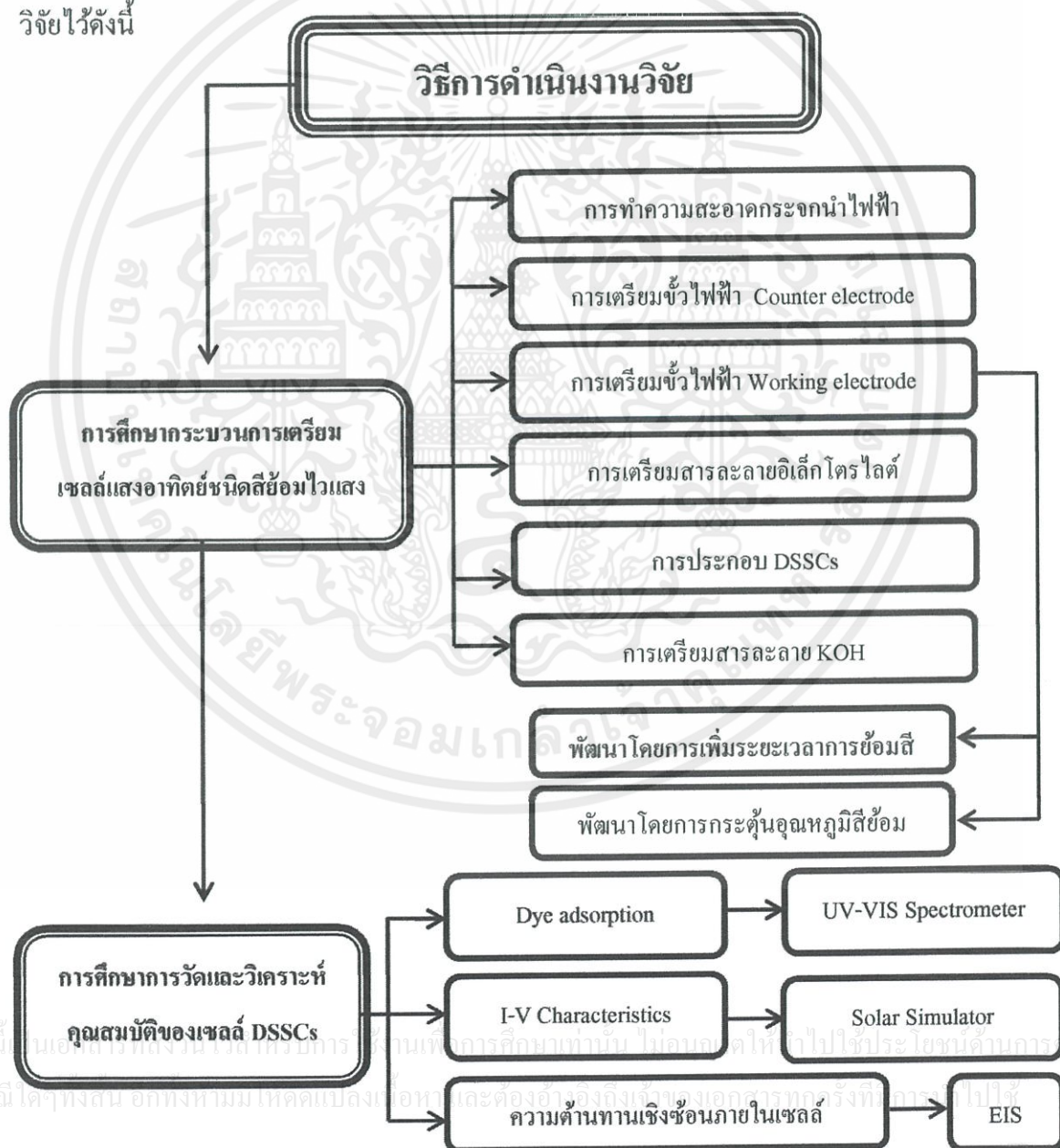


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูล
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษากระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar cells : DSSCs) โดยใช้สีย้อมไวแสง N719 เพื่อพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และจะอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวิเคราะห์สมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์ ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งหัวข้อการดำเนินงานวิจัยไว้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.1 กระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้เทคนิคการปาดเคลือบในการเตรียม DSSCs ซึ่งในการจัดเตรียม DSSCs มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้าและวิธีทำความสะอาดพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้า

1. ทำการวัดขนาดกระจกนำไฟฟ้า (FTO glass ,15 Ω) ให้มีขนาด 1×1.5 ซม. โดยใช้ปากกาทำเครื่องหมายตามขนาดที่วัด จากนั้นทำการตัดกระจกโดยใช้มีดกรีดกระจกกรีดกระจกตามแนวปากกาหรือตามขนาดที่วัดไว้ แล้วหักกระจกตามรอยที่กรีดก็จะได้กระจกนำไฟฟ้าตามขนาดที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.2



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

2. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการตัดแล้ว (ขนาด 1×1.5 ซม.) มาเจาะรู โดยใช้สว่านและดอกสว่านสำหรับเจาะกระจก ซึ่งจะวางกระจกนำไฟฟ้าไว้ในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ที่บรรจุน้ำ (เพื่อลดอุณหภูมิและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการเจาะกระจก) เจาะรู 2 รู เพื่อทำเป็นรูสำหรับหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปสู่พื้นที่เซลล์ กระจกนำไฟฟ้าที่เจาะรูนี้จะถูกนำไปใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)

3. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเจาะรูและกระจกนำไฟฟ้าที่จะนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode) ไปทำความสะอาด ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ล้างกระจกด้วยผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดคราบสกปรก(น้ำยาล้างจาน) โดยเทน้ำยาล้างจานลงบนพื้นผิวกระจกแล้วใช้นิ้วถูให้ทั่วกระจก หลังจากนั้นล้างออกด้วยน้ำสะอาด

3.2 ล้างกระจกด้วยน้ำปดอดประจุ(Deionized Water) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เเทน้ำปดอดประจุให้ท่วมกระจก นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก(Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 15 นาที

2. การเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)

2.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม. ที่ผ่านการเจาะรูสำหรับชนิดสารละลาย อิเล็ก- โตรไลต์และทำความสะอาดแล้ว วางลงบนพื้นที่สะอาด โดยให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น

2.2 นำบล็อกสกรีน (สติกเกอร์) ทาบลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้า ให้บริเวณของบล็อก สกรีนอยู่บนพื้นผิวกระจก ยึดกระจกกับพื้นรองให้แน่น

2.3 ตักครีมแพลทินัมใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีนที่ติดอยู่บนกระจกใช้ มีดโกนมีด้ามพลาสติกนุ่มให้เต็มบล็อกสกรีน รองนครีมแพลทินัมแห้ง

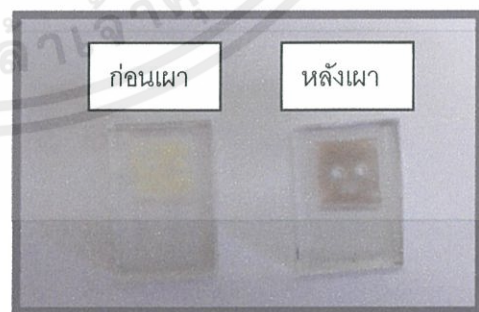
2.4 นำกระจกที่เคลือบครีมแพลทินัมแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับค่าอุณหภูมิเตาเผาดังนี้

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เผาเป็นเวลา 10 นาที
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เผาเป็นเวลา 10 นาที
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เผาเป็นเวลา 10 นาที
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เผาเป็นเวลา 10 นาที
- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เผาเป็นเวลา 30 นาที

จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เริ่มเผาที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง อุณหภูมิของเตาเผาเท่ากับ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ อย่างแท้จริง



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 (a) เตาเผา, (b) ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์(Counter electrode)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์ลงนิตยสาร และห้องวิจัยของอีกหลายที่ทุกแห่งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode)

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1 กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม.
- 1.2 มีด โคนมีด้าม
- 1.3 บล็อกสกรีนขนาด 0.7×0.7 ซม.
- 1.4 โวลต์มิเตอร์
- 1.5 เตาเผา (Isotemp® Programmable Muffle Furnace 650-750 Series)
- 1.6 เครื่อง Hot Plate & Stirrer
- 1.7 คริมซิงค์ออกไซด์
- 1.8 หลอดทดลอง

2. ขั้นตอนการเตรียมคริมซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ส่วนประกอบของคริมซิงค์ออกไซด์

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide nanopowder, <math><50\text{ nm}</math> particle size(BET), >97%)
- เอทานอล (Ethanol) ความเข้มข้น 0.79 M (MW 46.07 g/mol)
- ตัวประสาน (Triton X-100)

ซึ่งผู้ทำวิจัยทำการเตรียมซิงค์ออกไซด์ต่อเอทานอลในอัตราส่วน 1:1.25 โดยน้ำหนัก โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

2.1 ทำการเตรียมปริมาณของสาร

- 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 10×6 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 (Triton X-100) จำนวน 0.15 ml กวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมไวแสง N719

ส่วนประกอบในการเตรียมสีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น 0.5 mM

- สีย้อมไวแสง N719 (MW 1187.7 g/mol)
- เอทานอล (Ethanol) (MW 46.07 g/mol)

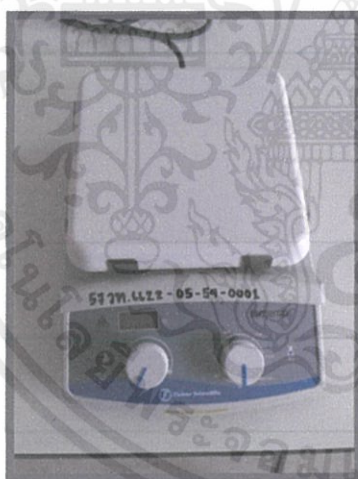
3.1 การเตรียมปริมาณสาร

- สีย้อมไวแสง N719 จำนวน 0.0178 g
- เอทานอล (Ethanol) จำนวน 30 ml

3.2 นำสีย้อมไวแสง N719 เกล็ดภาชนะ(โหล)ที่เตรียมไว้ จากนั้นเทเอทานอลทั้งหมด

(30 ml) ลงไป ปิดฝาภาชนะให้สนิท

3.3 จากนั้นนำไปกวนบนเครื่อง Hot Plate & Stirrer เป็นเวลา 15 ชั่วโมงก็จะได้สีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น 0.5 mM



(a)



(b)

รูปที่ 3.5 (a) Hot Plate Stirrer , (b) สีย้อมไวแสง N719

4. การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก

4.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1×1.5 ซม. ที่ทำความสะอาดแล้วไปเคลือบฟิล์มซิงค์-ออกไซด์ โดยวางลงบนพื้นที่สะอาดโดยให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น

4.2 นำบล็อกสกรีน (สติกเกอร์) ทาบลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้า ให้บริเวณของบล็อกสกรีนอยู่บนพื้นผิวกระจก ยึดกระจกกับพื้นรองให้แน่น

4.3 ตักครีมซิงค์ออกไซด์ใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีนที่ติดอยู่บนกระจก ใช้มีดโกนมีด้ามปาดครีมซิงค์ออกไซด์ให้เต็มบล็อกสกรีนรองจนครีมซิงค์ออกไซด์แห้ง

4.4 นำกระจกที่เคลือบครีมซิงค์ออกไซด์แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับค่าอุณหภูมิเตาเผาดังนี้

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 50 °C เเผาเป็นเวลา 10 นาที

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 100 °C เเผาเป็นเวลา 10 นาที

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 200 °C เเผาเป็นเวลา 10 นาที

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 200 °C เเผาเป็นเวลา 10 นาที

- ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 400 °C เเผาเป็นเวลา 30 นาที

จดบันทึกค่าอุณหภูมิในการเผาทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เริ่มเผาที่อุณหภูมิ 50 °C จนถึงอุณหภูมิของเตาเผาเท่ากับ 400 °C อย่างแท้จริง

4.5 ปลอ่ยกระจกที่ผ่านการเผาทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือจนกว่ากระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในบริเวณที่ไม่มีควมชื้น

4.6 นำกระจกที่เคลือบครีมซิงค์ออกไซด์และผ่านกระบวนการเผาแล้วไปจุ่มสีย้อม N719 โดยมีเงื่อนไขของการจุ่มสีย้อมที่ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาดังนี้

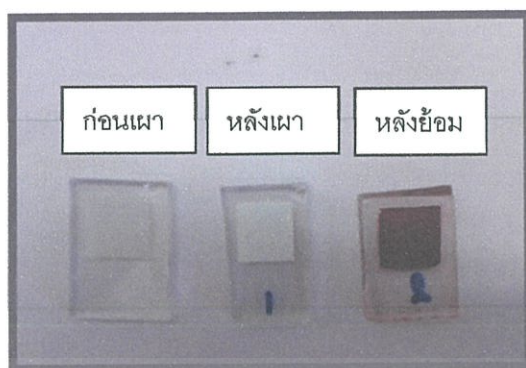
อุณหภูมิสีย้อม N719 (°C)	ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อม (นาที)
30	30 , 60 , 120 , 180 และ 240
50	5 , 10 , 20 , 30 , 60 , 120 , 180 และ 240

4.7 ทำความสะอาดกระจกโดยเช็ดส่วนของสีย้อมที่เกินออกมาจากพื้นผิวของฟิล์ม

ซิงค์ออกไซด์ด้วยเอทานอล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 3.6 (a) การย้อมสีย้อมไวแสง N719 , (b) ขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่สภาวะต่างๆ

3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1. สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบ คือ

- TBP (4-Tert-butylpyridine) ความเข้มข้น 0.4 M ความหนาแน่น 0.923 g/ml
- LiI ความเข้มข้น 0.1 M (MW 133.84 g/mol)
- I₂ ความเข้มข้น 0.05 M (MW 253.81 g/mol)

ซึ่งผู้วิจัยจะเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปริมาตร 20 ml ในอะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile)

โดยมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

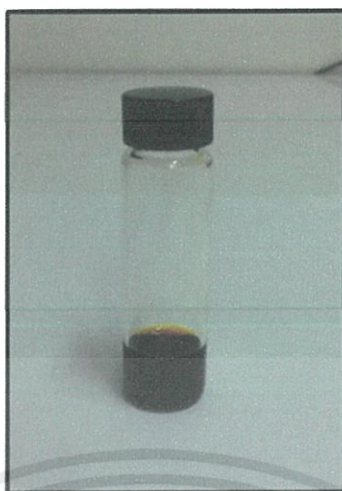
2. ทำการเตรียมปริมาณของสาร

- TBP จำนวน 1.4648 ml
- LiI จำนวน 1.3384 g
- I₂ จำนวน 0.2535 g

โดยใส่สารเคมีลงในขวดบรรจุสารที่สะอาดตามลำดับ จากนั้นเติมอะซิโตไนไตรล์ 20 ml

3. นำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 5 นาที ก็จะได้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

3.1.5 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)

1. ส่วนประกอบเซลล์และอุปกรณ์ประกอบเซลล์

- 1.1 กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode)
- 1.2 กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode)
- 1.3 บล็อกพาราฟิล์มขนาด 0.5×0.5 ซม.
- 1.4 เครื่อง Hot Plate & Stirrer
- 1.5 คีมคีบ

2. วิธีการประกอบเซลล์

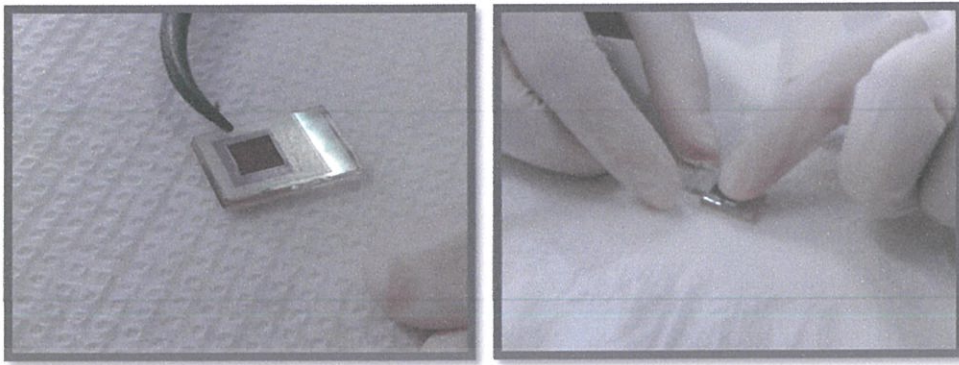
2.1 นำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working electrode) วางบนพื้นผิวเรียบ จากนั้นเอาบล็อกพาราฟิล์มทาบลงบนกระจกให้บริเวณบล็อกตรงกับพื้นที่เซลล์

2.2 จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter electrode) ประกอบโดยให้บริเวณที่เคลือบแพลทินัมตรงกับช่องของบล็อกพาราฟิล์ม

2.3 จากนั้นนำเซลล์ที่ประกอบแล้วไปวางบนเครื่อง Hot Plate ที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตั้งเกิดการละลายของพาราฟิล์ม ใช้คีมคีบตะตะเพื่อให้ขั้วทั้งสองผนึกกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จะถือว่าผิดกฎหมาย การคัดลอกเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จะถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จะถือว่าผิดกฎหมาย

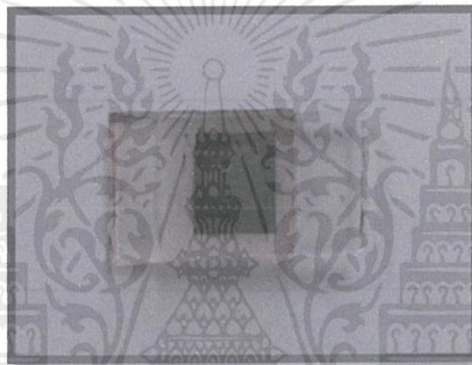
2.4 จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เข็มฉีดยาเข้าไปตรงรูข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปแทนที่อากาศภายในเซลล์



(a)

(b)

รูปที่ 3.8 (a) ตำแหน่งการวางขั้วออกพาราฟิล์ม , (b) การประกบเซลล์ DSSCs



รูปที่ 3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)

2.5 หลังจากนั้นปิดรูสำหรับเติมสารด้วยสก็อตเทปเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เราก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) ที่เสร็จสมบูรณ์สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



(a)

(b)

รูปที่ 3.10 (a) การฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ , (b) ปิดรูด้วยสก็อตเทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากเรานำไปใช้

3.1.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

1. ส่วนประกอบของสารละลาย KOH

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (MW 56.11 g/mol)
- น้ำปลอดประจุ (Deionized Water) (MW 18.02 g/mol)

2. วิธีการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 mM

2.1 เตรียมปริมาณสาร

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จำนวน 0.02244 g
- น้ำปลอดประจุ (Deionized Water) ปริมาตร 200 ml

2.2 นำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เทใส่บีกเกอร์ จากนั้นเทน้ำปลอดประจุ

(DI)

ทั้งหมดลงไปปิดฝาให้แน่นสนิท

2.3 นำไปผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner ให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำปลอดประจุจนกลายเป็นสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)



(a)



(b)

รูปที่ 3.11 (a) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) , (b) สารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 mM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติภายในของเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์

3.2.1 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

(Solar Simulator) ของ DSSCs

ในการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง (DSSCs) ภายใต้ค่าความเข้มรังสีของแสงที่ Air Mass, AM = 1.5 ซึ่งเทียบได้กับกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ Wm}^{-2}$ หรือ 100 mW cm^{-2}

3.2.1.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของ DSSCs

ค่ามาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ นิยามจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก (P_{max}) ต่อกำลังของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{in}) คูณด้วย 100 %

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

เมื่อ J_{max} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด

V_{max} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

การคำนวณค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor , FF)

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

เมื่อ J_{sc} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรมืด

V_{oc} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด

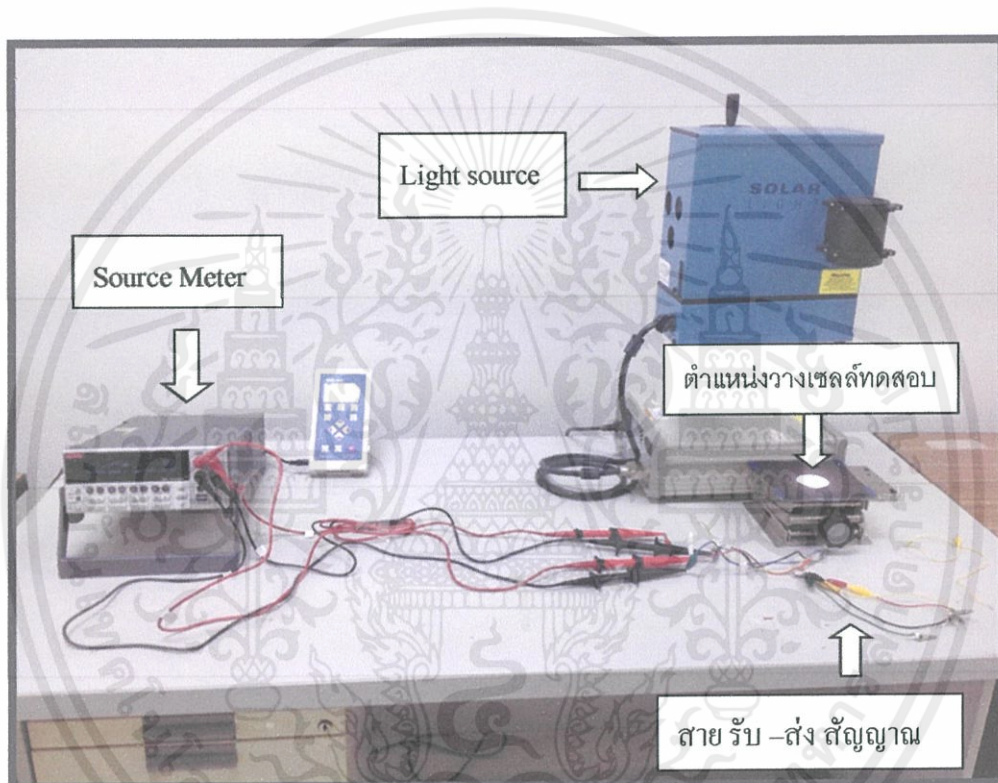
ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงสามารถหาได้อีกแนวทางหนึ่ง ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนชีวมวลและพลังงานทดแทนเพื่อชุมชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.1.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSCs อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ

