

การพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
DEVELOPMENT OF DYE – SENSITIZED SOLAR CELL
PREPARATION PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นฉบับนี้ขอขอร้องขอคืนเอกสารฉบับนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

DEVELOPMENT OF DYE – SENSITIZED SOLAR CELL
PREPARATION PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าเอกสารจะขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดลอกหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ

การพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
Development of Dye-Sensitized Solar Cell Preparation
Process

ชื่อนักศึกษา

นางสาวเพ็ญพิชชา มาคำ รหัสนักศึกษา 56051186
นางสาววรรณกร แพทย์ประสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 56051204
นางสาวสกาใจ ไทยธวัชกุล รหัสนักศึกษา 56051224

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์



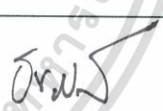
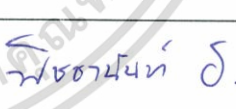
ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.พิชชานันท์ อีเศรษฐ์โศภน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล้ใจเจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการ	
อ.ธนภรณ์ สีสาวพัฒนานนท์ กรรมการ	
ดร.พิชชานันท์ อีเศรษฐ์โศภน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเพ็ญพิชชา มาคำ	รหัสนักศึกษา 56051186
	นางสาววรรณกร แพทย์ประสิทธิ์	รหัสนักศึกษา 56051204
	นางสาวสกาใจ ไทยรัชกุล	รหัสนักศึกษา 56051224
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โศภน	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitize Solar Cells, DSSC) โดยการผลิตเครื่องปาดเคลือบเพื่อควบคุมการผลิตให้มีความแม่นยำขึ้นและเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Percent Standard Error, PSE) ของเซลล์ที่เตรียมด้วยมือ (PSE_{hand}) กับเซลล์ที่เตรียมด้วยเครื่อง ($PSE_{machine}$) ในแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จำนวนโมลของสีย้อม N719 และค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เครื่องวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer) และเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar Simulator) ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ (J-V Characterization) ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เครื่องมือปาดเคลือบที่พัฒนาขึ้นแทนการปาดเคลือบด้วยมือสามารถลดค่า PSE ของความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาได้ 51.69% ลดค่า PSE ของจำนวนโมลของสีย้อมลงได้ 31.92% ซึ่งการสร้างเครื่องปาดเคลือบสามารถลดเวลาเวลาที่ใช้เตรียมฟิล์ม TiO_2 เหลือทั้งหมดได้ 83.78% แต่ไม่สามารถลดค่า PSE ของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ทั้งนี้การลดความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยอื่นๆ เช่น พื้นที่การทำงาน ปริมาณอิเล็กโตรไลต์ ความหนาของฟิล์มแพลทินัมให้แม่นยำขึ้นต่อไป

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์ เทคนิคการปาดเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ขึ้นเว็บไซต์หรือในสื่อใดๆ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of Dye-Sensitized Solar Cell Preparation Process		
Students	Miss Penpitcha Macum	Student ID 56051186	
	Miss Wannakorn Paetprasit	Student ID 56051204	
	Miss Sakaojai Thaithawatkul	Student ID 56051224	
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Dr.Pichanan Teesetsopon		

Abstract

This special project aimed to study and develop the preparation process of dye-sensitized solar cell (DSSC). The doctor blade machine was designed and constructed in order to improve the precision in DSSC preparation and results. The percent standard errors (PSE) of sample cells made by hand and by machine were compared in the following parameters: thickness of TiO_2 paste, number of moles of N719 dye and electrical properties using scanning electron microscope (SEM), UV – Vis spectrophotometer and solar simulator via J-V characterization technique, respectively. The results revealed that producing DSSCs by the designed equipment could reduce the PSE of thickness of TiO_2 paste before annealing by 51.69% and the PSE of number of moles of N719 dye was decreased by 31.92%. Moreover, constructed machine reduced the preparation time of TiO_2 paste by 83.78%. However, the PSE of overall conversion efficiency of the cells still cannot be reduced. In order to suppress this value, other factors such as active area, amount of electrolyte and platinum film thickness should be better controlled.