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



รูปที่ 3.12 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSCs

3.2.1.3 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์

1. จัดอุปกรณ์สำหรับวัดประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.12
2. เปิดแหล่งกำเนิดแสง ตั้งค่า Lamp Output ต่ำสุด ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. เปิดโปรแกรม Pecell IV Curve Analyzer
4. นำ Silicon Reference cell ทดสอบประสิทธิภาพความเข้มของแสง ให้มีกำลัง

ของแสงอยู่ที่ 100 mWcm^{-2}

5. นำ DSSCs ที่เตรียมไว้ไปวัดค่าประสิทธิภาพ โดยหนีบสายส่งสัญญาณกับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ของเซลล์ (ขั้วบวกหนีบกับขั้วแคโทดอร์: ขั้วบวกหนีบกับขั้วเวิร์คกิ้ง)

6. นำ DSSCs ไปวางตรงกลางของแสงที่ได้ปรับค่าไว้

7. บันทึกผลการวัดค่าประสิทธิภาพ โดยใช้โปรแกรม PeccellIV Curve Analyzer

2.1 (ดูได้จากภาคผนวก)

3.2.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง N719 (Dye adsorption)

3.2.2.1 การคำนวณค่า Dye adsorption

ในการวัดค่า Dye adsorption ของสีย้อมไวแสง ผู้วิจัยจะใช้ความสัมพันธ์ตามหลักการของ Beer-Lambert Law หรือเรียกว่า Beer's law ซึ่งจะทำการวัดค่า I_0 ซึ่งคือค่าความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากคิวเวทท์ที่บรรจุด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากนั้นวัดค่า I ซึ่งคือค่าความเข้มแสงที่เข้าสู่คิวเวทท์ที่บรรจุด้วยโมเลกุลของสีย้อมไวแสง (Dye) ซึ่งละลายอยู่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$A = \log(I_0/I) \quad (3.4)$$

Beer-Lambert Law หรือเรียกว่า Beer's law

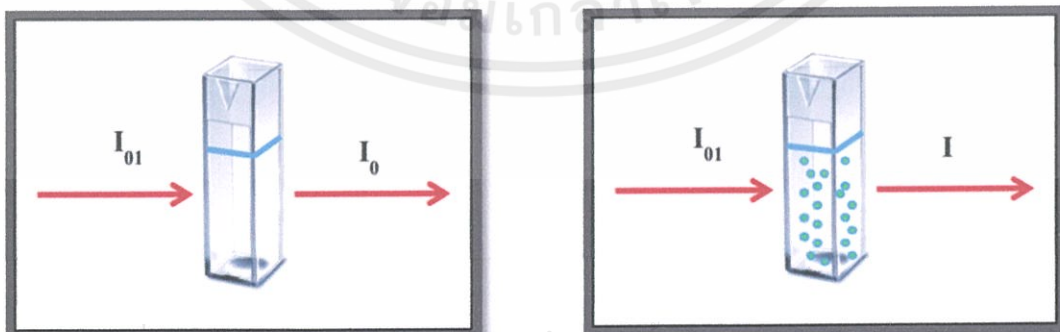
$$A = \epsilon lc \quad (3.5)$$

เมื่อ A = absorbance

ϵ = absorptivity หรือการดูดกลืนแสงของสารละลาย

l = ระยะทางที่แสงผ่าน (light path length)

c = ความเข้มข้น (concentration)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

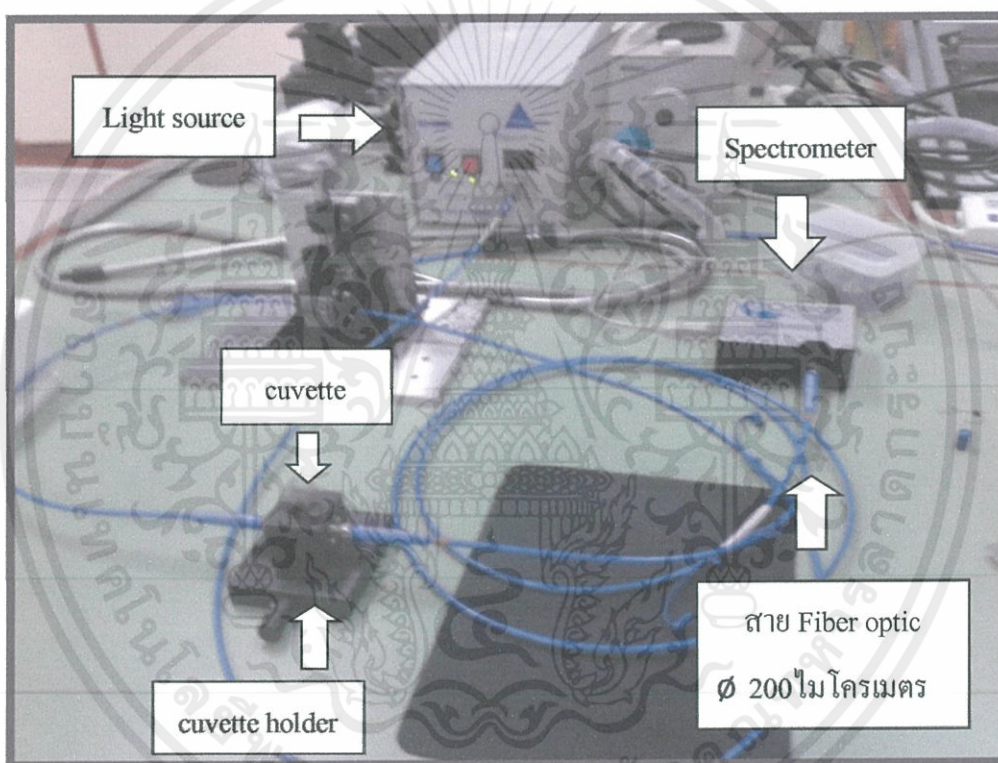
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 (a) การวัดการดูดกลืนของสารละลาย KOH , (b) การวัดค่า (Dye de-adsorption)

3.2.2.2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye adsorption

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า Dye adsorption

1. แหล่งกำเนิดแสง(UV-VIS-NIR LIGHTSOURCE รุ่น DH-2000)
2. สาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร
3. คิวเวทท์
4. แท่นจับยึดคิวเวทท์ (cuvette holder)
5. Ocean Optics Spectrometer รุ่นUSB4H04940



รูปที่ 3.14 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่า Dye de-adsorption

ซึ่งการจัดอุปกรณ์การวัด Dye adsorption สามารถทำได้ดังรูปที่ 3.14 โดยต่อแหล่งกำเนิดแสง (Light source) กับ แท่นจับยึดคิวเวทท์ (cuvette holder) ผ่านสาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร จากนั้นต่อ Ocean Optics Spectrometer กับ แท่นจับยึดคิวเวทท์ (cuvette holder) ผ่านสาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร ตามหลักการนี้เมื่อทำการวัดค่าการดูดซับสีของสารที่ติดอยู่บนพื้นผิวของวัสดุที่ดูดซับแล้วใช้วิธีแยกสีโดยการล้างไม่ว่ากรณีใดก็ตามเครื่อง Spectrometer จะทำการส่งข้อมูลที่วัดผ่านสาย USB เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.2.3 ขั้นตอนการวัดค่า Dye adsorption

1. จัดอุปกรณ์และเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เพื่อวัด Dye adsorption ดังรูปที่ 3.14
2. เปิดโปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite
3. นำสารละลาย KOH ปริมาณ 2ml ใส่คิวเวทท์ (cuvette) ที่วางอยู่บนแท่นจับยึดคิวเวทท์ (cuvette holder)
4. เปิดแหล่งกำเนิดแสง
5. บันทึกค่า absorbance ของสารละลาย KOH โดยใช้โปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite
6. นำสารละลาย KOH ที่มีโมเลกุลของสีย้อมไวแสงผสมอยู่ ปริมาณ 2 ml ใส่คิวเวทท์
7. วัดค่าการดูดกลืนแสงของ N719 โดยใช้โปรแกรม Ocean Optics SpectraSuite
8. คำนวณหาปริมาณสีย้อม (ดูได้จากภาคผนวก)

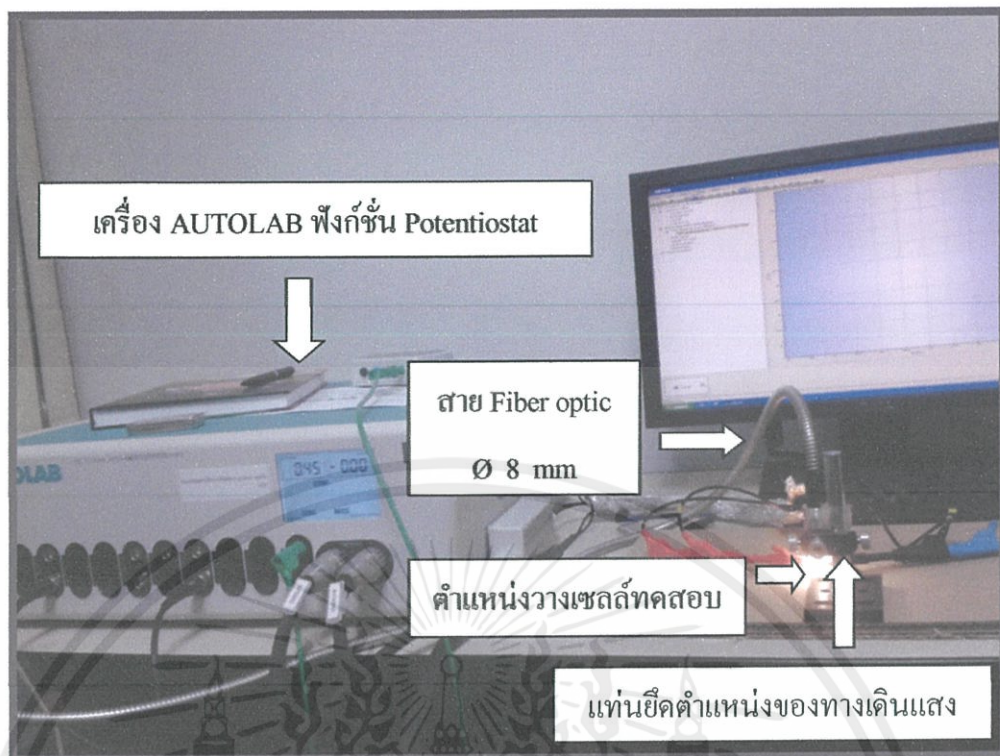
3.2.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง (DSSCs)

ในการวัดความต้านทานเชิงซ้อนภายในของ DSSCs ผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง Electrochemical Impedance Spectroscopy (Metrohm Autolab PGSTAT302N) ซึ่งสามารถส่งค่าออกมาผ่านโปรแกรม NOVA Diagnostics 1.6

3.2.3.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน

1. เครื่อง AUTOLAB ฟังก์ชัน Potentiostat
2. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) (PHILIPS TYPE 6423 OR)
3. สาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm
4. แท่นยึดตำแหน่งของทางเดินแสง
5. หัวคีบขั้วไฟฟ้าของ DSSCs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดความต้านทานเชิงซ้อน

ซึ่งการจัดอุปกรณ์การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของ DSSCs สามารถกระทำได้ตามรูปที่ 3.15 โดยต่อแหล่งกำเนิดแสง (Light source) เข้ากับแท่นยึดตำแหน่งของทางเดินแสงผ่านสาย Fiber optic ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm เครื่อง Electrochemical Impedance Spectroscopy จะทำการส่งข้อมูลที่วัดผ่านสาย USB เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.3.2 ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของ DSSCs

1. เปิดเครื่อง Electrochemical Impedance Spectroscopy
2. เปิดโปรแกรม NOVA Diagnostics 1.6 พร้อมตั้งค่าเริ่มต้นที่ต้องการวัดดังนี้
 - First frequency scan ที่ 1 MHz
 - Last frequency scan ที่ 0.1 Hz
 - Amplitude ที่ 10 mV
 - Number scan ที่ 50 points

3. นำปากคีมหนีบขั้วของ DSSCs โดยขั้วบวกต่อกับขั้วแคโทด และขั้วลบต่อกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ขั้วเวิร์คกิ้ง

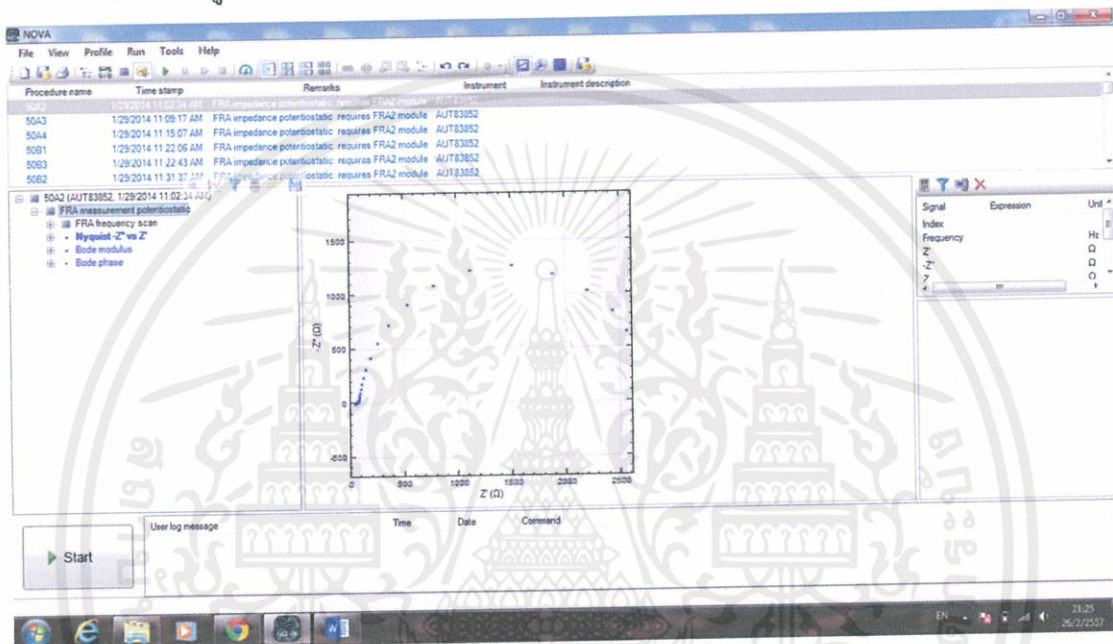
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วาง DSSCs ตรงกลางแสง (1000 W/m^2)

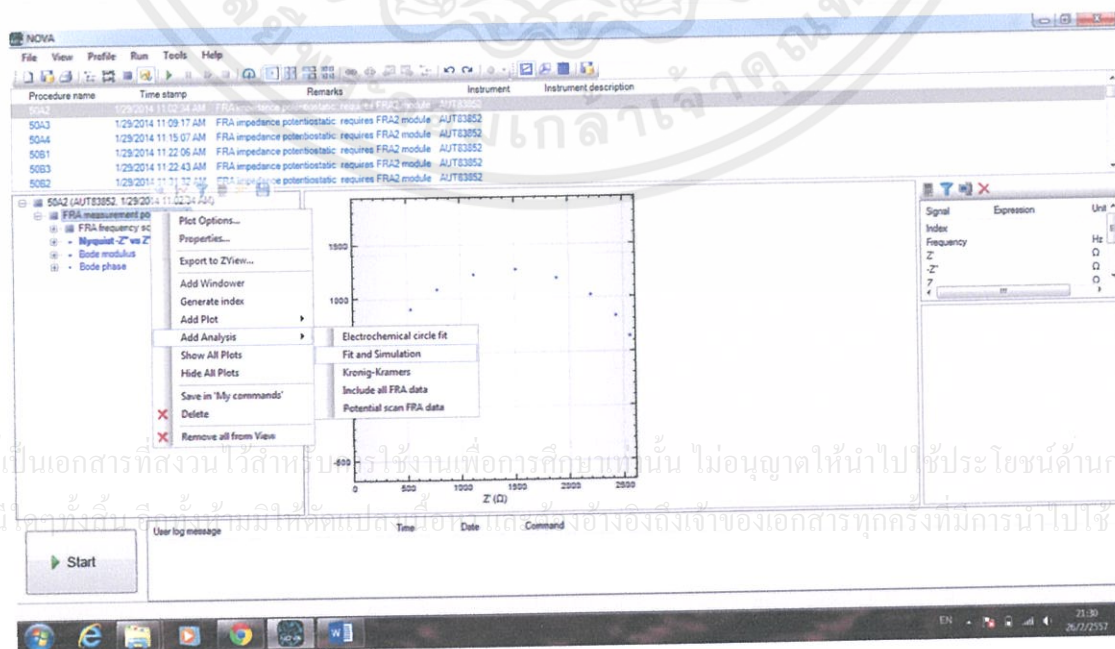
5. วัดและวิเคราะห์หาค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์ โดยใช้โปรแกรม NOVA Diagnostics 1.8 (ดูได้จาก ภาคผนวก)

3.2.3.3 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมลิ่วแสงซึ่งค้อออกไซด์ โดยใช้วงจรสมมูลจากโปรแกรม NOVA 1.8 ดังต่อไปนี้

1. เปิดข้อมูลของเซลล์ที่ต้องการจะวิเคราะห์บนโปรแกรม NOVA 1.8

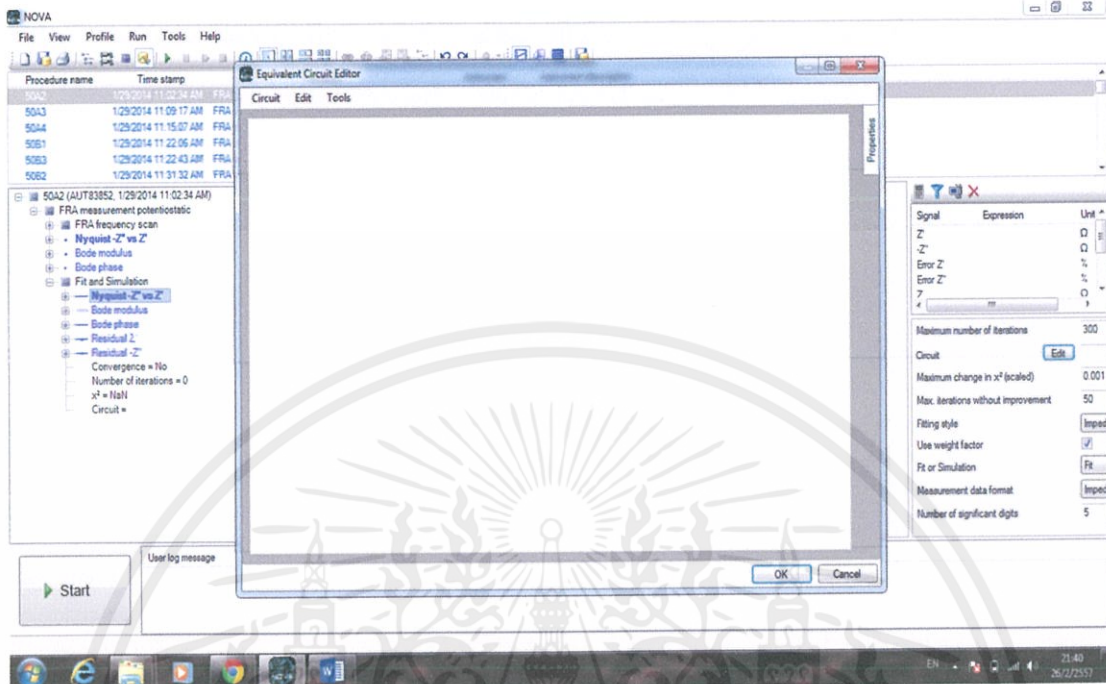


2. คลิกขวาที่ FRA measurement potentiostatic เลือก Add Analysis เลือก Fit and Simulation

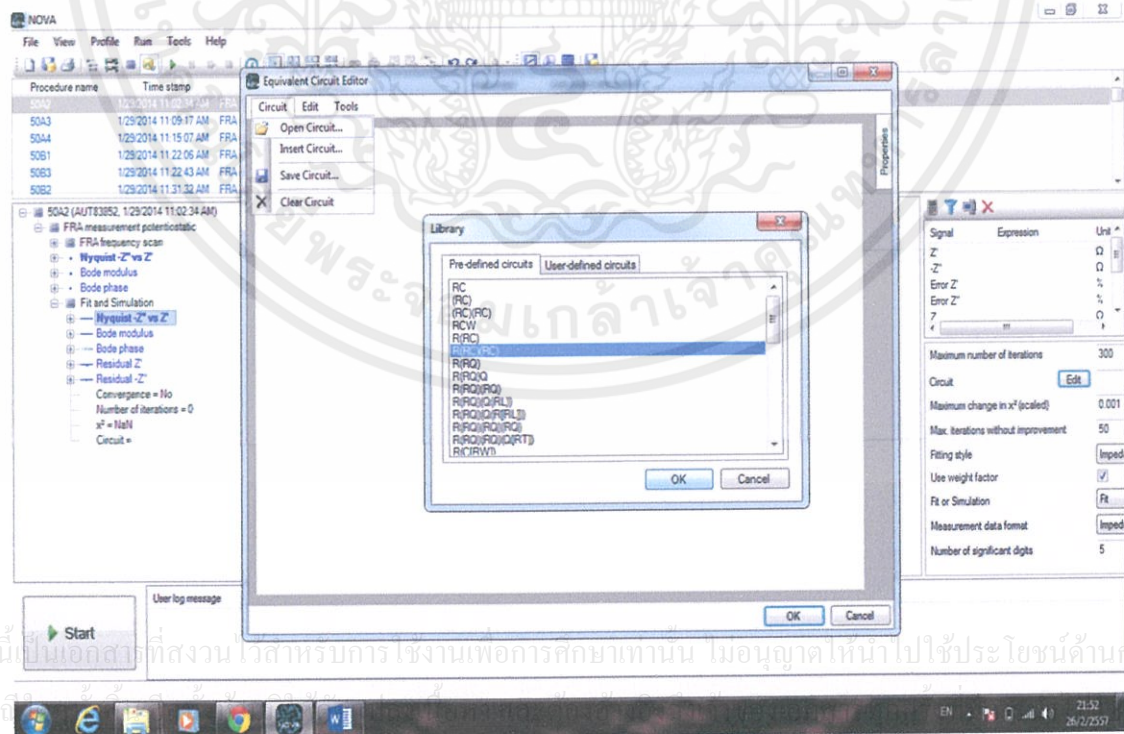


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คัดแปะชื่อเอกสารอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คลื่นที่ Nyquist $-Z'$ vs Z' กดปุ่ม Ctrl(control) ค้างไว้แล้วคลิกที่ Nyquist $-Z'$ vs Z' ที่แสดงอยู่ด้านล่าง เลือก Edit เพื่อต้องการสร้างวงจรสมมูล

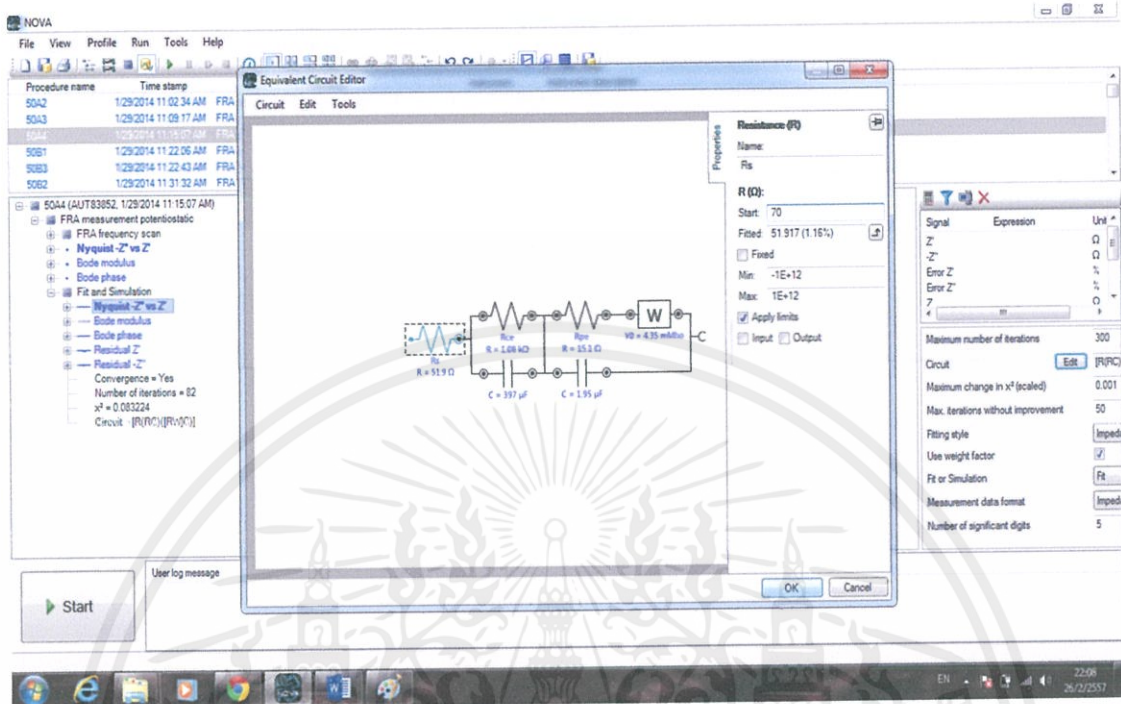


4. สร้างวงจรสมมูลโดยคลิกที่ Circuit เลือก open circuit จากนั้นให้เลือกลักษณะของวงจรสมมูลที่เหมาะสมกับเซลล์ที่ต้องการวิเคราะห์ กด OK

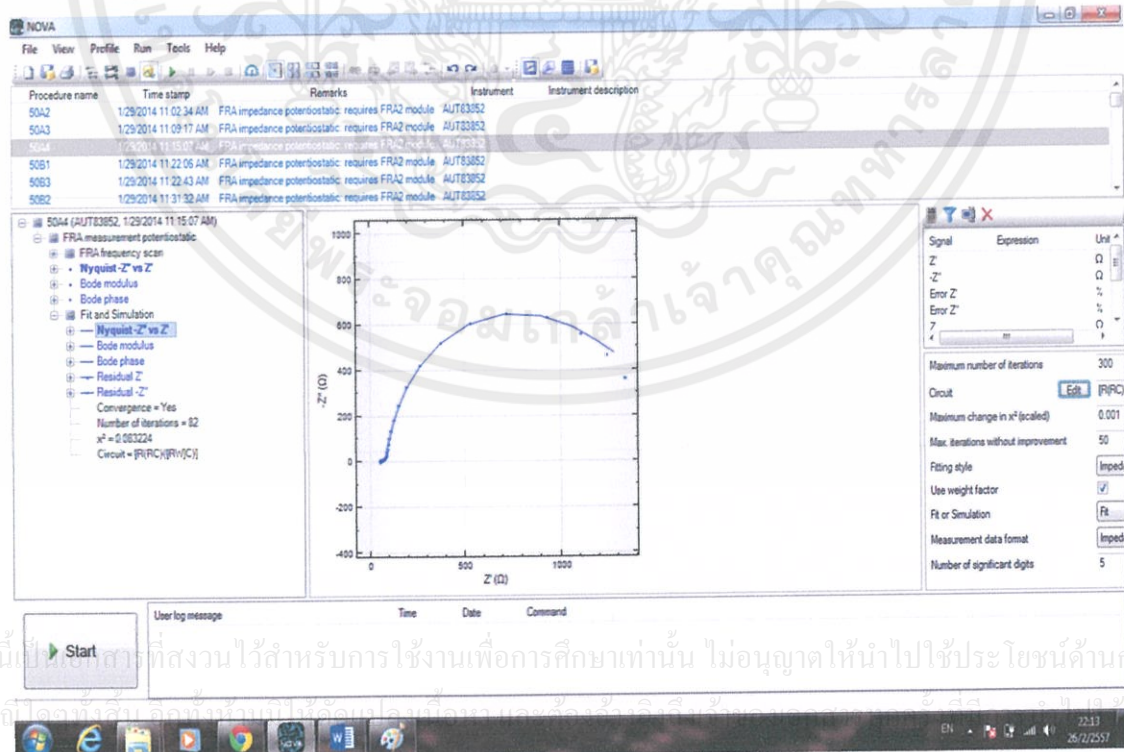


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

5. วงจรสมมูลจะปรากฏบนหน้าโปรแกรม จากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยคลิกที่ตัวอุปกรณ์เลือก Properties กำหนดค่าเริ่มต้น แล้วกด OK



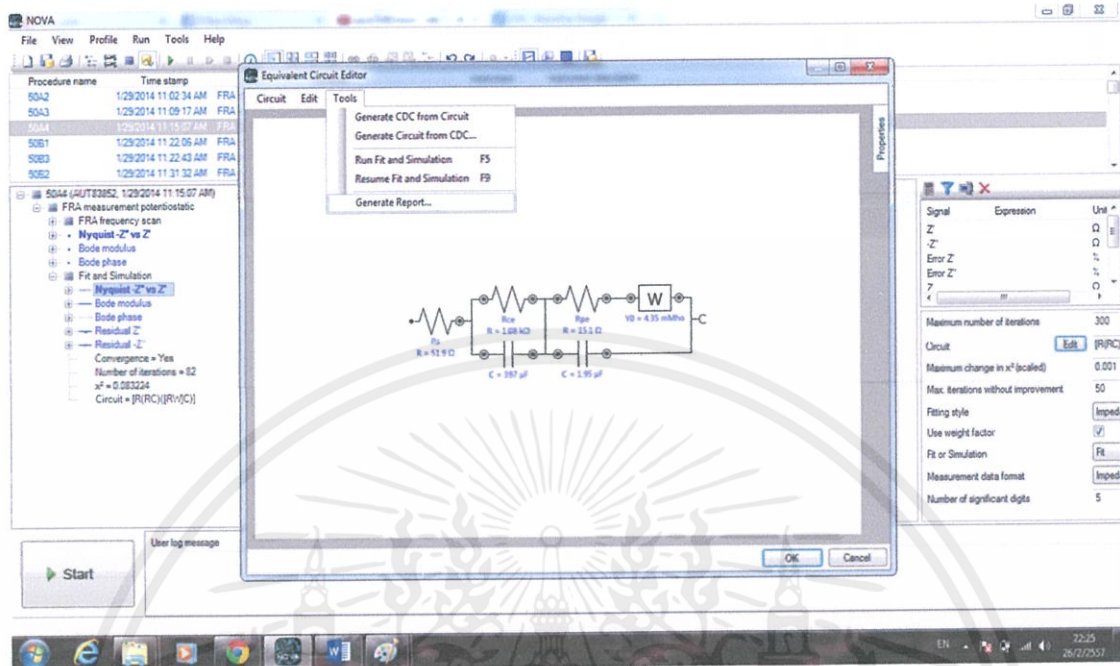
6. กราฟ Nyquist plot ของค่าพารามิเตอร์ของเซลล์จะถูก fit curve โดยเส้นโค้งที่เกิดจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของวงจรสมมูลในข้างต้น



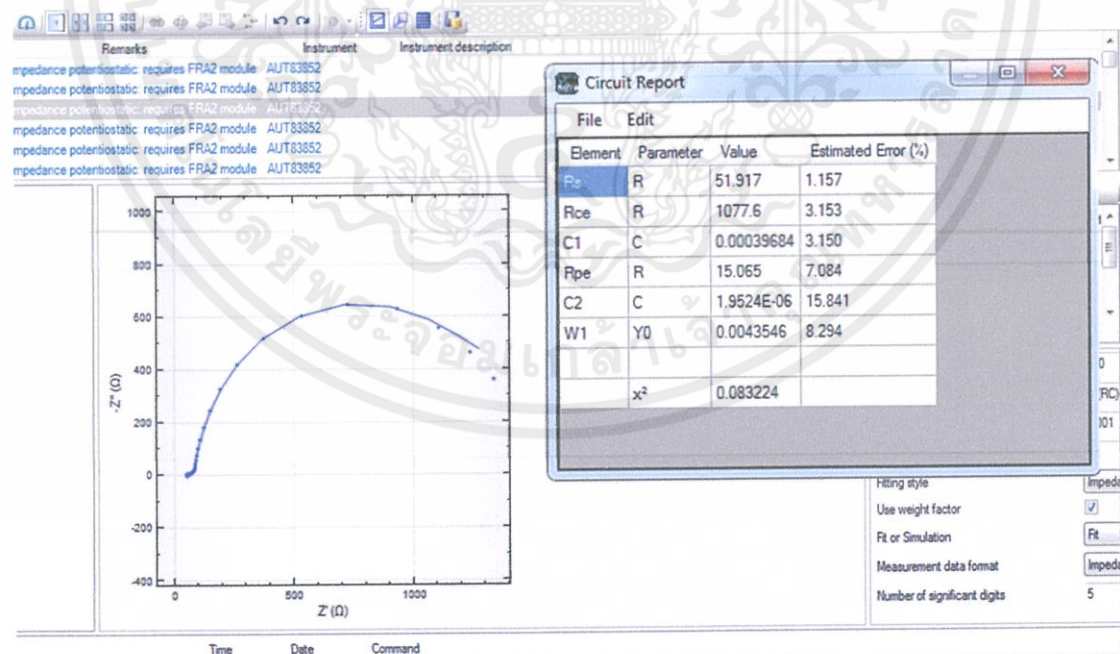
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏบนเอกสารฉบับนี้

7. จากนั้นวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ fit curve จากวงจรสมมูล โดยเลือก

Edit เลือก Tools และเลือก Generate Report...



8. ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในวงจรสมมูลที่เลือกใช้ก็จะแสดงออกมาพร้อมค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย



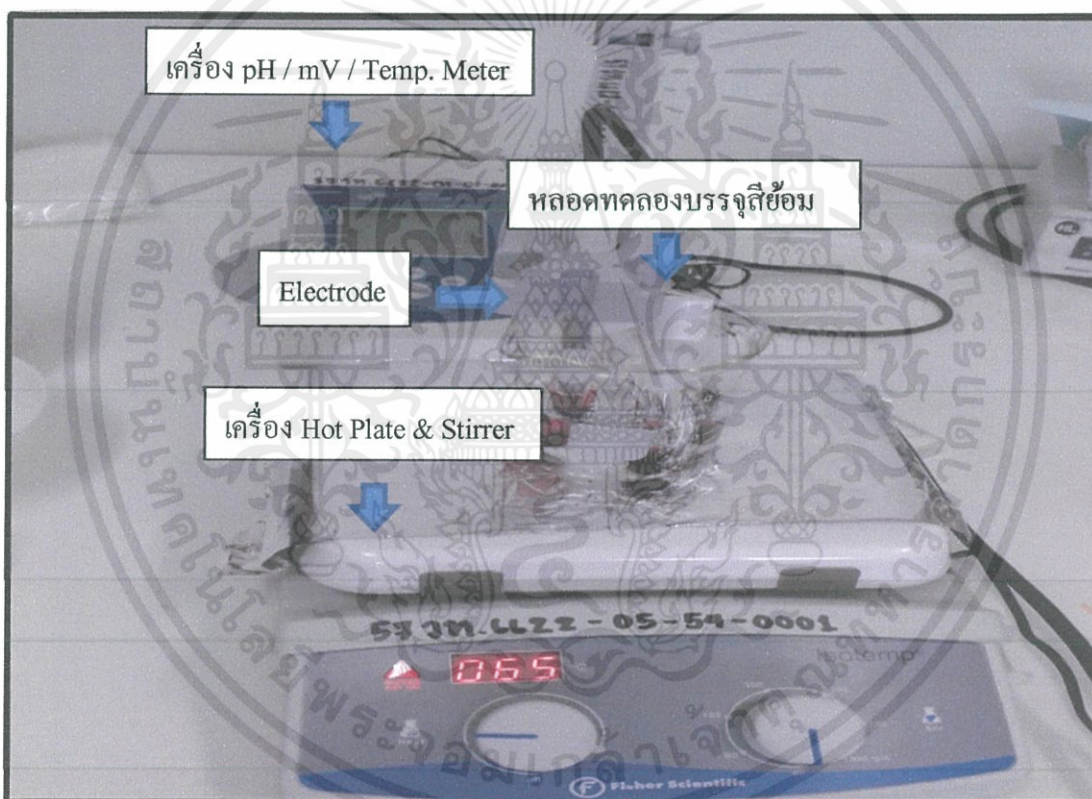
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 กระบวนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายสี้อมไวแสง N719

เนื่องจากสารละลายสี้อมไวแสง N719 มีตัวทำละลาย คือเอทานอล ซึ่งเอทานอลมีค่าความเป็นกรด-เบส ขึ้นกับอุณหภูมิที่กระตุ้น ผู้วิจัยจึงทำการวัดค่าความเป็นกรด-เบส ของสี้อมไวแสง N719 ด้วยเครื่อง pH / mV / Temp. Meter (Model UB-10) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส

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



รูปที่ 3.16 แสดงการจัดตำแหน่งในการวัดค่าความเป็นกรด-เบส

3.2.4.2 ขั้นตอนการวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

1. การ Standardize (การปรับเทียบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน) เครื่องก่อน

ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

- 1.1 กดปุ่ม setup เพื่อเลือกชุดบัฟเฟอร์ที่ต้องการใช้งาน แล้วกด enter เพื่อยืนยัน
- 1.2 นำ Electrode จุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ กด Standardize เพื่อ Standardize

1.3 เมื่อ Standardize เรียบร้อย หน้าจอจะแสดงค่า % Slope

1.4 ตั้ง Electrode ด้วยน้ำกลั่น ชั้บให้แห้ง ทำการ Standardize ด้วยสารละลาย บัฟเฟอร์ตัวถัดไป

2. การวัดค่าความเป็นกรด-เบส

2.1 จุ่ม Electrode ลงในสารละลายสีชมพูไวแสง N719 รอจน

S

สีสัญลักษณ์

ปรากฏบนหน้าจอแล้วอ่านค่าที่ได้

2.2 ตั้ง Electrode ด้วยน้ำกลั่น ตั้งให้แห้งแล้วทำการวัดสารละลายสีชมพูไวแสง N719 ที่อุณหภูมิถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทที่ 4 นี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) โดยศึกษาผลการทดสอบค่าการดูดซับ (Adsorption) ของสีย้อมไวแสง N719 บนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Absorption) ของสารละลายสีย้อม รวมถึงจะศึกษาผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs ด้วยเทคนิค J-V Characterization และศึกษาผลการทดสอบสมบัติภายในของ DSSCs ด้วยเทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy) ซึ่งผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะถูกแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 และ 50 °C

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซิงค์ออกไซด์ โดยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่ระยะเวลาการจุ่มต่างๆ เพื่อคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อม N719 ที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์

การคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อม N719 ที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่า Absorbance จาก Beer-Lambert Law ดังสมการที่ 4.1

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

โดยค่าความยาวคลื่นที่ 515 นาโนเมตร ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (Molar absorptivity, ϵ) ของสีย้อม N719 มีค่าเท่ากับ $1.41 \times 10^4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ จึงสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (c) ได้ และนำค่าความเข้มข้นของสารละลายมาคำนวณหาจำนวนโมลของสีย้อมที่เกาะอยู่บนซิงค์ออกไซด์ที่มีพื้นที่ 0.49 ตารางเซนติเมตร และ 1 ตารางเซนติเมตร ได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$n(0.49 \text{ cm}^2) = cv/1000 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลอันเป็นลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้

$$n(1 \text{ cm}^2) = [n(0.49 \text{ cm}^2)/0.49 \text{ cm}^2] \times 1 \text{ cm}^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ n = จำนวนโมล

c = ความเข้มข้นของสารละลาย

v = ปริมาตรของสารละลาย

ผลของการคำนวณจำนวน โมลของสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C และ 50 °C แสดงไว้ในตารางที่

4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

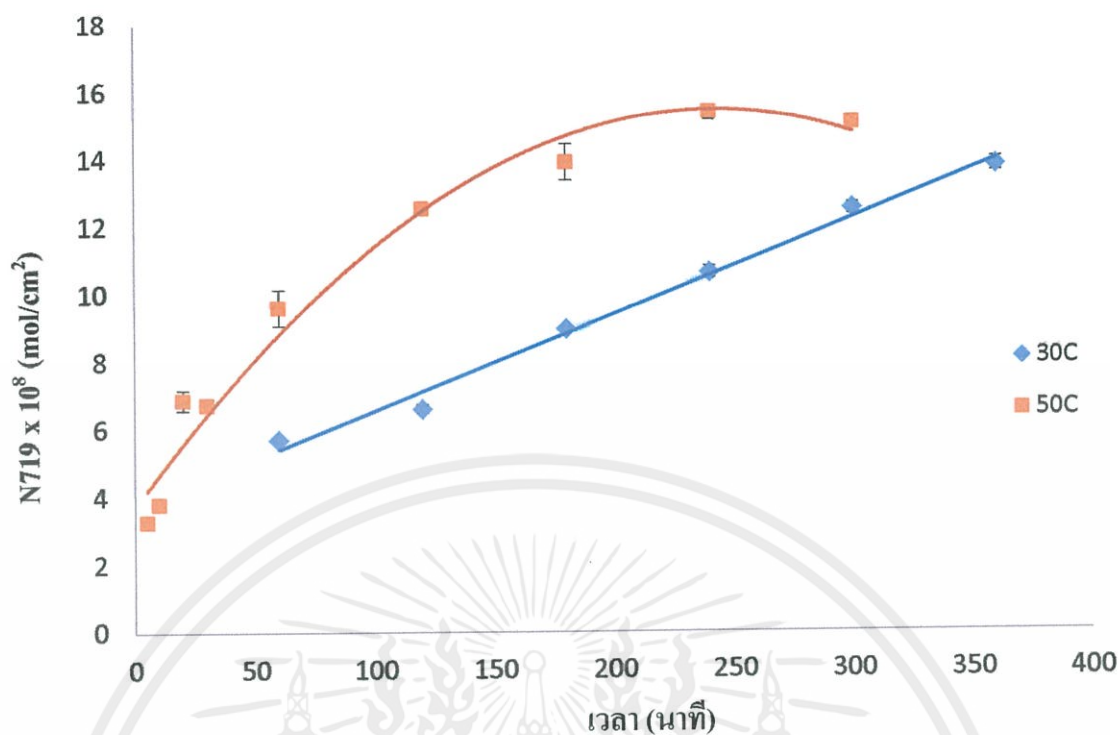
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C

เวลา (นาที)	N719 x 10 ⁸ (mol/cm ²)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าความคลาด เคลื่อน
30	3.956	0.208	0.069
60	5.701	0.398	0.133
120	6.602	0.187	0.062
180	8.950	0.546	0.182
240	10.614	0.519	0.173
300	12.488	0.624	0.208
360	13.758	0.795	0.265

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 50 °C

เวลา(นาที)	N719 x 10 ⁸ (mol/cm ²)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าความคลาด เคลื่อน
5	3.273	0.315	0.105
10	3.803	0.214	0.071
20	6.867	0.910	0.303
30	6.738	0.576	0.192
60	9.601	1.617	0.539
120	12.520	0.434	0.145
180	13.887	1.623	0.541
240	15.342	0.677	0.226
300	15.021	0.602	0.201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน โมลของสีย้อม N719 กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719

อุณหภูมิสีย้อม (°C)	ค่า pH			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
30	6.85	6.89	6.95	6.90
50	6.72	6.70	6.75	6.72
70	6.57	6.55	6.56	6.56

ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่าความหนืด (Viscosity) ของเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ [13]

อุณหภูมิ (°C)	Viscosity (Pa • s)
0	1.77×10^{-3}
20	1.20×10^{-3}
40	8.34×10^{-4}
60	5.92×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... ช่วงเพื่อการศึกษเท่านั้น... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... และต้องอ้างอิงถึง... แหล่งข้อมูลทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C และรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน โมลของสีย้อม N719 กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม ซึ่งแสดงค่าปริมาณของสีย้อม N719 ต่อตารางเซนติเมตร กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 พบว่า ปริมาณของสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 50 °C และรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน โมลของสีย้อม N719 กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม พบว่าปริมาณของสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าอุณหภูมิ 30 °C แต่ปริมาณของสีย้อมจะเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อม 240 นาที เป็นต้นไป แสดงให้เห็นว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง ด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 และ 50 °C มีผลต่อปริมาณของสีย้อม กล่าวคือที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมเท่ากันเซลล์ที่เตรียมที่อุณหภูมิ 30 °C มีปริมาณของสีย้อมน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งเราสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากผลค่าความหนืดของสีย้อม และค่า pH ของสีย้อม กล่าวคือ จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนืดของเอทานอล พบว่า ความหนืดของเอทานอลที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าต่ำกว่าที่ 30 °C จึงมีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 50 °C สามารถซึมผ่านไปยังซิงค์ออกไซด์ได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C และจาก ตารางแสดงค่า pH ของสีย้อม N719 พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความเป็นกรดที่สูงกว่าที่ อุณหภูมิ 30 °C ดังตารางที่ 4.3 จึงมีผลทำให้อนุภาคของซิงค์ออกไซด์บางส่วนละลายออก ทำให้ขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เล็กลง หรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้โมเลกุลของสีย้อมเกาะกับซิงค์ออกไซด์ ได้มากขึ้น เมื่ออนุภาคของซิงค์ออกไซด์เล็กลงการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคของซิงค์ออกไซด์จะเป็นไปได้ง่ายขึ้น