Keywords : dye-sensitized solar cell, TiO_2 , doctor blade, percent standard error,

overall conversion efficiency, thickness of TiO_2

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ผศ.ดร.ภัทริยา กิตติเดชาชาญ และ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่ช่วยอนุเคราะห์อุปกรณ์และสารเคมีในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ภาณุพล โขลกกระโทก ที่ให้คำปรึกษาด้านการเขียนโปรแกรม Arduino เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องวิจัย Applied Semiconductor Research Laboratory ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่อนการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี และ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่ในการทำวิจัย เอื้อเพื่อให้เข้าใช้เครื่อง Solar Simulator ในการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ และให้เข้าใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ในการวัดความหนาของฟิล์ม TiO_2

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสนับสนุนพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา ด้วยความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

เพ็ญพิชชา มาคำ
วรรณกร แพทย์ประสิทธิ์
สกวใจ ไทยธวัชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	3
2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	3
2.1.2 หลักการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.1.4 การตรวจสอบความหนาของครีမ်ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บนกระจกนำไฟฟ้า ขั้วเวิร์คกิ้ง (Working Electrode) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	9
2.1.5 การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error, SE.)	12
2.1.6 หลักการทำงานและส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)	13
2.1.7 การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย Arduino	15
2.1.8 วัดความหนาของฟิล์ม TiO ₂ ที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM ด้วยโปรแกรม ImageJ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 ตัวอย่างอุปกรณ์และวิธีการขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมไดออกไซด์ และขั้วไฟฟ้าแพลทินัม	21
2.2.2 ตัวอย่างการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	22
2.2.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 กระบวนการเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	25
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้าและวิธีทำความสะอาดพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้า	25
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter Electrode)	27
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมไวแสง N719	28
3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	29
3.1.5 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	32
3.2 กระบวนการออกแบบเครื่องมือปาดเคลือบสำหรับปรับปรุงกระบวนการผลิต DSSC	33
3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	35
3.4 กระบวนการวัดและวิเคราะห์สมบัติภายในเซลล์และประสิทธิภาพของ DSSC	36
3.4.1 การวัดความหนาของครีมน TiO_2 ที่เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง	36
3.4.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง N719 (Dye Absorption)	39
3.4.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Solar Simulator) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดลองเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	44
4.1.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2	44
4.1.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO_2	45
4.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม N719 ของ TiO_2	46
4.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารร่าง 4.2 ผลการออกแบบเครื่องปาดเคลือบเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต DSSC ประโยชน์ด้าน 54 ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดลองเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	56
4.3.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO ₂	56
4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO ₂	57
4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม N719 ของ TiO ₂	58
4.3.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC	59
4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	64
4.4.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO ₂	64
4.4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO ₂	65
4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม N719 ของ TiO ₂	65
4.4.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 ตัวอย่างประสิทธิภาพของ DSSC	9
4.1 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO ₂ ก่อนเผาและหลังเผา โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	45
4.2 ผลการคำนวณจำนวนโมลของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนฟิล์ม TiO ₂ ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	47
4.3 ผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิต่างกัน	47
4.4 ค่าความหนืด (Viscosity) ของเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ	49
4.5 ปริมาณตะกอนของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิต่างกัน	49
4.6 เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	50
4.7 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	52
4.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	53
4.9 ผลการทดสอบอัตราเร็วของแปรงปาดในเครื่องปาดเคลือบ	56
4.10 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO ₂ ก่อนเผาและหลังเผา โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	57
4.11 ผลการคำนวณจำนวนโมลของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนฟิล์ม TiO ₂ ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	58
4.12 เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	60
4.13 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	62
4.14 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	63
4.15 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO ₂ ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16	65
เปรียบเทียบจำนวนโมลการดูดซับสีของ TiO_2 ที่ใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	
4.17	67
เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้จากการใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	
4.18	68
เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของพารามิเตอร์ต่างๆ	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โมดูลของ DSSC	3
2.2 โครงสร้างของ DSSC	4
2.3 ส่วนประกอบและการไหลของอิเล็กตรอนใน DSSC	5
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์กระทบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับค่ามวลอากาศ	7
2.5 ลักษณะกราฟ J – V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.6 ส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM	10
2.7 แผนภาพแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ	10
2.8 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.9 Arduino UNO R3	15
2.10 การส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ไปยัง Arduino	16
2.11 เลือกบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload	17
2.12 เลือกหมายเลข Com Port ของบอร์ด	17
2.13 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม	18
2.14 Upload โค้ดโปรแกรม	18
2.15 ส่วนประกอบต่างๆ ของ Arduino UNO R3	19
2.16 การใช้โปรแกรม ImageJ วัดความหนาของฟิล์ม TiO ₂ จากภาพที่ถ่ายด้วยเครื่อง SEM	20
2.17 ขั้นตอนการประกอบ DSSC	22
3.1 วิธีการดำเนินงาน	24
3.2 กระบวนการเตรียม DSSC	24
3.3 เทคนิคการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของ DSSC	25
3.4 (ก) การใช้มีดกรีดกระจก (ข) หักกระจกตามรอยที่กรีดไว้ (ค) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 cm x 1.5 cm	25
3.5 กระจกที่จะใช้ทำด้านขั้วไฟฟ้าแคโทด	26
3.6 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)	26
3.7 การวางกระจกลงบนกระดาษที่ถูกคลุมทับด้วยแผ่นถนอมอาหาร	27
3.8 บล็อกสกรีน (สติกเกอร์)	28
3.9 เครื่อง Hot Plate & Stirrer	29
3.10 การเติมเอทานอลลงไปในหลอดทดลองที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ดูดักรีมไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วหยดใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีน	31
3.12 กระจกสไลด์	31
3.13 ไซ้ตู่มน้ำหนัก 200 g วางทับบนเซลล์	32
3.14 เชื่อมที่ใช้ฉีตสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับกระจกนำไฟฟ้าขั้วเคาน์เตอร์	33
3.15 เครื่องมือปาดเคลือบที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks	33
3.16 บล็อกสกรีนผ้าที่ออกแบบสำหรับใช้กับเครื่องปาดเคลือบ	34
3.17 ชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบ	35
3.18 คีบกระจกนำไฟฟ้าใส่ลงบล็อกวางกระจก	36
3.19 หยดดักรีม TiO_2 ลงใต้ช่องบล็อกผ้าขนาด 0.7 cm x 0.7 cm	36
3.20 การนำกระจกที่ตัดแล้วมาติดลงบน SEM Stub	37
3.21 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการตรวจสอบความหนาของฟิล์ม TiO_2	38
3.22 โปรแกรม ImageJ	38
3.23 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye Absorption	39
3.24 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	40
3.25 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSC	42
3.26 เครื่อง Pyranometer	43
3.27 Silicon Reference Cell	43
3.28 การหนีบขั้วไฟฟ้ากับเซลล์	43
4.1 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือก่อนเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวาของฟิล์ม	44
4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวาของฟิล์ม	45
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงของสีย้อมกับค่าความยาวคลื่นเมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 70°C โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 ต่อพื้นที่ 1 cm x 1 cm กับอุณหภูมิ การจุ่มสีย้อม โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ	51
4.6 เครื่องปาดเคลือบที่ได้จากการออกแบบ	54
4.7 ส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องปาดเคลือบ ได้แก่ (ก) DC Motor 12V, (ข) Flexible Coupling (ค) ชุด Bush Mounting (ง) ชุดแปรงปาด (จ) บล็อกวางกระจก ซึ่งอยู่ติดกับฐานของเครื่อง	54
4.8 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบ ได้แก่ (ก) ช่องเชื่อมต่อระหว่างชุดระบบควบคุมกับอุปกรณ์ต่างๆ (ข) ชุดปุ่มกดควบคุมแปรงปาด	55
4.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ ก่อนเผาจากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม	56
4.10 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ หลังเผาจากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม	57
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงของสีย้อมกับค่าความยาวคลื่นเมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70°C โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	59
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 ต่อพื้นที่ 1 cm x 1 cm กับอุณหภูมิ การจุ่มสีย้อม โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	59
4.13 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
DSSC	Dye – Sensitize Solar Cells
cm	Centimeter
eV	Electron Volt
TiO ₂	Titanium Dioxide
ZnO	Zinc Oxide
SnO ₂	Tin Oxide
ITO	Indium-doped Tin Oxide
FTO	Fluorine-doped Tin Oxide
SEM	Scanning Electron Microscope
W/m ²	วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
Pa	ปาสคาล
DI	Deionized Water
MW	Molecular Weight
°C	องศาเซลเซียส
S ₀	สถานะพื้น
S*	สถานะเร้า
S ⁺	โมเลกุลสีย้อมสีไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน
ν	ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
e ⁻	Electron
I ₃ ⁻	Tri-iodide Ion
I ⁻	Iodide Ion
AM	Air Mass
θ_z	Zenith Angle
P_{max} , <i>MPP</i>	Maximum Power Point
V_{oc}	Open Circuit Voltage
J_{sc}	Short Circuit Current
<i>FF</i>	Fill Factor
P_{in}	กำลังไฟฟ้าขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
V_{mp}	Maximum Power Voltage
J_{mp}	Maximum Power Current
η	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน
μ	ไมโคร
KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
PSE	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
PSE_{Hand}	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ได้จากเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ
$PSE_{Machine}$	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ได้จากเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ
$time_{Hand}$	เวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ
$time_{Machine}$	เวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ
ml	มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitize Solar Cell, DSSC) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