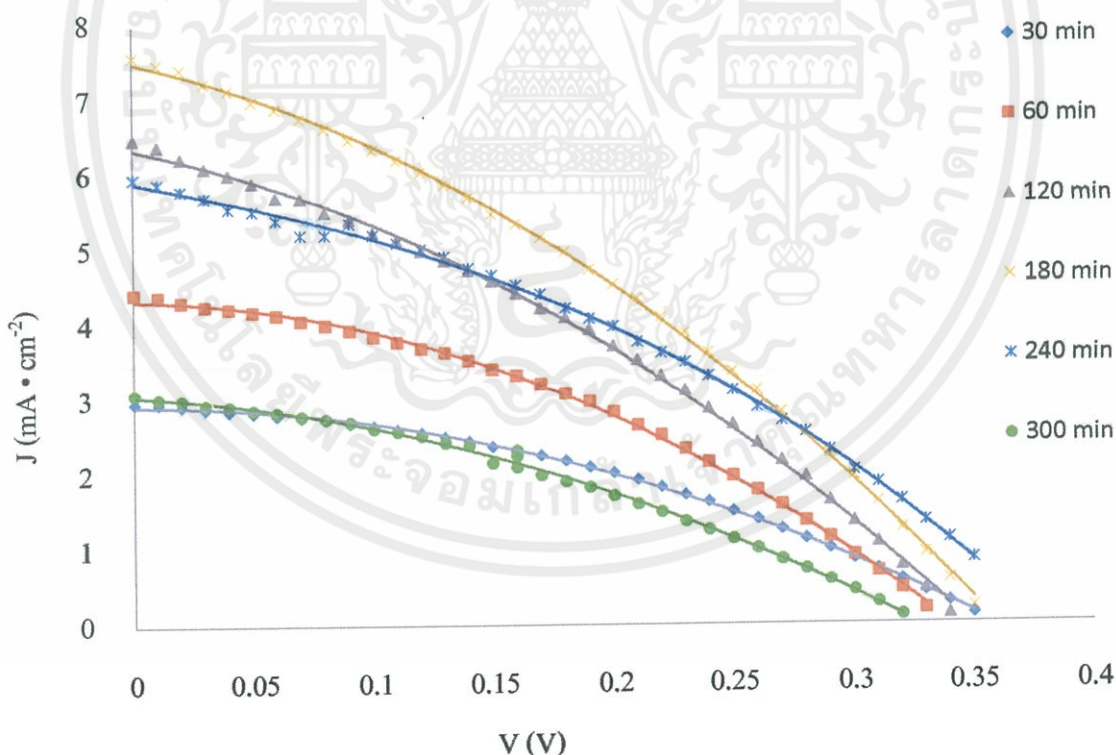
4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs)

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการวัดค่า J-V Characteristics ของเซลล์ เพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในพื้นที่ 0.25 cm² ที่ตอบสนองต่อแสงที่มีความเข้มของแสง 100 mW cm⁻² ผลการทดลองสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSCs นั้น โดยทำการวัดค่า J และ V ของ DSSCs ด้วยเครื่อง solar simulator และค่า J, V, Fill Factor และ Efficiency ที่คำนวณโดยใช้

โปรแกรม Peccell IV Curve Analyzer 2.1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิที่ 30 °C

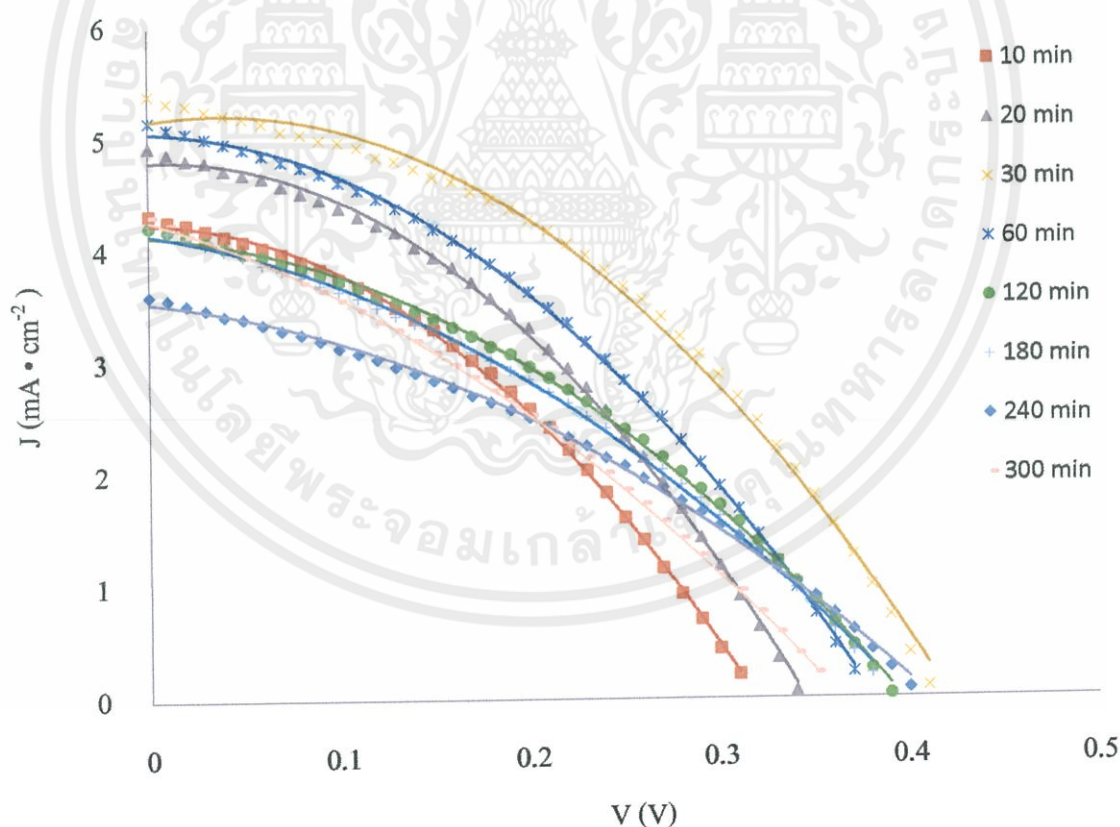
พารามิเตอร์	ระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 (นาที)					
	30	60	120	180	240	300
Jsc (mA cm ⁻²)	2.974	4.690	5.971	7.591	5.973	3.086
Voc (V)	0.358	0.345	0.350	0.355	0.357	0.347
Fill Factor	0.386	0.376	0.369	0.342	0.345	0.360
Efficiency (%)	0.410	0.616	0.715	0.918	0.736	0.387



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่แจ้งประวัติหน่วยงานการค้า
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ซึ่งกระตุ้นสีย้อม
ไม่ว่ากรณีใดที่ส่งอีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
N719 ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 30 °C

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิที่ 50 °C

พารามิเตอร์	ระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 (นาที)								
	5	10	20	30	60	120	180	240	300
Jsc (mA cm ⁻²)	3.503	4.336	4.939	5.407	5.170	4.233	4.247	3.616	3.629
Voc (V)	0.330	0.318	0.342	0.413	0.379	0.392	0.390	0.412	0.360
Fill Factor	0.405	0.380	0.392	0.415	0.379	0.370	0.352	0.353	0.326
Efficiency (%)	0.468	0.525	0.662	0.929	0.741	0.613	0.581	0.524	0.508



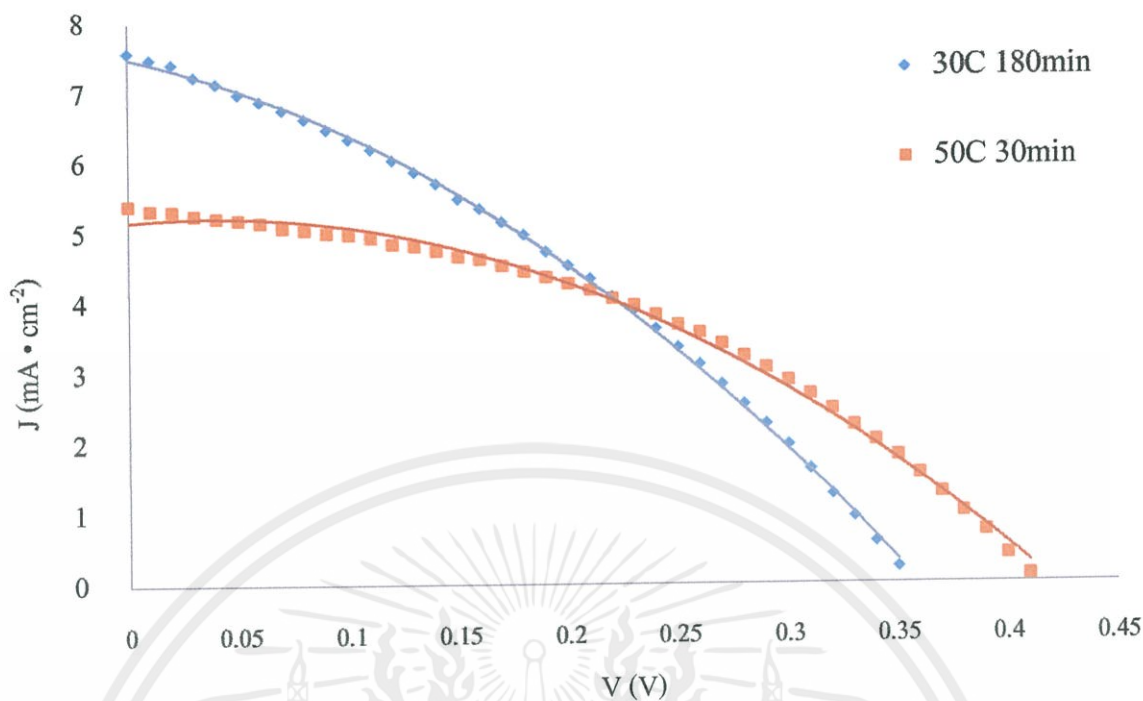
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ซึ่งกระตุ้นสีย้อม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
N719 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ย่อมลิวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิที่ย้อมที่ 30 และ 50 °C ตามลำดับ กลุ่มวิจัยของเราสนใจที่จะศึกษา ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ทั้ง 4 ค่า คือ J_{sc} , V_{oc} , Fill Factor และค่า Efficiency และจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) กับ ความต่างศักย์ (V) จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าสอดคล้องกับค่าความต้านทานหน้าสัมผัสของ ขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (R_{pc}) ที่ได้จากการทดสอบสมบัติภายในของเซลล์จากเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy ดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งผลของค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด กลุ่มวิจัยของ เราจะอธิบายในส่วนต่อไป

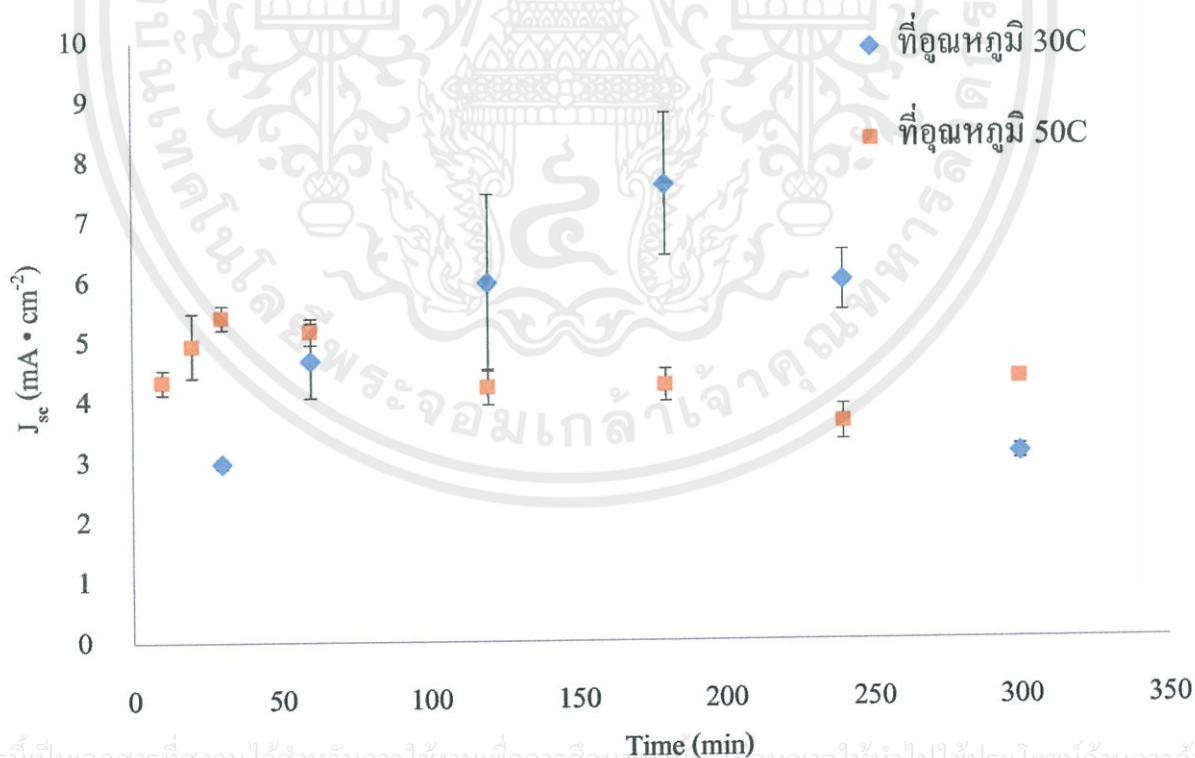
ตารางที่ 4.7 แสดงผลเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของอุณหภูมิที่ย้อม ที่ 30 °C และ 50 °C

Time (min)	อุณหภูมิ (°C)			
	30		50	
	J_{sc} (mA cm ⁻²)	ค่าความคลาด เคลื่อน	J_{sc} (mA cm ⁻²)	ค่าความคลาด เคลื่อน
10	-	-	4.336	0.202
20	-	-	4.939	0.532
30	2.974	0.082	5.407	0.198
60	4.690	0.625	5.170	0.218
120	5.971	1.467	4.233	0.301
180	7.591	1.185	4.247	0.273
240	5.973	0.500	3.616	0.294
300	3.086	0.121	4.327	0.089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ของ DSSCs ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิห้อง 30 °C กับ 50 °C



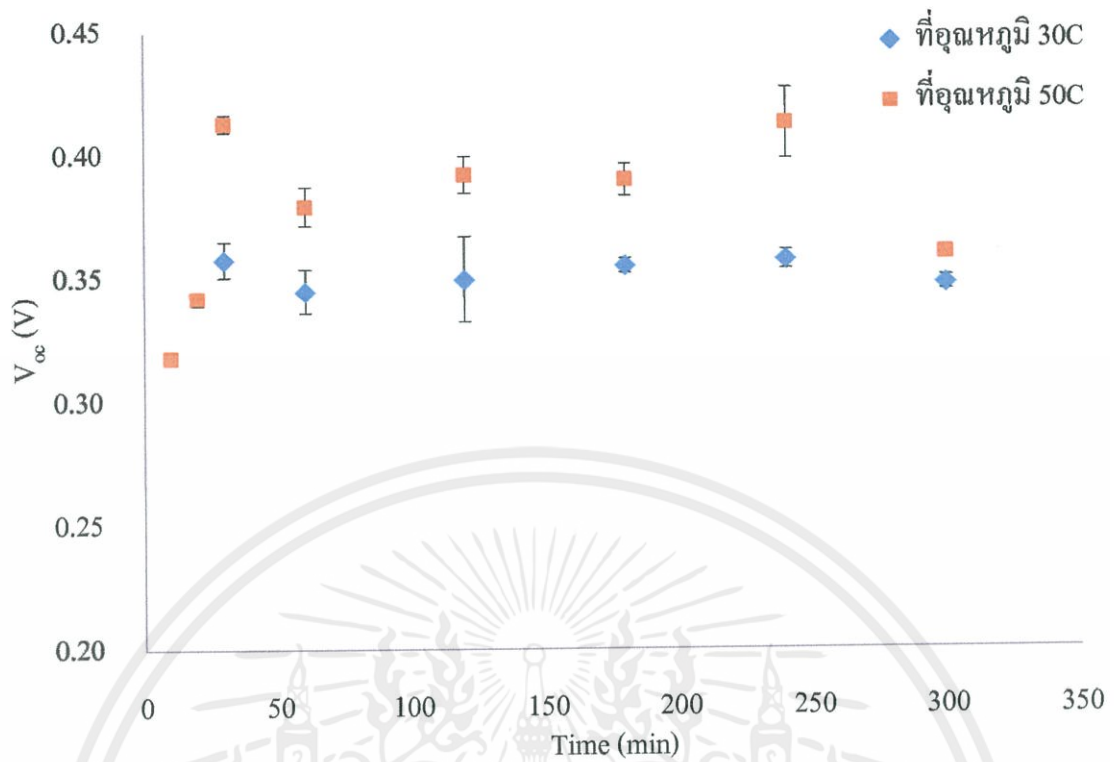
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (J_{sc}) กับเวลาการช้อมสี โดย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตามทางผู้จัดทำไม่รับผิดชอบ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มาไปใช้
เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิห้อง 30 °C กับ 50 °C ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสของอุณหภูมิที่ 30 °C และ 50 °C และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับระยะเวลาการย้อมสี พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C และ อุณหภูมิ 50 °C ในช่วงแรก ค่าความหนาแน่นกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการย้อมสีที่เพิ่มขึ้น จนความหนาแน่นกระแสสูงสุดที่เวลาการย้อมที่ 180 และ 30 นาที ของอุณหภูมิ 30 °C และ อุณหภูมิ 50 °C ตามลำดับ หลังจากนั้นเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลดลงอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายเหตุผลดังกล่าวจากค่าความหนืด (viscosity) ของเอทานอลที่เป็นตัวทำละลายย้อม N719 คือที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าความหนืดของย้อมมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C จึงทำให้ย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C สามารถซึมผ่านชั้นอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ได้มากและเร็วกว่า และผลเนื่องจากความเป็นกรดของย้อม กล่าวคือจากตารางที่ 4.3 พบว่าเอทานอลที่อุณหภูมิ 50 °C มีความเป็นกรดสูงกว่าที่ 30 °C จากความเป็นกรดของเอทานอลจะทำให้ซิงค์ออกไซด์บางส่วนละลายออก การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคของซิงค์ออกไซด์เป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การเตรียมที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความหนาแน่นกระแสสูงค่น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C และจากลักษณะกราฟที่ลดลงในภายหลังเกิดเนื่องจากโมเลกุลของย้อมเกาะทับกันหลายชั้นจึงเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนที่ผลิตได้ให้กับ โมเลกุลย้อมด้วยกันเอง

ตารางที่ 4.8 แสดงผลเปรียบเทียบความต่างศักย์ของกระตุ้นย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C กับ 50 °C

Time (min)	อุณหภูมิ (°C)			
	30		50	
	V_{oc} (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน	V_{oc} (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
10	-	-	0.318	0.002
20	-	-	0.342	0.003
30	0.358	0.007	0.413	0.004
60	0.345	0.009	0.379	0.008
120	0.350	0.017	0.392	0.007
180	0.355	0.003	0.390	0.006
240	0.357	0.004	0.412	0.014
300	0.347	0.003	0.360	0.002

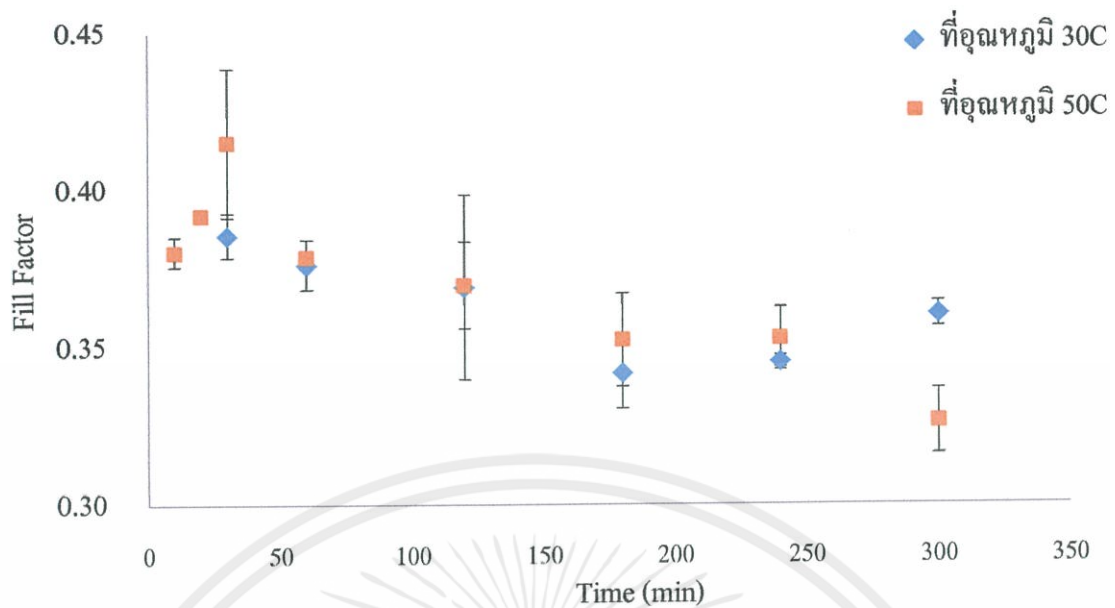
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย และจะดำเนินการตามกฎหมายทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{∞}) กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C และ อุณหภูมิ 50 °C

ตารางที่ 4.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Fill Factor ของกระดุนสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C กับ 50 °C

Time (min)	อุณหภูมิ (°C)			
	30		50	
	Fill Factor	ค่าความคลาดเคลื่อน	Fill Factor	ค่าความคลาดเคลื่อน
10	-	-	0.380	0.005
20	-	-	0.392	0.001
30	0.386	0.007	0.415	0.024
60	0.376	0.008	0.379	0.000
120	0.369	0.029	0.370	0.014
180	0.342	0.011	0.352	0.015
240	0.345	0.002	0.353	0.010
300	0.360	0.004	0.326	0.010