อย่างไรก็ตาม การผลิต DSSC ในระดับห้องปฏิบัติการ ยังมีอีกหลายขั้นตอนในการผลิตที่ขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล ทำให้ไม่สามารถรักษามาตรฐานการผลิตให้คงที่ได้ จึงต้องผลิต DSSC จำนวนมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงและต้องใช้เวลาในการผลิตมากเกินไป

ผู้ศึกษาจึงมีความต้องการที่จะศึกษาค้นคว้าและพัฒนากระบวนการผลิต DSSC ให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Percent Standard Error, PSE) น้อยลงโดยการปรับปรุงกระบวนการผลิตและออกแบบเครื่องมือขึ้นมาเพื่อใช้แทนขั้นตอนการผลิตด้วยมือมนุษย์ เพื่อยกระดับมาตรฐานการผลิต DSSC ให้สามารถทดแทนการผลิต DSSC เป็นจำนวนมากดังที่กล่าวไปข้างต้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการผลิต DSSC
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงกระบวนการผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งของ DSSC
- 3) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องปาดเคลือบที่ใช้ในการผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งของ DSSC
- 4) เพื่อผลิต DSSC ให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Percent Standard Error, PSE) น้อยลง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งของ DSSC โดยใช้อนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์
- 2) ผลิต DSSC ที่มีพื้นที่การทำงานขนาด 0.5 cm x 0.5 cm
- 3) ผลิตเครื่องมือเพื่อใช้ในการปรับปรุงเทคนิคการปาดเคลือบ

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของ DSSC
- 2) ศึกษาขั้นตอนการผลิต DSSC
- 3) ออกแบบและสร้างเครื่องมือเพื่อปรับปรุงเทคนิคการปาดเคลือบ

เอกสารนี้เป็น 4) ผลิต DSSC ด้วยมือและด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 5) วิเคราะห์และทำรายงานสรุปผลการทดลองอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1)	■	■								
2)		■	■	■						
3)					■	■				
4)						■	■	■	■	
5)								■	■	■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของ DSSC
- 2) ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิต DSSC
- 3) ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโปรแกรมในการออกแบบและควบคุมเครื่องมือ
- 4) สามารถออกแบบและสร้างเครื่องปาดเคลือบที่ใช้ในการผลิต DSSC ได้
- 5) สามารถผลิต DSSC ให้มีค่า PSE ลดลง
- 6) สามารถนำประสบการณ์ที่ได้จากการทำโครงการพิเศษไปเป็นแนวทางในการทำงานจริงในอนาคตได้