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fill Factor ของ DSSCs กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม ของ อุณหภูมิสีย้อม 30 °C และ 50 °C

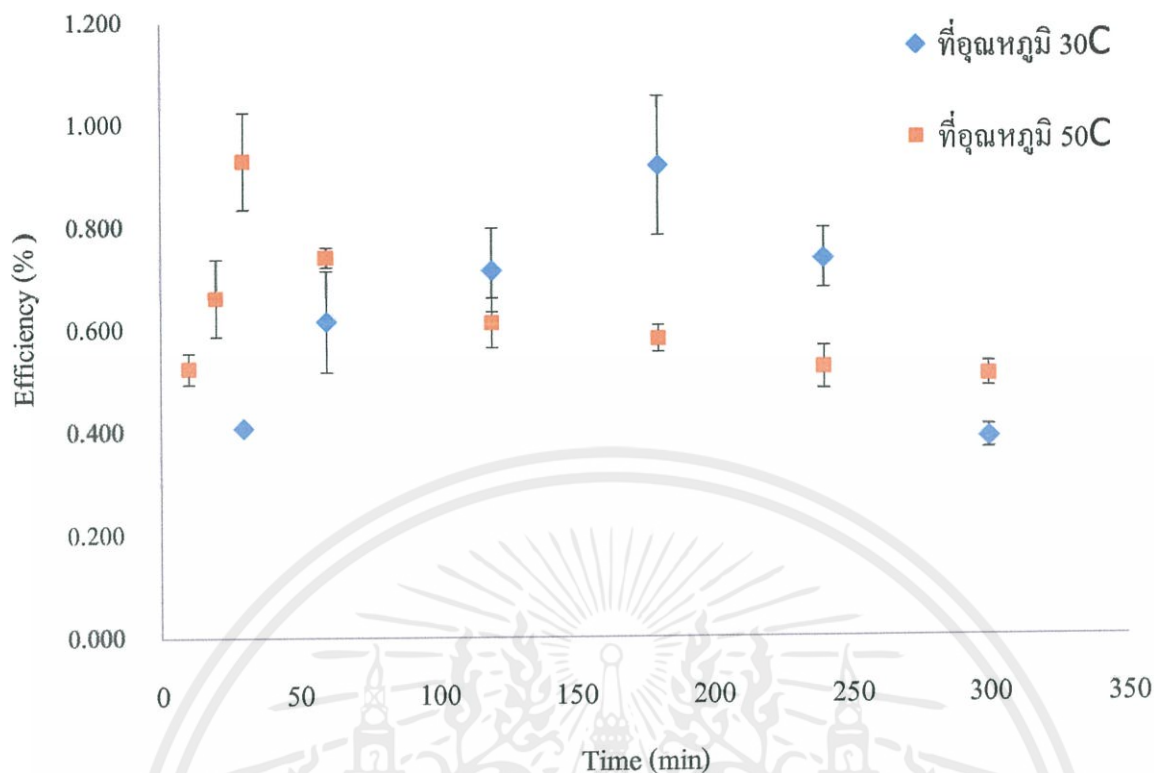
จากตารางที่ 4.8 แสดงผลเปรียบเทียบความต่างศักย์ของกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 °C กับ 50 °C และรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{oc}) กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 °C ค่าความต่างศักย์มีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการย้อมสีที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นในระยะแรก (10-30 นาที) เกิดจากปริมาณสีย้อมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy) สูงขึ้นด้วยความต่างศักย์ของเซลล์ คือ ผลต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิของซิงค์ออกไซด์กับศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ (Redox Potential)

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Fill Factor และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fill Factor กับระยะเวลาการย้อมสี จะแสดงให้เห็นค่า Fill Factor ที่อุณหภูมิ 30 °C และอุณหภูมิ 50 °C โดยช่วงแรกของอุณหภูมิ 30 °C ค่า Fill Factor ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง หลังจากนั้นค่า Fill Factor จะกลับเพิ่มขึ้น เราสามารถอธิบายเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นได้จาก ค่าความหนืดของเอทานอลที่เป็นตัวทำละลายสีย้อม N719 กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 30 °C ค่าความหนืดของเอทานอลสูงส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถซึมผ่านไปยังซิงค์ออกไซด์ชั้นล่างได้ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวว่างของอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ เมื่อหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีค่าความหนืดต่ำกว่าสีย้อมเข้าไปบริเวณพื้นที่เซลล์ มันจะซึมผ่านไปยังซิงค์ออกไซด์ชั้นล่างได้มากกว่า ส่งผลให้ออกาศการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น ค่า Fill Factor จึงลดลง และหลังจากที่ระยะเวลาการย้อมที่เหมาะสมค่าหนึ่งค่า Fill Factor จะเพิ่มขึ้น

อย่างต่อเนื่อง เราสามารถอธิบายเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นได้ดังนี้ เมื่อระยะเวลาการย้อมสีเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมก็สามารถเกาะซิงค์ออกไซด์ได้มากขึ้นและเริ่มเกาะทับกันจนเต็มพื้นที่ เมื่อหยดสารละลาย อิเล็กโตรไลต์เข้าไป โอกาสที่อิเล็กโตรไลต์จะซึมผ่านโมเลกุลของสีย้อมไปยังซิงค์ออกไซด์ก็น้อยลง โอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับอิเล็กโตรไลต์ก็น้อยลง ค่า Fill Factor ก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย้อมสี แต่ในช่วงแรกของอุณหภูมิ 50 °C ค่า Fill Factor เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสูงที่สุดที่ค่าเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่งหลังจากนั้นค่า Fill Factor จะลดลง เราสามารถอธิบายเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นได้ คือในช่วงแรกที่ค่า Fill Factor เพิ่มขึ้น (10-30 นาที) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าความหนืดของเอทานอลต่ำลง โมเลกุลของสีย้อมจึงสามารถซึมผ่านไปยังซิงค์ออกไซด์ได้มากขึ้น และเนื่องจากที่อุณหภูมิ 50 °C เอทานอลมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้นจึงทำให้ซิงค์ออกไซด์บางส่วนละลายออก เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมเข้าไปเกาะผิวอนุภาคชั้นในได้มากขึ้น เมื่อหยดอิเล็กโตรไลต์เข้าไป โอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับอิเล็กโตรไลต์จะน้อยลง ค่า Fill Factor จึงเพิ่มขึ้น และหลังจากช่วงเวลา 30 นาทีค่า Fill Factor จะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นได้ดังนี้ เมื่อระยะเวลาการย้อมสีเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมจะมีโอกาสในการเกาะทับกันมากขึ้น และเมื่อหยดอิเล็กโตรไลต์มันจะไม่สามารถซึมผ่านไปเติมอิเล็กตรอนให้กับ โมเลกุลสีย้อมที่เกาะอยู่กับซิงค์ออกไซด์ชั้นในได้ และยังเพิ่มโอกาสในการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับ โมเลกุลของสีย้อมที่เกาะทับกันมากขึ้นด้วย ค่า Fill Factor จึงลดลง

ตารางที่ 4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Efficiency ของกระดุนสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 กับ 50 °C

Time (min)	อุณหภูมิ (°C)			
	30		50	
	Efficiency (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน	Efficiency (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน
10	-	-	0.525	0.030
20	-	-	0.662	0.075
30	0.410	0.002	0.929	0.095
60	0.616	0.099	0.741	0.019
120	0.715	0.082	0.613	0.048
180	0.918	0.136	0.581	0.026
240	0.736	0.058	0.524	0.042
300	0.387	0.022	0.508	0.024



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Efficiency กับเวลาที่ทำการย้อมสี N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C และ อุณหภูมิ 50 °C

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Efficiency ของกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 กับ 50 °C และรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Efficiency กับเวลาที่ทำการย้อมสี N719 พบว่า เซลล์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของอุณหภูมิ 30 °C (0.918%) ใช้เวลาการย้อมสี 180 นาที และที่ อุณหภูมิ 50 °C (0.929%) ใช้เวลาย้อมสี 30 นาที และจากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Efficiency กับเวลา จะพบว่า มีลักษณะที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานหน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้า เวิร์คกิ้ง (R_{ps}) ดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 ดังที่จะได้อธิบายผลในส่วนต่อไป

4.3 การศึกษาสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ซึ่งกระตุ้นสีย้อมไวแสงให้มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 30 °C และ 50 °C

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ด้วยเทคนิคการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy) เพื่อ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเซลล์

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 °C

Element	Parameter	Value				
		30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	240 นาที
R_s	$R (\Omega)$	51.354	43.406	56.647	55.171	47.654
Estimated Error (%)		1.073	1.568	1.379	1.017	1.828
R_{ce}	$R (\Omega)$	17.569	22.843	22.622	23.258	20.708
Estimated Error (%)		7.058	5.427	7.108	6.066	9.452
R_{pe}	$R (\Omega)$	489.795	531.220	595.833	736.930	496.145
Estimated Error (%)		2.360	3.280	3.298	2.724	4.409
X^2		0.102	0.190	0.176	0.101	0.313

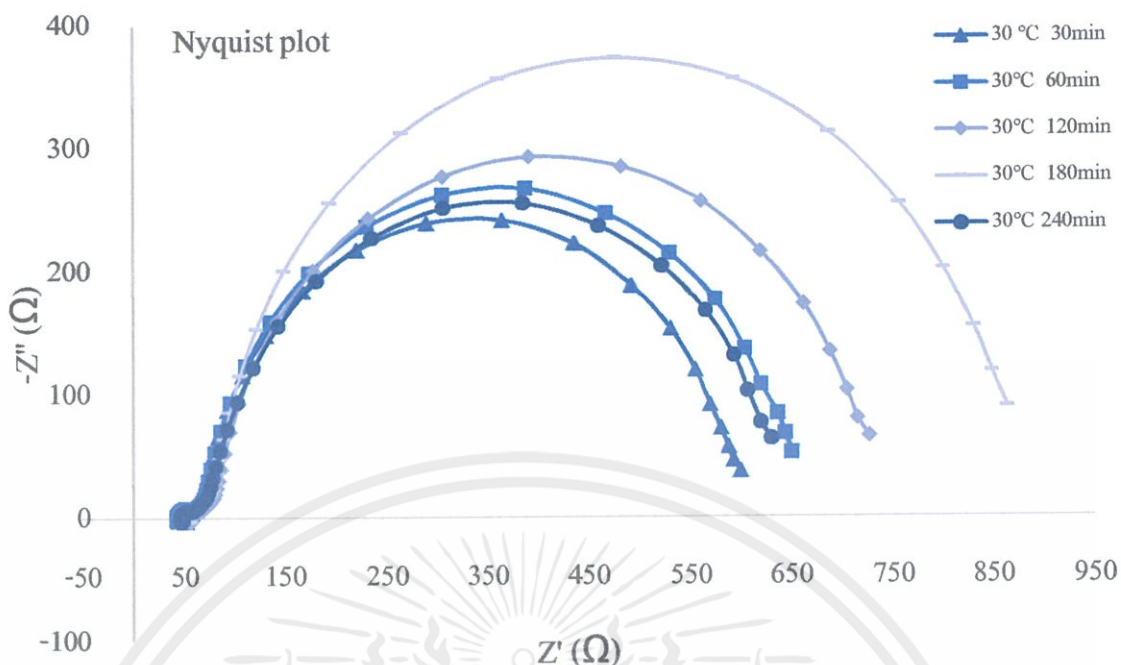
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิที่ 50 °C

Element	Parameter	Value							
		5 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	240 นาที
R_s	$R (\Omega)$	47.660	43.634	49.588	50.065	52.841	54.695	42.322	43.835
Estimated Error (%)		2.436	1.447	1.396	1.610	1.611	1.151	2.100	0.696
R_{ce}	$R (\Omega)$	89.068	32.066	37.467	28.061	21.056	31.562	11.803	13.659
Estimated Error (%)		7.713	7.504	6.779	7.523	8.956	17.038	9.267	18.075
R_{pe}	$R (\Omega)$	1343.950	1431.933	1503.767	2290.400	1885.750	1699.000	1628.500	1528.100
Estimated Error (%)		8.779	4.483	4.513	5.286	5.581	4.392	4.261	2.687
X^2		0.632	0.222	0.213	0.242	0.248	0.162	0.169	0.062

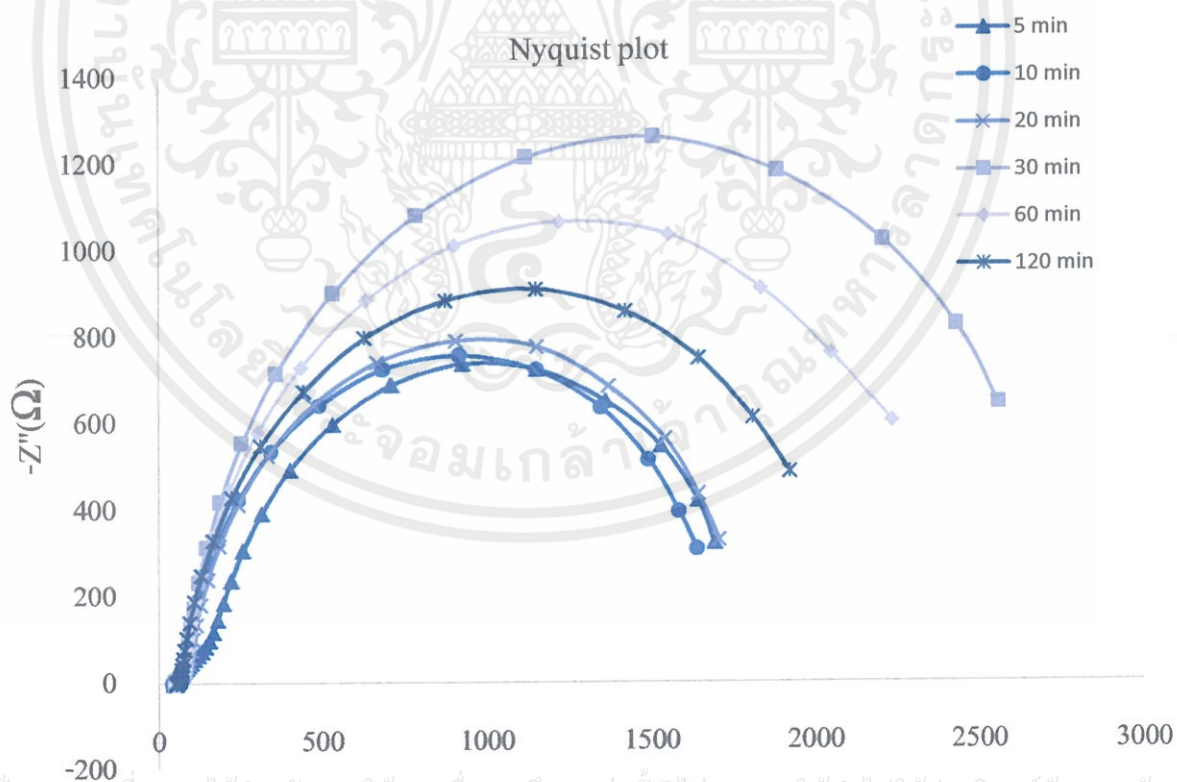
ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิต่ำที่ 30 °C และ 50 °C

Element	Parameter	ค่าเปรียบเทียบ	
		30 °C 180 นาที	50 °C 30 นาที
R_s	$R (\Omega)$	55.171	50.065
Estimated Error (%)		1.017	1.610
R_{ce}	$R (\Omega)$	23.258	28.061
Estimated Error (%)		6.066	7.523
R_{pe}	$R (\Omega)$	736.930	2290.400
Estimated Error (%)		2.724	5.286
X^2		0.102	0.242

จากตารางแสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิต่ำที่ 30 °C และ 50 °C และสีย้อมไวแสงที่ระยะเวลาต่างกัน (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) ซึ่งแสดงค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัสทั้ง 3 ค่า คือ R_s , R_{ce} และ R_{pe} พบว่าค่าพารามิเตอร์ 2 ใน 3 ตัว คือ R_s , R_{ce} มีค่าค่อนข้างคงที่ จะเห็นได้ชัดเจนว่าระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ส่งผลโดยตรงต่อค่า R_{pe} กล่าวคือ เซลล์ที่ผ่านกระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิต่ำที่ 30 °C เมื่อระยะเวลาการจุ่มสีย้อมเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า R_{pe} มีค่าสูงขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่ 180 นาที (739.93 Ω) หลังจากนั้นก็จะมียาลดลง แต่เซลล์ที่เตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งด้วยการกระตุ้นสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C กับพบว่าค่า R_{pe} มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่ 30 นาที (2290.4 Ω) จากนั้นค่า R_{pe} ก็จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน (ดูตารางที่ 4.12)



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z'' (\Omega)$ กับ $Z' (\Omega)$ ของอุณหภูมิที่ 30 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น Z'(Ω) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

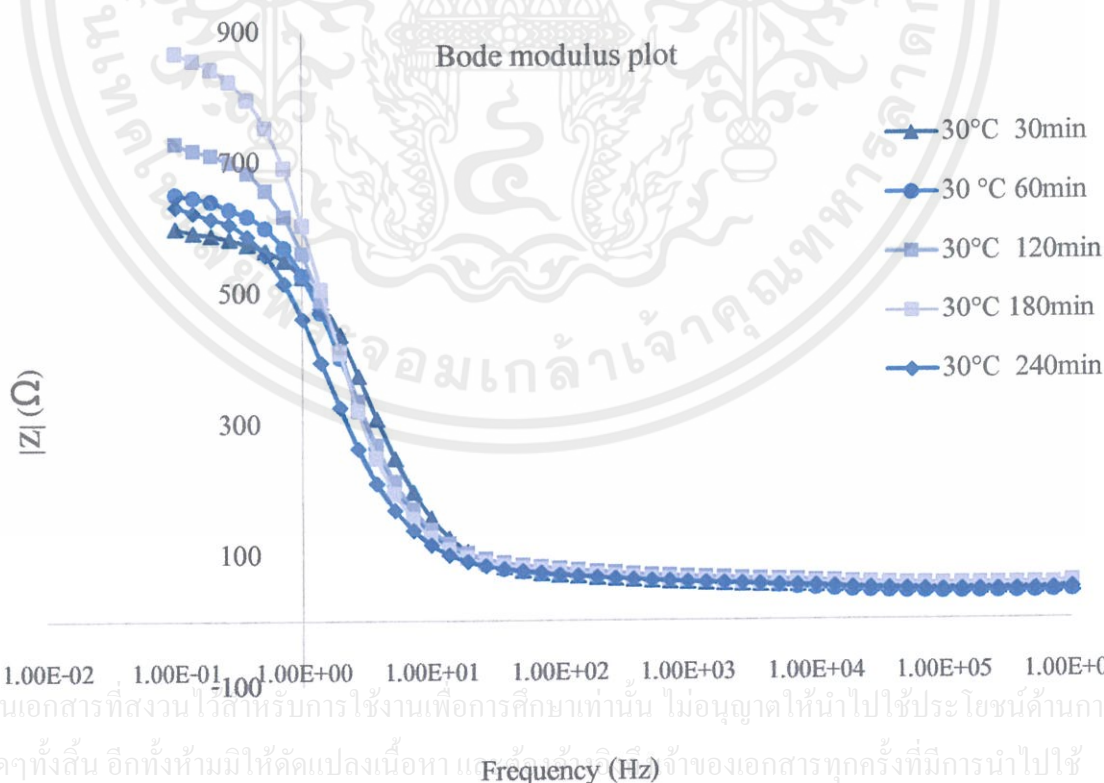
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z'' (\Omega)$ กับ $Z' (\Omega)$ ของอุณหภูมิที่ 50 °C

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z''$ (Ω) กับ Z' (Ω) ของการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวรีคกิ้งด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิที่ 30°C พบว่า ค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่เพิ่มขึ้นจนความต้านทานเชิงซ้อนภายในมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่ 180 นาที หลังจากนั้นค่าความต้านทานภายในจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

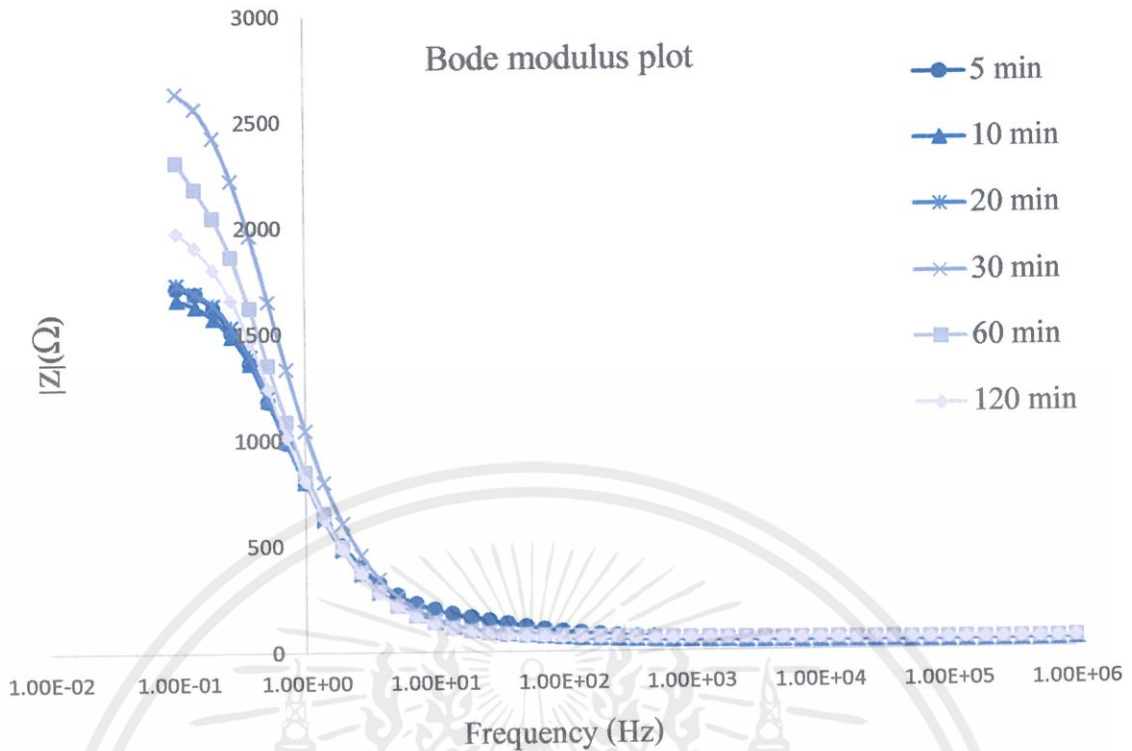
จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-Z''$ (Ω) กับ Z' (Ω) ของการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวรีคกิ้งด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิที่ 50°C พบว่า ค่าความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่เพิ่มขึ้นจนความต้านทานเชิงซ้อนภายในมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่ 30 นาที หลังจากนั้นค่าความต้านทานภายในจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

ซึ่งเหตุผลที่จะอธิบายลักษณะของกราฟ Nyquist plot จากการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวรีคกิ้งด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิที่ 30°C และ 50°C ที่มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนหยุดที่ระยะเวลาการจุ่มสีย้อมที่เหมาะสมค่าหนึ่ง หลังจากนั้นลักษณะกราฟจะตกลงอย่างต่อเนื่อง ก็คือความหนาของซิงค์ออกไซด์ที่โมเดกุลของสีย้อม N719 เกาะอยู่ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Chang et.al.

[12]



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ (Ω) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิที่ 30°C

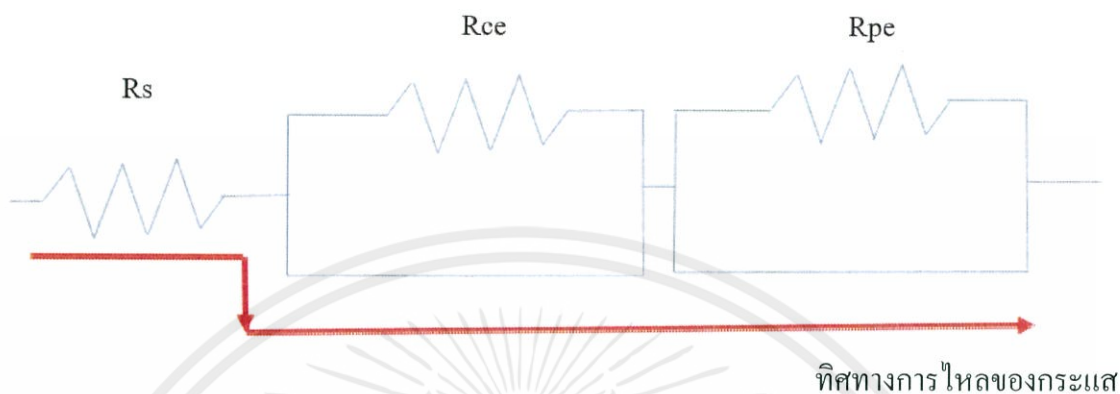


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ (Ω) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิที่ 50 °C

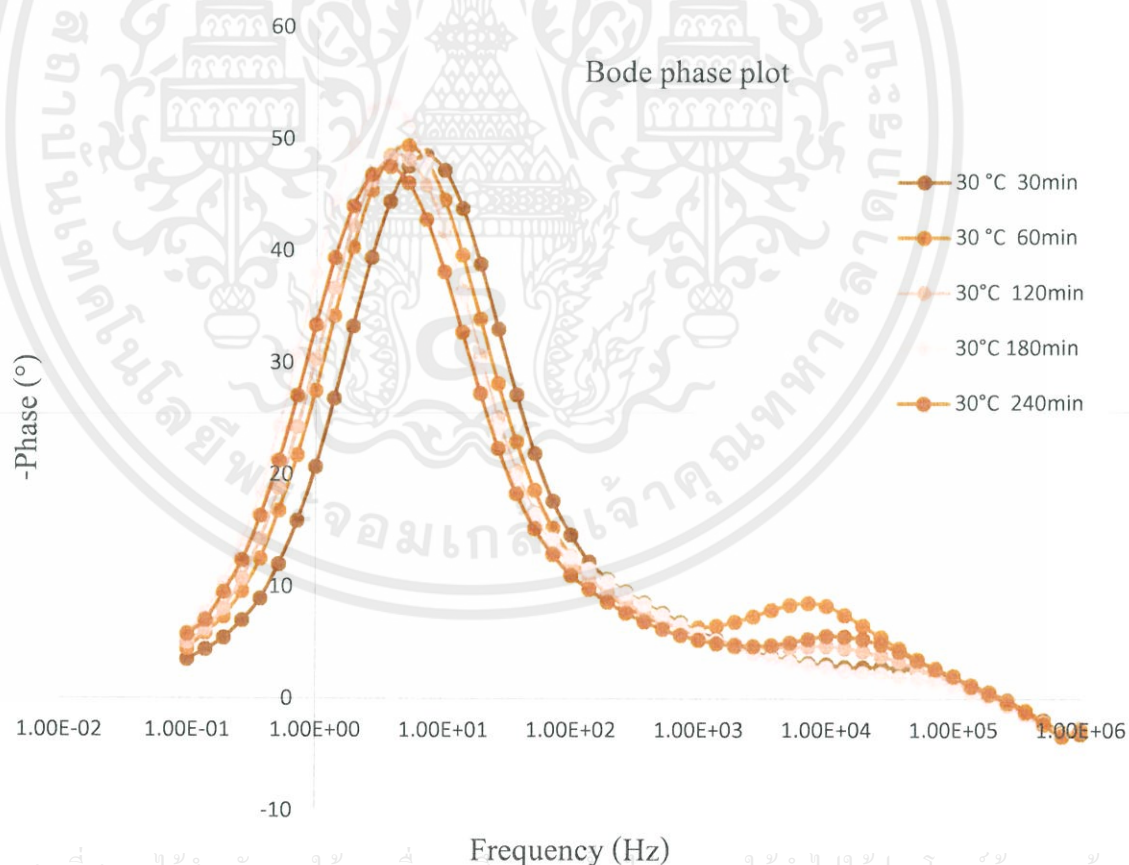
จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ (Ω) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิที่ 30 °C (Bode modulus plot ที่ 30 °C) พบว่า ในช่วง Frequency scan สูงๆ ทำให้ค่า Reactance, X_c [$X_c = 1/2 \pi fC$] มีค่าน้อยมากเปรียบเสมือนวงจรสมมูลเป็นเพียงเส้นลวด ดังรูปที่ 4.13 กล่าวคือค่าความต้านทานที่ค่าความถี่สูงๆจะสอดคล้องกับค่าความต้านทานอนุกรมรวม (Series resistance, R_s) ของวงจร ซึ่งจะมีค่าประมาณ 50 Ω ที่ช่วงความถี่ต่ำจะเป็นการสแกนความต้านทานเชิงซ้อนหน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง [10] เนื่องจากค่าความถี่ลดลงส่งผลให้ค่า X_c มีค่าสูงมาก กระแสส่วนใหญ่จึงไหลผ่านความต้านทานรวม ความต้านทานที่ขั้วเคาน์เตอร์ และความต้านทานที่ขั้วเวิร์คกิ้งมากกว่าการไหลผ่านตัวเก็บประจุต่างๆ แต่เนื่องจาก R_s และ R_{ce} มีค่าค่อนข้างคงที่ (ดูตารางที่ 4.11- 4.12 และรูปที่ 4.11-4.12) ซึ่งค่าความต้านทานที่วิเคราะห์ได้ในช่วงความถี่ต่ำจึงบอกแนวโน้มของค่า R_{pe} ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 4.11 ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาการจุ่มอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจนมีค่าความต้านทานสูงสุดที่ระยะเวลาจุ่มอิเล็กโทรด 180 นาที หลังจากนั้นค่าความต้านทานจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.12 แสดง Bode modulus plot ของอุณหภูมิ 50 °C ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กราฟ Bode modulus plot ของอุณหภูมิ 30 °C แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกันคือ ค่าความต้านทานของที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 50 °C จะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาการจุ่มสี่ข้อมที่ 30 นาที (2290.4 Ω) หลังจากนั้นค่าความต้านทานจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

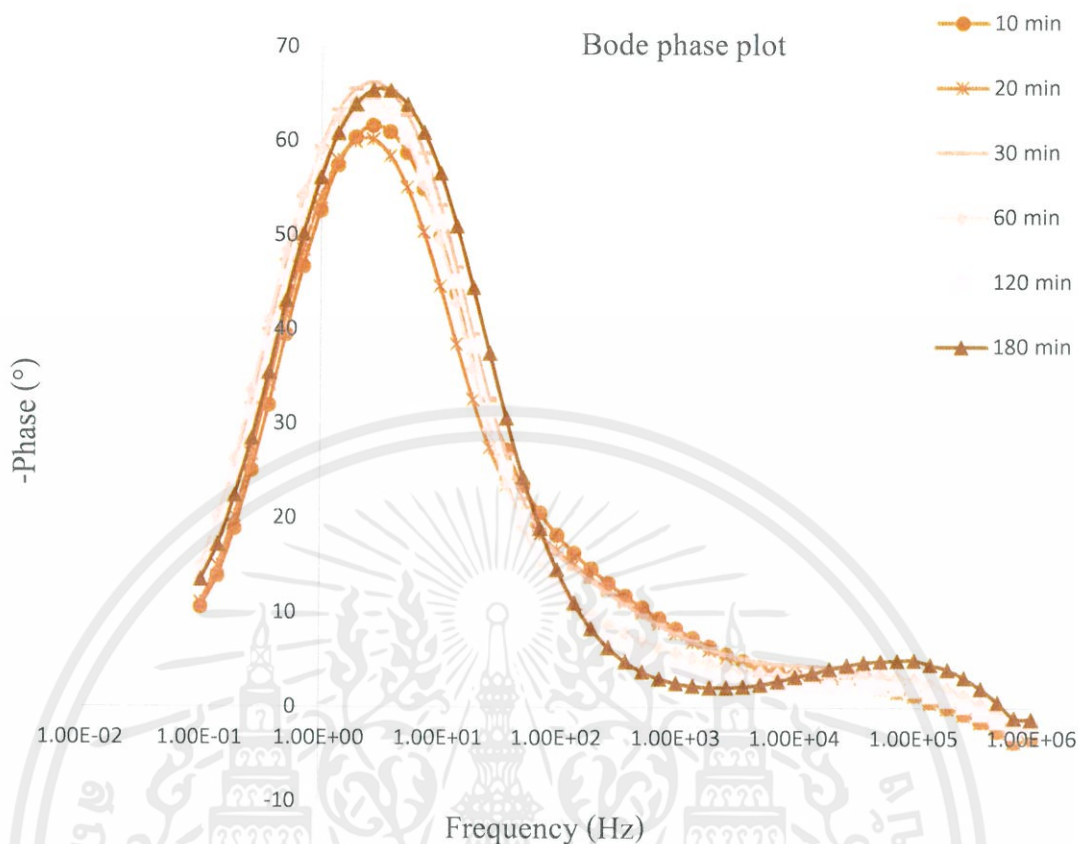


รูปที่ 4.13 แสดงการไหลของกระแสผ่านวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Phase (°) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิ 30 °C

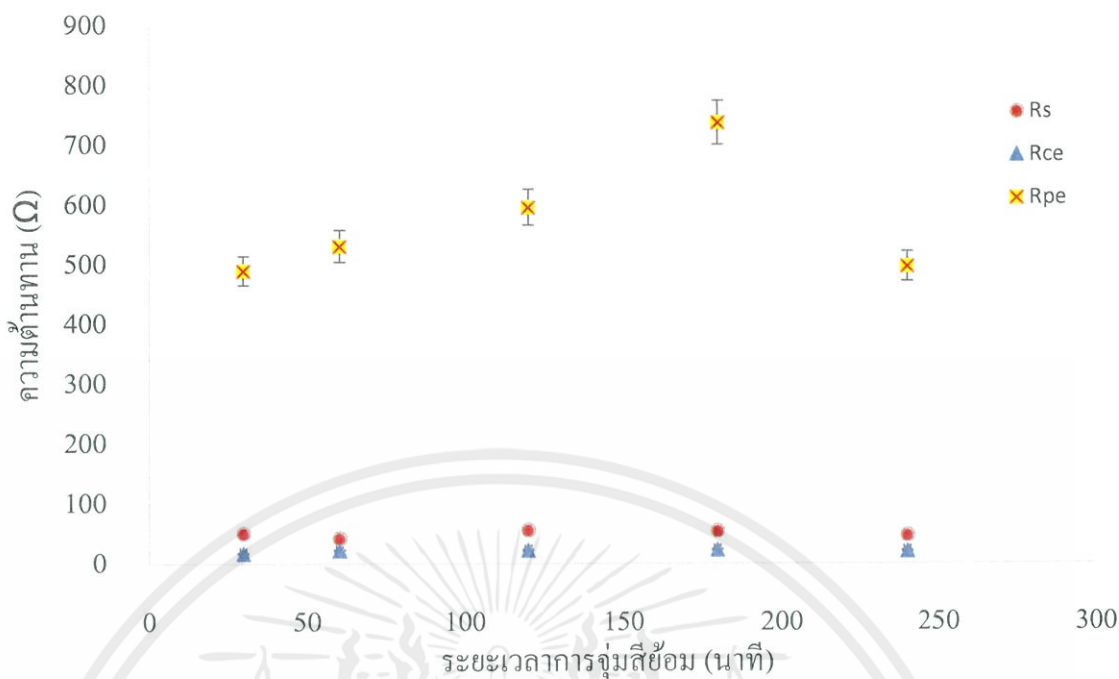


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Phase (°) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิ 50 °C

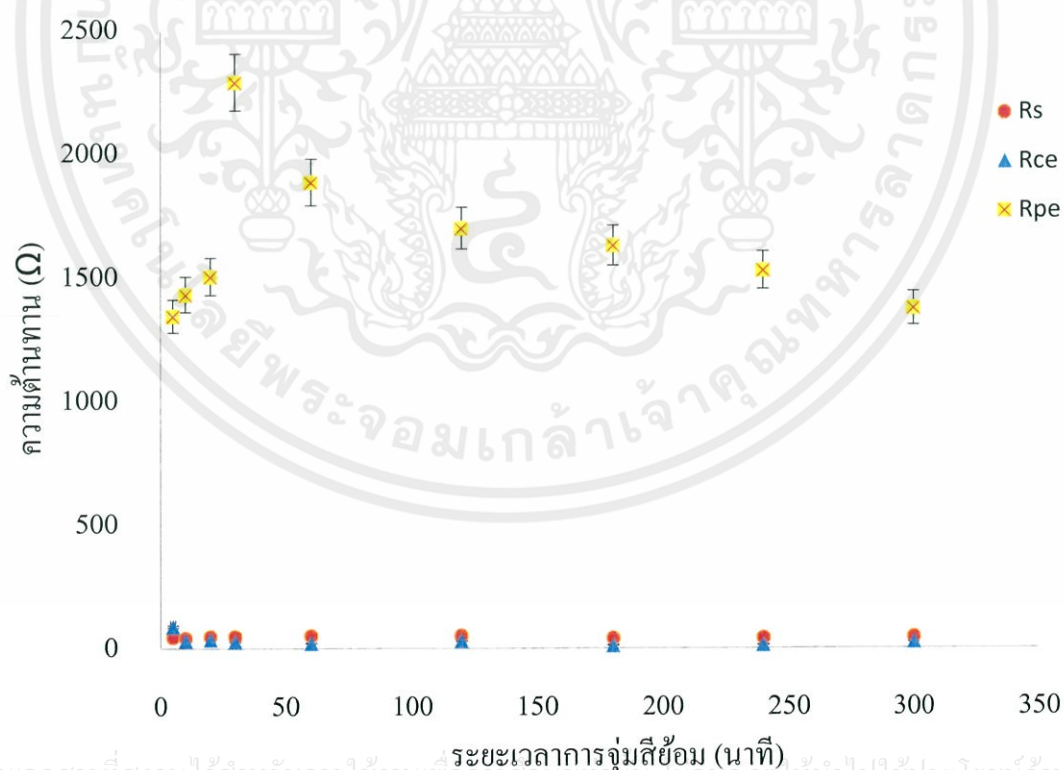
จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Phase (°) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิ 30 °C พบว่าเมื่อระยะเวลาการจุ่มสีข้อมเพิ่มขึ้นจะปรากฏลักษณะของเฟสจะเลื่อนไปความถี่ที่ต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนคงที่อยู่ที่ระยะเวลาการจุ่มสีข้อมที่ 180 นาที

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Phase (°) กับ Frequency (Hz) ของอุณหภูมิ 50 °C พบว่า เมื่อระยะเวลาการจุ่มสีข้อมเพิ่มขึ้นปรากฏว่ามุมเฟสค่อนข้างที่จะคงที่ไม่มีมีการเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำเหมือนกับที่อุณหภูมิ 30 °C

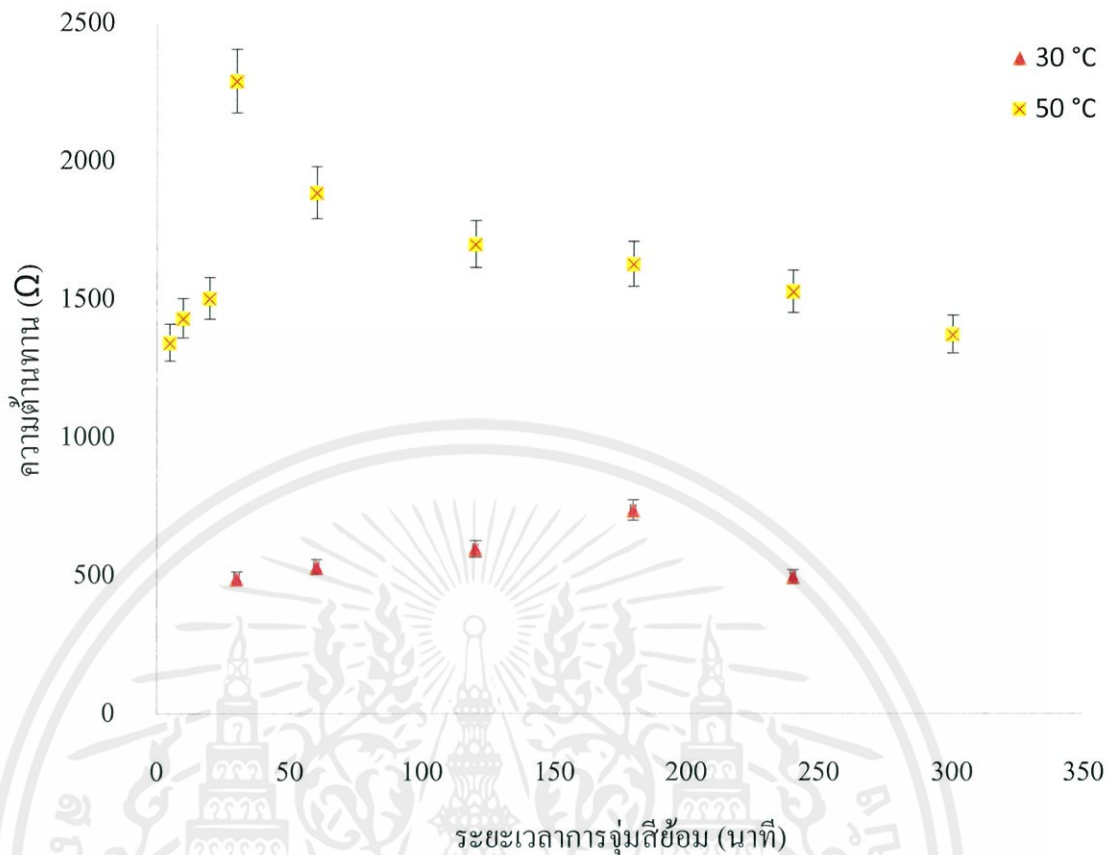
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 30 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่หน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งกับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 30 °C เทียบกับ 50 °C

จากตาราง 4.11 และ 4.12 แสดงผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสมบัติภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง ซึ่งกระตุ้นอุณหภูมิสีย้อมที่ 30 และ 50 °C ตามลำดับ และรูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในเซลล์กับระยะเวลาการจุ่มสีย้อม N719 พบว่าค่า R_s และ R_{cc} มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ค่า R_{pc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการย้อมสีจนถึงเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่งจากนั้นค่าความต้านทานจะลดลง ซึ่งเป็นลักษณะข้อมูลของทั้ง 30 และ 50 °C และจากรูปที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า R_{pc} ของ 30 °C และ 50 °C พบว่า ค่า R_{pc} สูงสุดเท่ากับ 736.93 Ω ที่เวลา 180 นาที และ 2290.40 Ω ที่เวลา 30 นาที ตามลำดับ จากข้อมูลค่า R_{pc} ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด พบว่า R_{pc} ของอุณหภูมิ 50 °C มีค่ามากกว่า 30 °C ถึง 3 เท่า จึงเป็นอีก

เหตุผลหนึ่งที่ช่วยอธิบายการลดลงของความหนาแน่นกระแส แม้ว่าปริมาณสีย้อมจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสีย้อมจาก 30 °C เป็น 50 °C ได้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยเรื่องการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงซึ่งค้ออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์ ได้เตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง โดยจุ่มสีข้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นระยะเวลา 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที และที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นระยะเวลา 10, 20, 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที ตามลำดับ จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์ ปริมาณสีข้อมที่เกาะอยู่บนอนุภาคซึ่งค้ออกไซด์ และวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy พบว่าหากจุ่ม ZnO ลงในสีข้อมที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 180 นาที จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.918 % แต่ถ้าจุ่ม ZnO ลงในสีข้อมที่อุณหภูมิ 50 °C จะได้เซลล์ประสิทธิภาพสูงสุด ที่ 0.929 % โดยใช้ระยะเวลาการข้อมสีที่สั้นลงเป็น 30 นาที ผลจากการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนภายในยืนยันว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการจุ่มที่สั้นลงเกิดจากการลดลงของปริมาณการสูญเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าลบประกอบการเพิ่มขึ้นของปริมาณสีข้อมที่เกาะบนอนุภาคซึ่งค้ออกไซด์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการผสมครีม ZnO ทุกครั้งต้องใส่ตัวผสมให้มีปริมาณที่เหมาะสม มิเช่นนั้นอาจทำให้ ZnO ที่เตรียมได้มีความข้นมากเกินไป ซึ่งจะทำให้การเคลือบ ZnO นั้น ได้ความหนาไม่เท่ากัน
2. ในขั้นตอนการปาดเคลือบ ZnO บนกระจกนำไฟฟ้า ต้องปาดให้เรียบและสม่ำเสมอ
3. การเผาขั้วไฟฟ้าต้องเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 10 °C จนถึง 400 °C มิเช่นนั้นจะทำให้ซึ่งค้ออกไซด์ที่เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้ามียรอยแตก ซึ่งเกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว
4. ในการประกอบขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟาลบเข้าด้วยกัน ต้องใช้ความร้อนในการประกอบที่เหมาะสม มิเช่นนั้นอาจทำให้บอลลอก parafilm ละลายมากเกินไป จนทำให้พื้นที่ทำงานของเซลล์

(Active area) เหลือไม่ถึง 0.25 ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์และสงวนไว้สำหรับงานวิจัย

5. ในการหาค่าการหาค่าการสูญเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าลบ ต้องหาค่าให้เต็มพื้นที่ทำงานของเซลล์ (Active Area) เพื่อที่เวลานำเซลล์ไปวัดประสิทธิภาพ จะได้ไม่ต้องวัดพื้นที่ทำงานเซลล์ใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] McCune, M., Zhang, W., Deng, Y.L., 2012. High efficiency dye-sensitized solar cells based on three dimensional multilayered ZnO nanowire arrays with “caterpillar-like” structure. *Nano Lett.* 12, 3656–3662.
- [2] D.P. Wu, Z.Y. Gao, F. Xu, J.L. Chang, W.G. Tao, J.J. He, S.Y. Gao, K. Jiang, Hierarchical ZnO aggregates assembled by orderly aligned nanorods for dye-sensitized solar cells, *CrystEngComm* 15 (2013) 1210–1217.
- [3] L.-Y. Chen, Y.-T. Yin, Hierarchically assembled ZnO nanoparticles on high diffusion coefficient ZnO nanowire arrays for high efficiency dye-sensitized solar cells, *Nanoscale* (2013).
- [4] พีรภิตดี คมสัน. (2550). เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย. *วารสารวิจัย มข.* 35(4): 205-214
- [5] วินิช พรหมอารักษ์ และคณะ. (2550). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. *วารสารวิชาการ ม.* 9(2): 14-31
- [6] กมลพรรณ ชุมพล. ๒๕๕๕. การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (ออนไลน์) แหล่งที่มา : www.nimt.or.th/nimt/upload/linkfile/sys-metrology-926-110.pdf
- [7] B. O'Regan and M. Grazel, *Nature*, 395 (1991) 737-739
- [8] กสิณ ประกอบไวทยกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า.
- [9] มหาวิทยาลัยขอนแก่น. อิมพีแดนซ์ของ RLC ต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน (ออนไลน์) แหล่งที่มา : http://physics.kku.ac.th/ac_cai/3_11Thai/3_11.html
- [10] Pichanan Teesetsopon¹, S. Kumar¹ and Joydeep Dutta^{2,3,*} *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 4988 – 4999
- [11] Efundu. ๒๕๕๖. ค่าความหนืดของเอทานอล (ออนไลน์) แหล่งที่มา : https://www.efunda.com/materials/common_matl/show_liquid.cfm?MatlName=AlcoholEthanol
- [12] Chang et al. *Nanoscale Research Letters* 2012, 7:688
<http://www.nanoscalereslett.com/content/7/1/688>

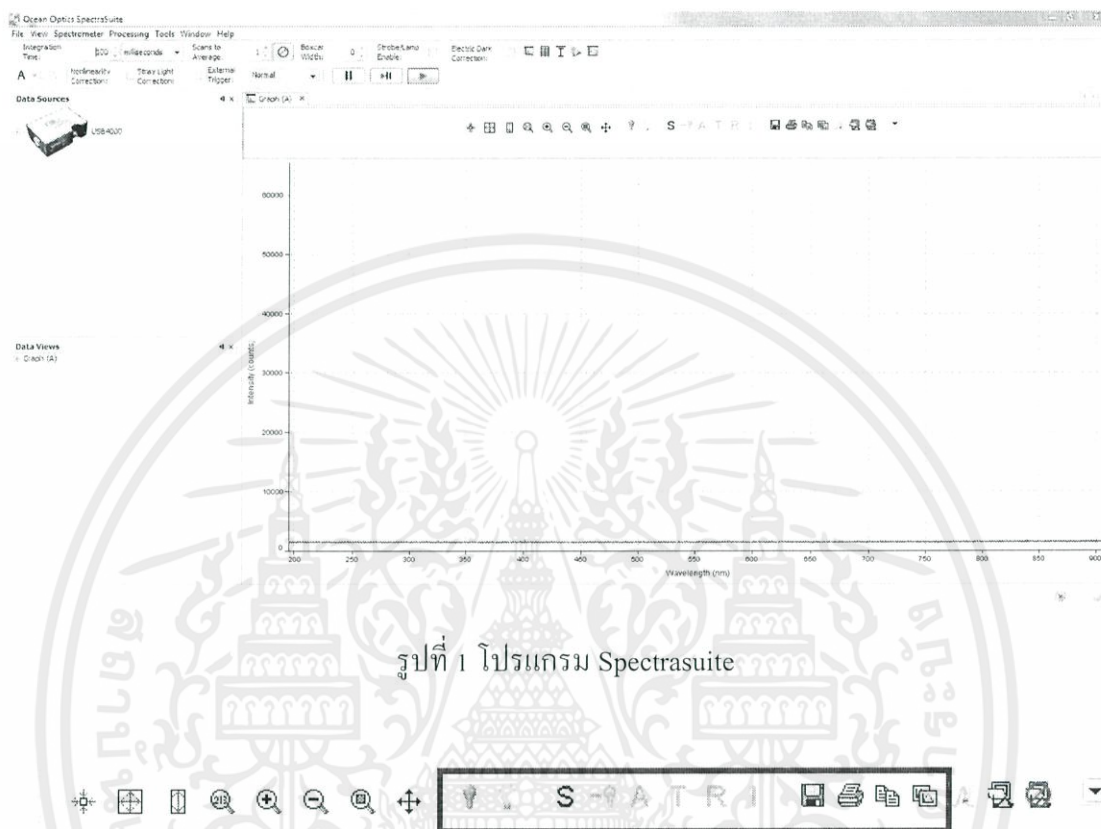
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและการใช้โปรแกรม Spectrasuite ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1. เปิดโปรแกรม Spectrasuite



รูปที่ 1 โปรแกรม Spectrasuite

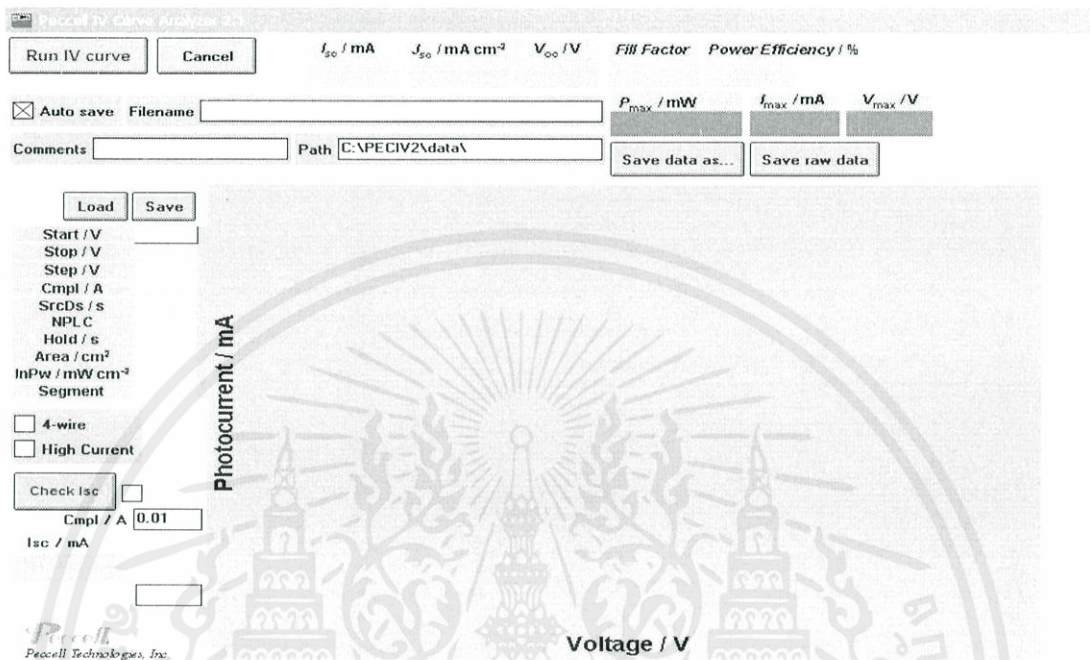
รูปที่ 2 แถบเครื่องมือ

2. กดเครื่องหมาย store dark ที่อยู่บนแถบเครื่องมือ เพื่อบันทึกค่า background
3. กดเครื่องหมาย store reference
4. นำคิวเวทที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) วางในแท่นสำหรับใส่คิวเวท กดเครื่องหมาย store reference เพื่อบันทึกค่า reference
5. นำคิวเวทที่บรรจุสีย้อม N719 วางในแท่นสำหรับใส่คิวเวท กดเครื่องหมาย absorption เพื่อบันทึกค่า absorption ของสีย้อม N719
6. กดเครื่องหมาย copy data เพื่อคัดลอกข้อมูลไปวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

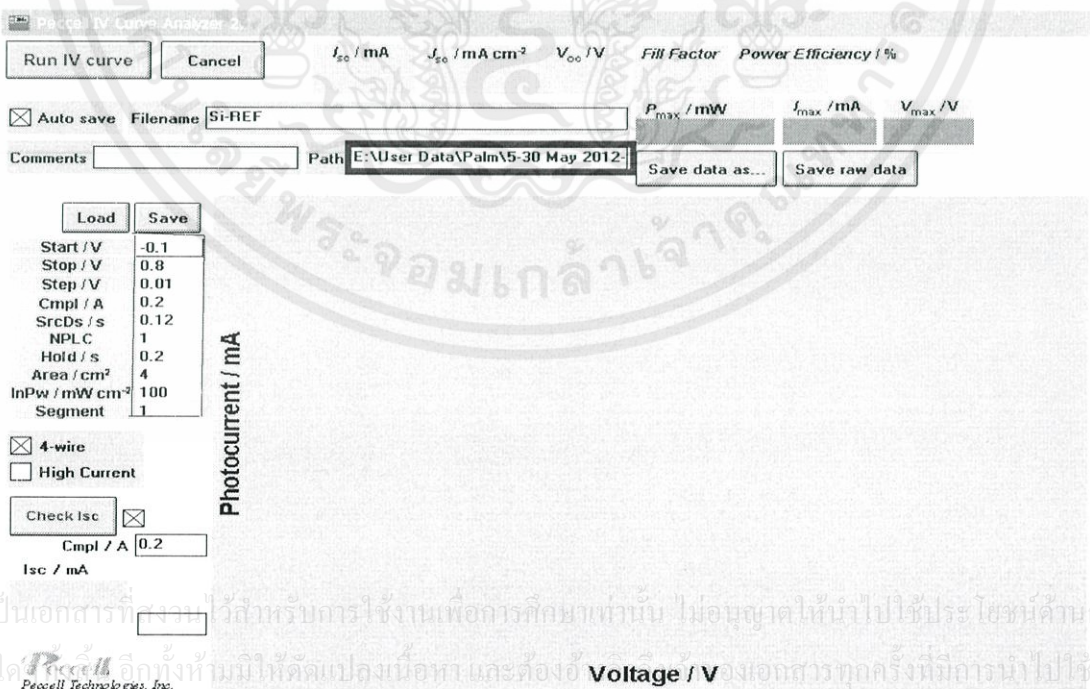
ขั้นตอนและวิธีการใช้โปรแกรม Pecell IV Curve Analysis 2.1 ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1. เปิดโปรแกรม Pecell IV Curve Analysis 2.1



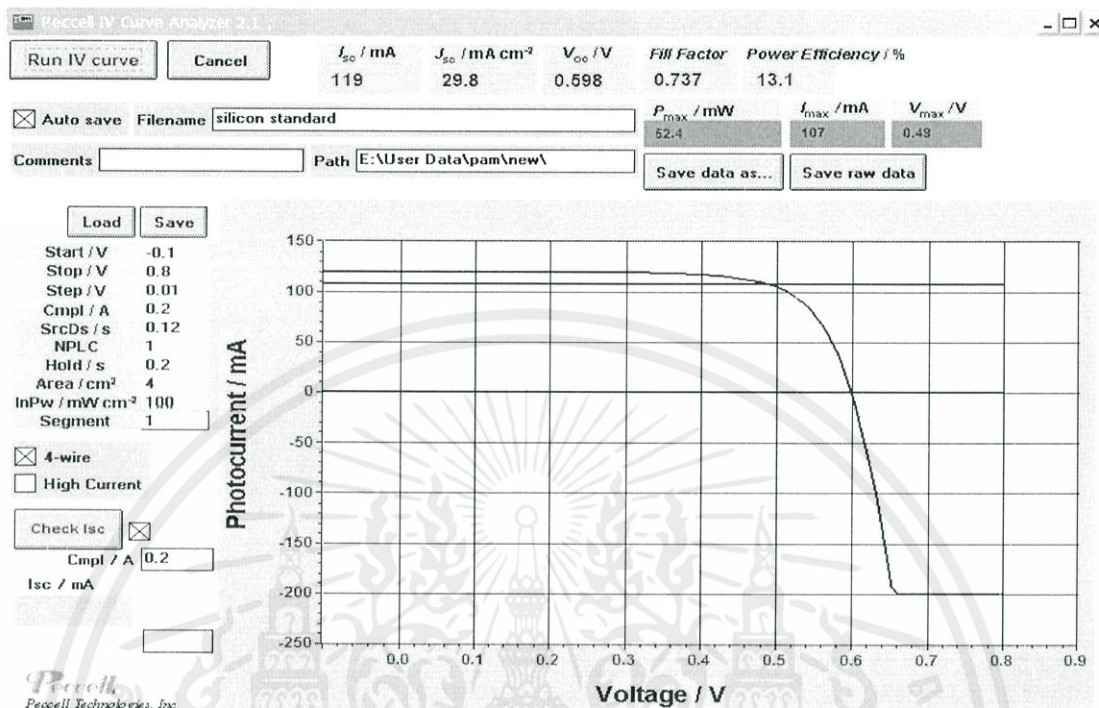
2. ตั้งค่าเริ่มต้นก่อนทดสอบ IV Curve (กด Save) พร้อมเลือกไฟล์ที่ต้องการจัดเก็บข้อมูล

ตรงช่อง Path

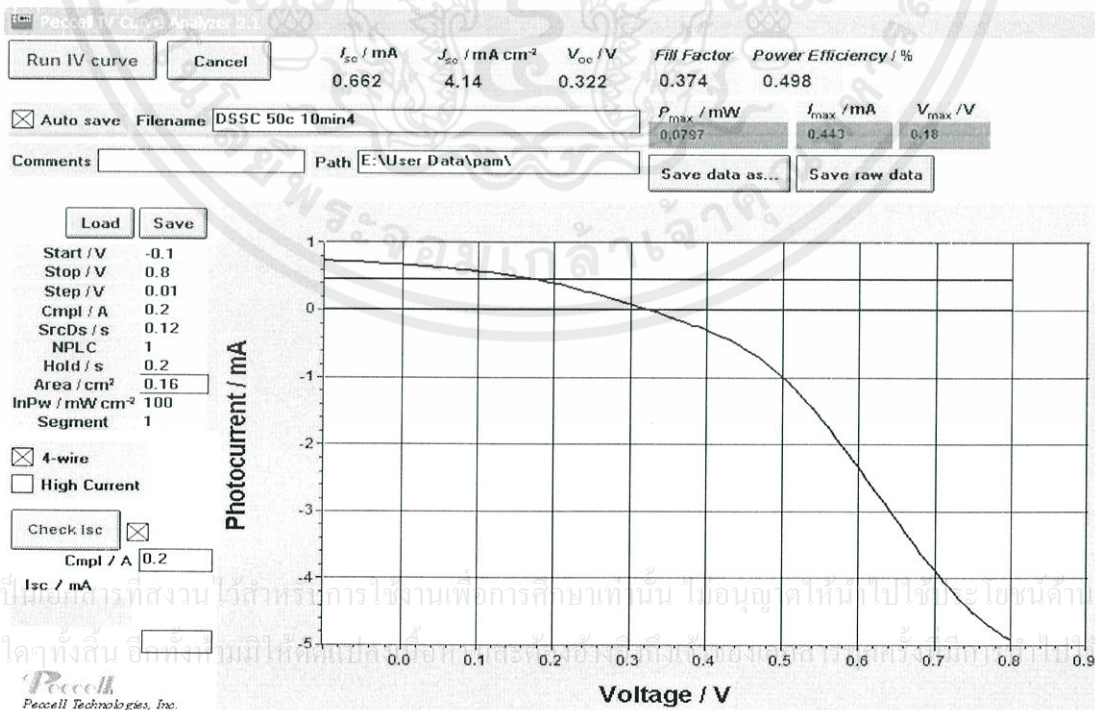


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด **Pecell** อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาแนะนำและติดตั้ง Voltage / V ของเอกสารทุกครั้งที่มีบริการนำไปใช้

3. ทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (กด Run IV curve)

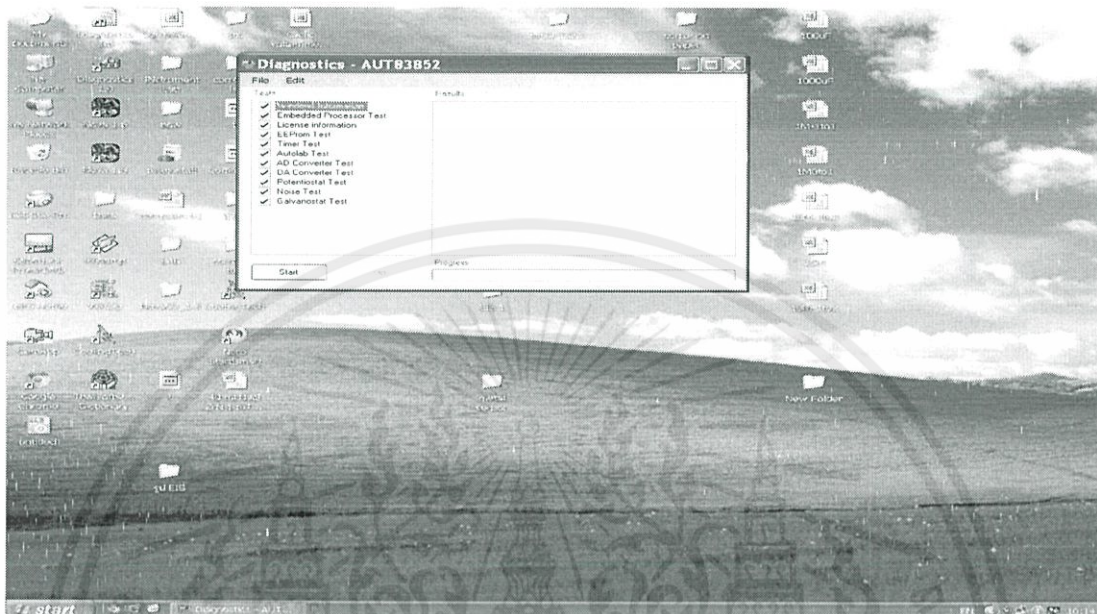


4. ทดสอบประสิทธิภาพทางแสง บนที่ค่า Active Area แล้วกด Run IV curve ข้อมูลที่วัดได้จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ที่เลือกไว้โดยอัตโนมัติ

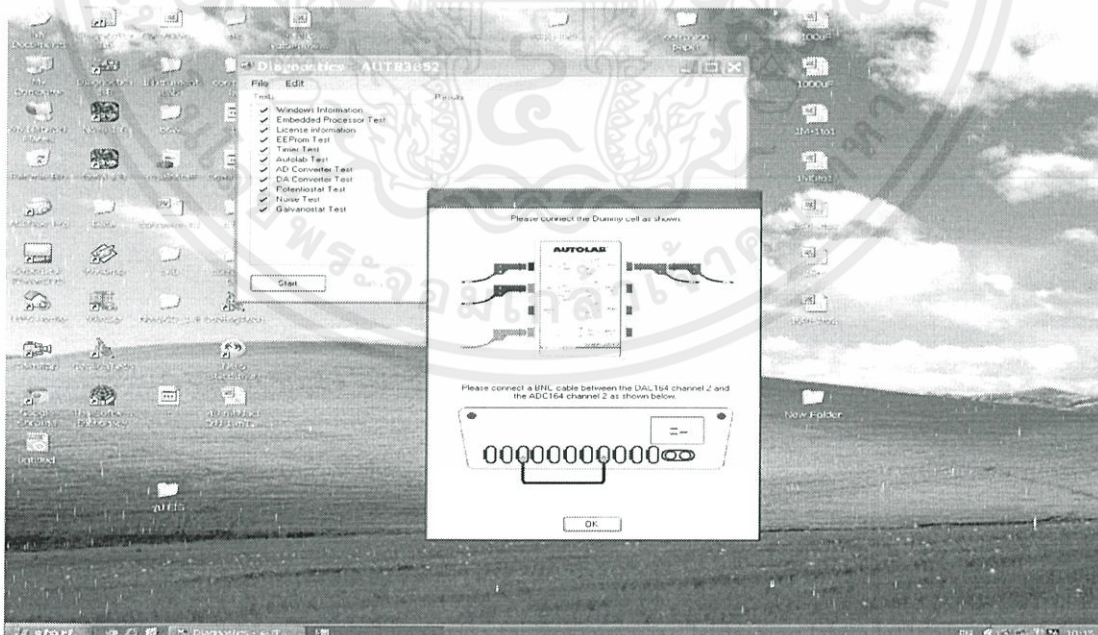


ขั้นตอนและวิธีการทดสอบความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง โดยใช้เครื่อง AUTOLAB ฟังก์ชัน Potentiostat ร่วมกับ โปรแกรม NOVA 1.8

1. เปิดโปรแกรม Diagnostics 1.8

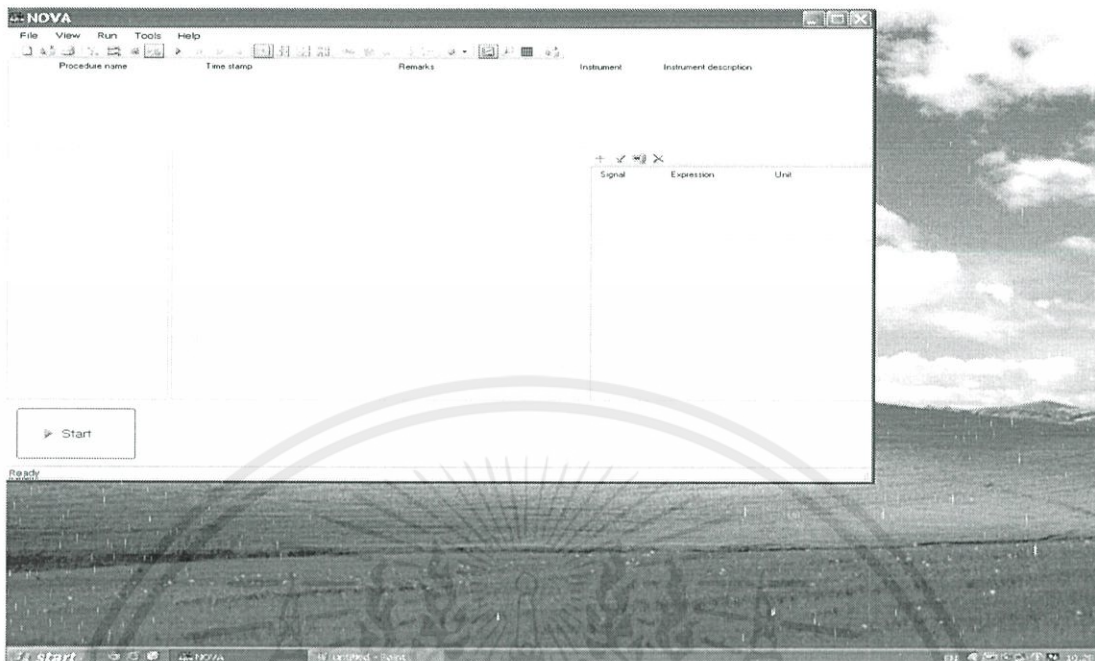


2. กด Start ใช้ตำแหน่งการเชื่อมต่อของเครื่อง AUTOLAB (กด OK)

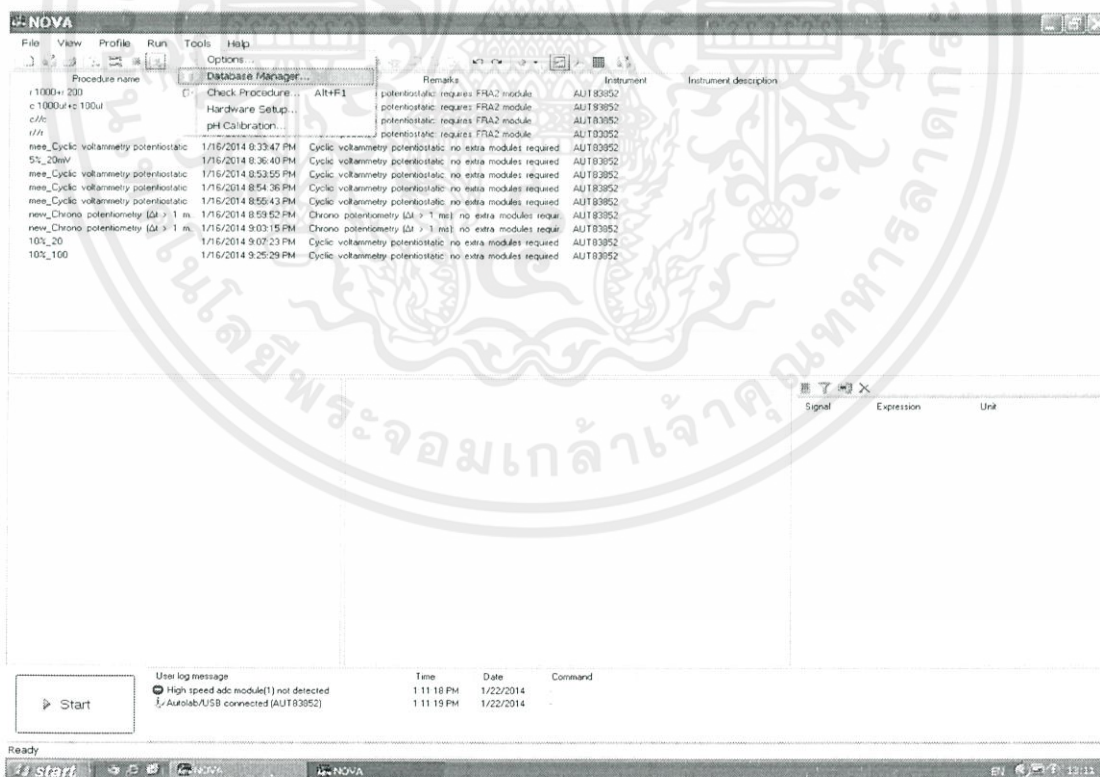


เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์และจะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดโปรแกรม NOVA 1.8

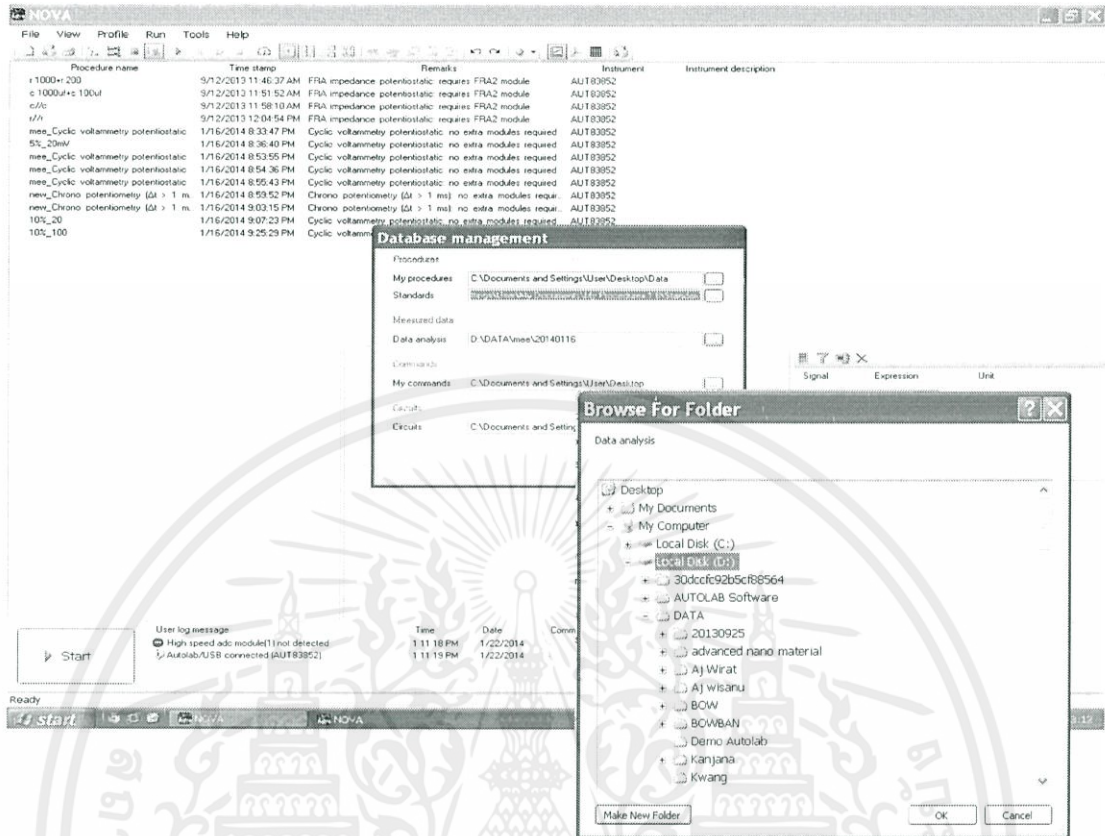


4. คลิกที่ Tool เลือก Database management

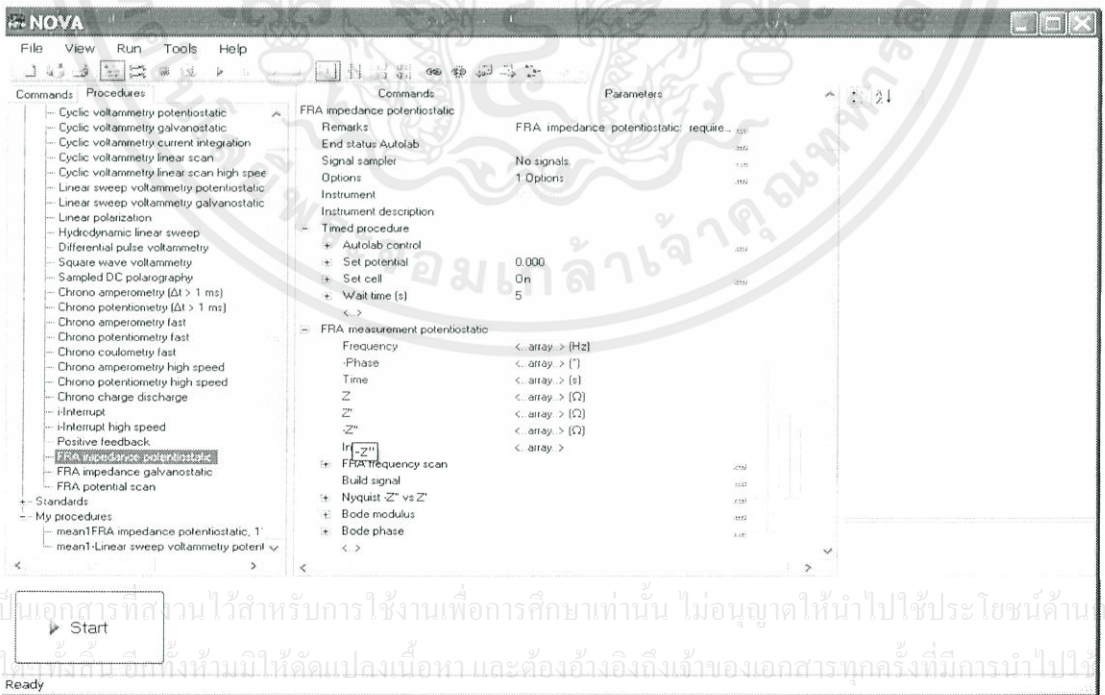


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิก Data analysis เลือกไฟล์ที่ต้องการจะใช้เก็บข้อมูล (กด OK)



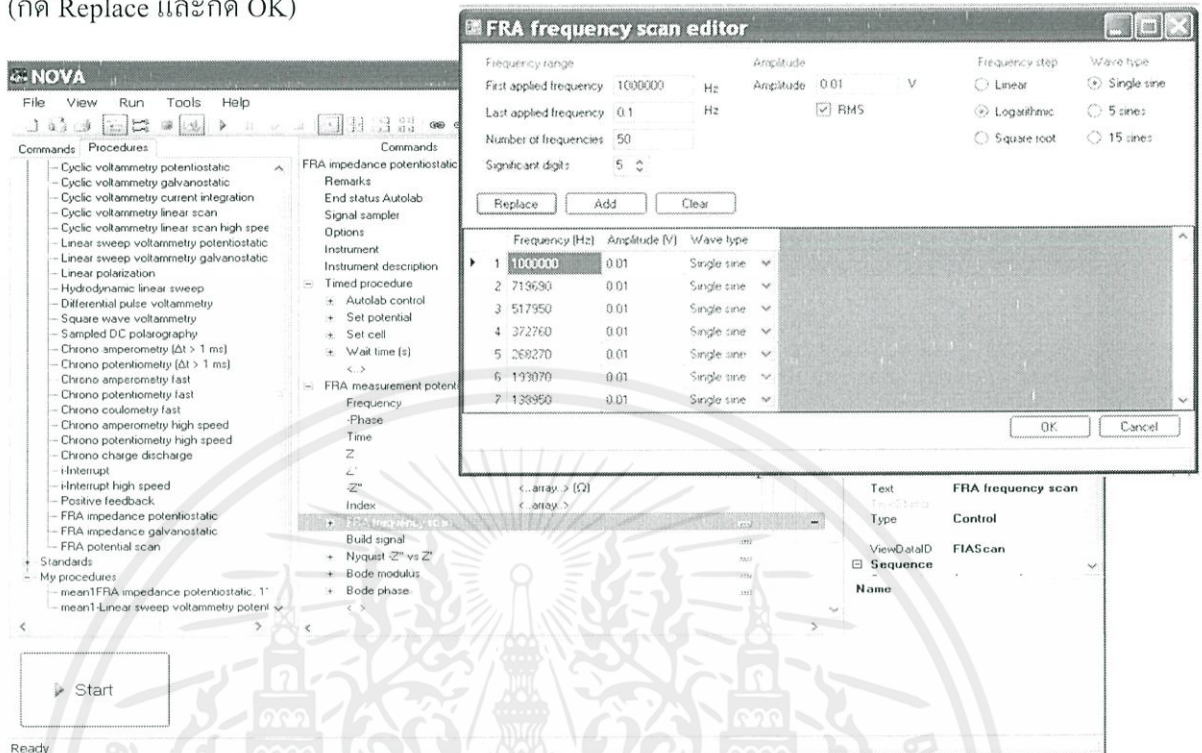
6. คลิก Setup View เลือก FRA impedance potentiostat



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

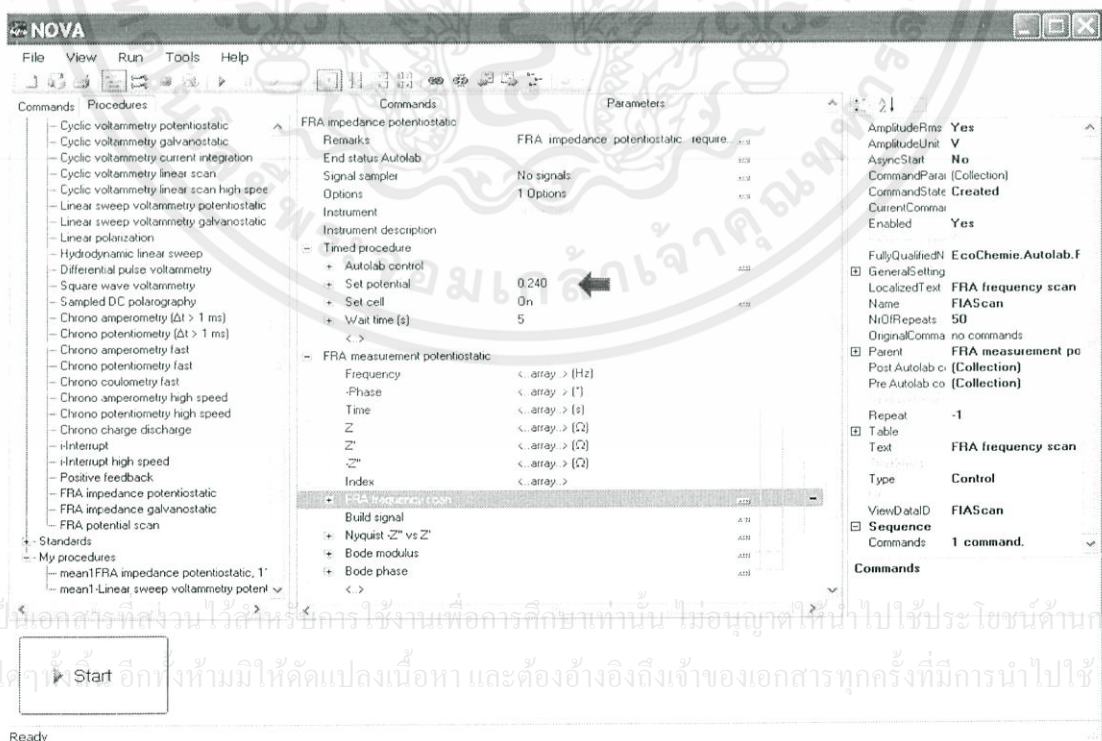
7. เลือก FRA frequency scan ตั้งค่าความถี่และค่าพารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้ในการวิเคราะห์

(กด Replace และกด OK)



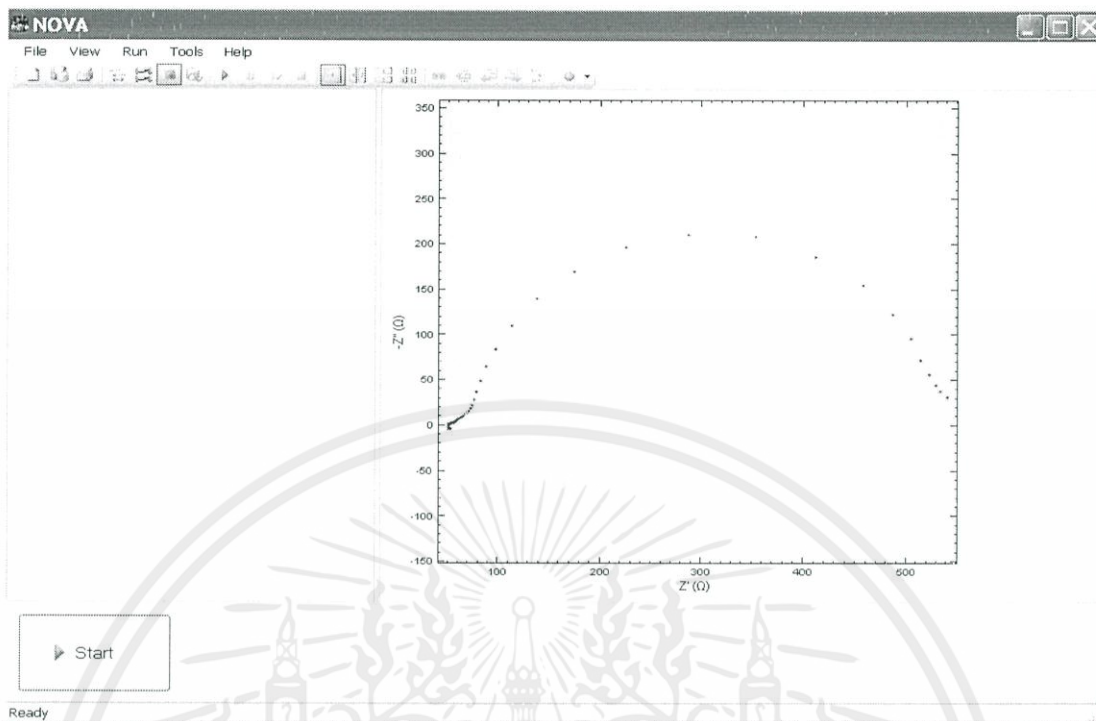
8. ป้อนค่าความต่างศักย์ที่แสดงบนจอแสดงผลของเครื่อง AUTOLAB ลงตรงช่อง Set

potential (กด start)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. แสดงผลการทดสอบ



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

Procedure name Time stamp Remarks Instrument Instrument description

ex1	1/22/2014 10:58:48 AM	FRA impedance potentiostatic: requires FRA2 module	AUT83952	
-----	-----------------------	--	----------	--

Plot Options...
 Properties...
 Refresh
 Add Plot
 Show All Plots
 Hide All Plots
 Save the data in database
 Remove from View
 Remove all from View

Properties

Name
 60s3

Enter the strings in the collection (one per line):
 FRA impedance potentiostatic: requires FRA2 module

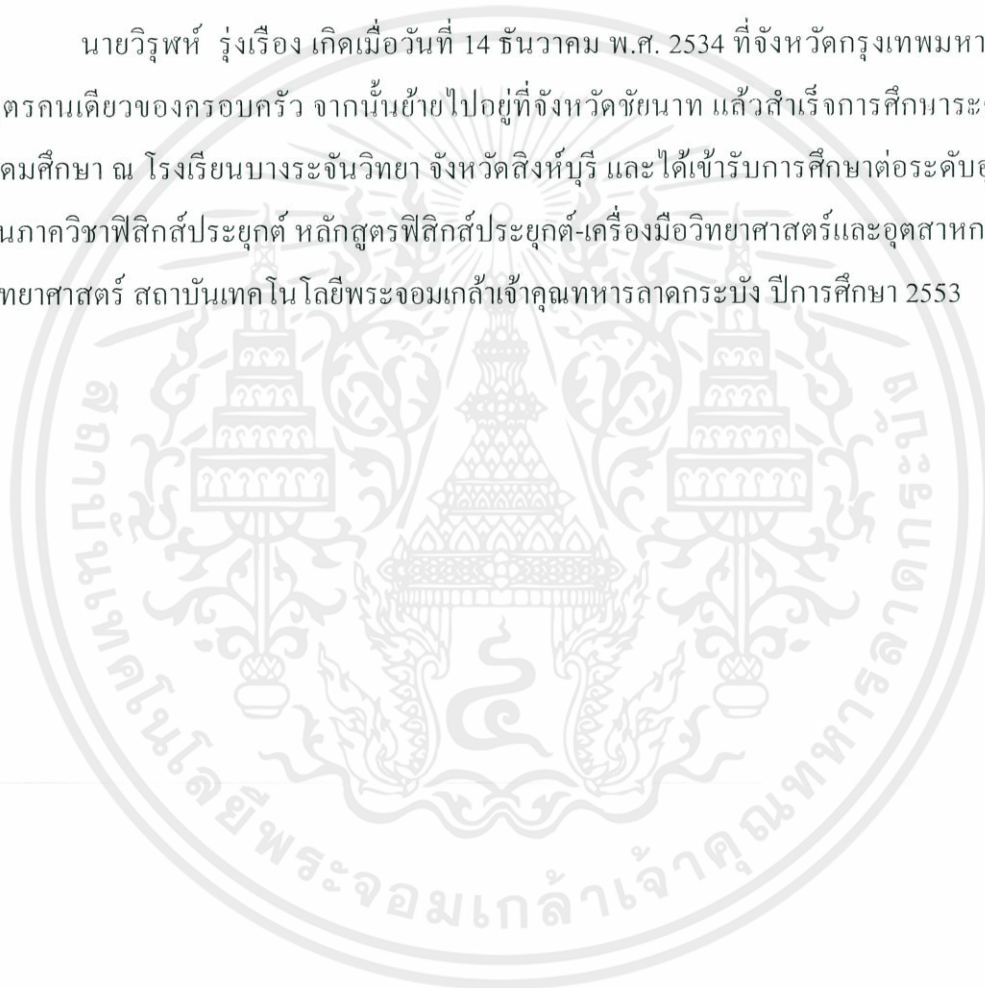
OK Cancel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายฉัฐพงษ์ พงษ์คนตรี เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดปทุมธานี เป็นบุตรคนสองของครอบครัว สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสุรศักดิ์มนตรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2553

นายวิรุฬห์ รุ่งเรือง เกิดเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนเดียวของครอบครัว จากนั้นย้ายไปอยู่ที่จังหวัดชัยนาท แล้วสำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนบางระจันวิทยา จังหวัดสิงห์บุรี และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้