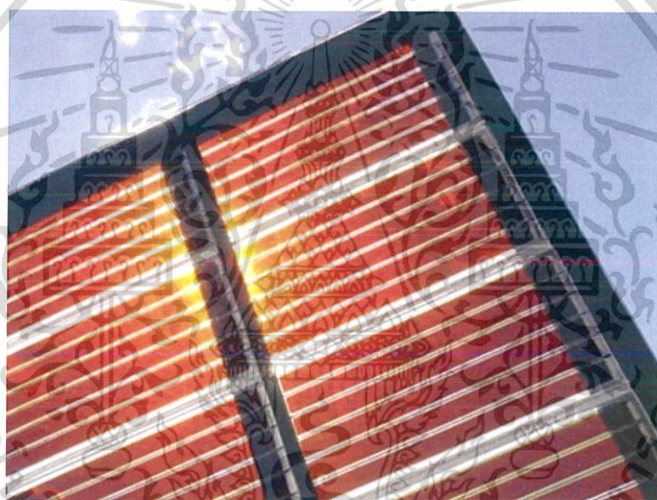
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye - Sensitized Solar Cell, DSSC) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในวงวิชาการและวงการพาณิชย์ เนื่องจากผลิตได้ง่าย สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความเข้มแสงต่ำและมีแนวโน้มที่จะผลิตในเชิงการค้าได้ในราคาที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกทางเลือกหนึ่งที่จะใช้แทนที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้ รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างโมดูลของ DSSC [1]



รูปที่ 2.1 โมดูลของ DSSC [2]

2.1.1 ส่วนประกอบของ DSSC

DSSC มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังรูปที่ 2.2 คือ ขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง, ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์และสารอิเล็กโทรไลต์ [3]

1) ขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working Electrode) หรือขั้วไฟฟ้าลบ ประกอบด้วย

- ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์

ชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะ รวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังวงจรภายนอกเซลล์อนุภาคที่ใช้จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น

- สีย้อมไวแสง

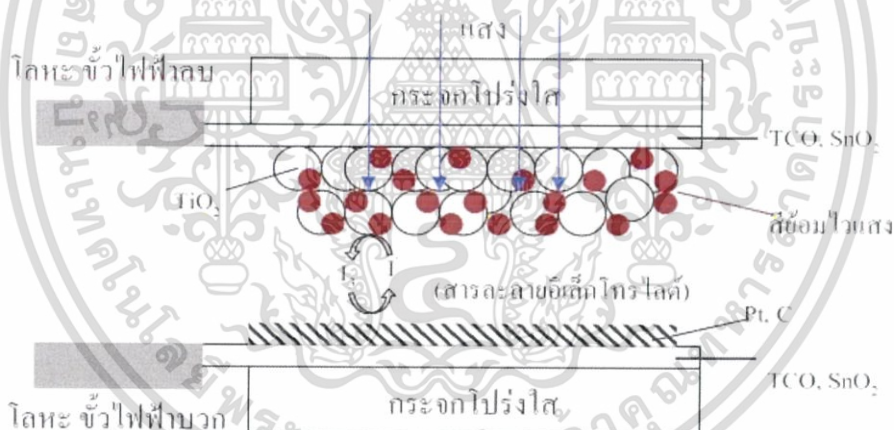
สีย้อมไวแสงเป็นส่วนประกอบที่เป็นที่มาของชื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีทั้งแบบสังเคราะห์ขึ้น เช่น สีย้อม N719 Black Dye Mercurochrome เป็นต้น และสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น สีย้อมจากผลเบอร์รี่ เป็นต้น โดยสีย้อมจะยึดเกาะอยู่ที่ผิวของชั้นอนุภาคของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงนี้ควรมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียร และยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

- กระจกนำไฟฟ้า

มีสมบัติโปร่งแสง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ในขณะเดียวกันก็ยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นผ่านได้ ซึ่งนิยมใช้สารอินเดียมทินออกไซด์ (Indium-doped Tin Oxide, ITO) และฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO) เป็นต้น

- ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter Electrode) หรือขั้วไฟฟ้าบวก

ทำหน้าที่รับและถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ ซึ่งนิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์ที่เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ DSSC [3]

- สารอิเล็กโทรไลต์

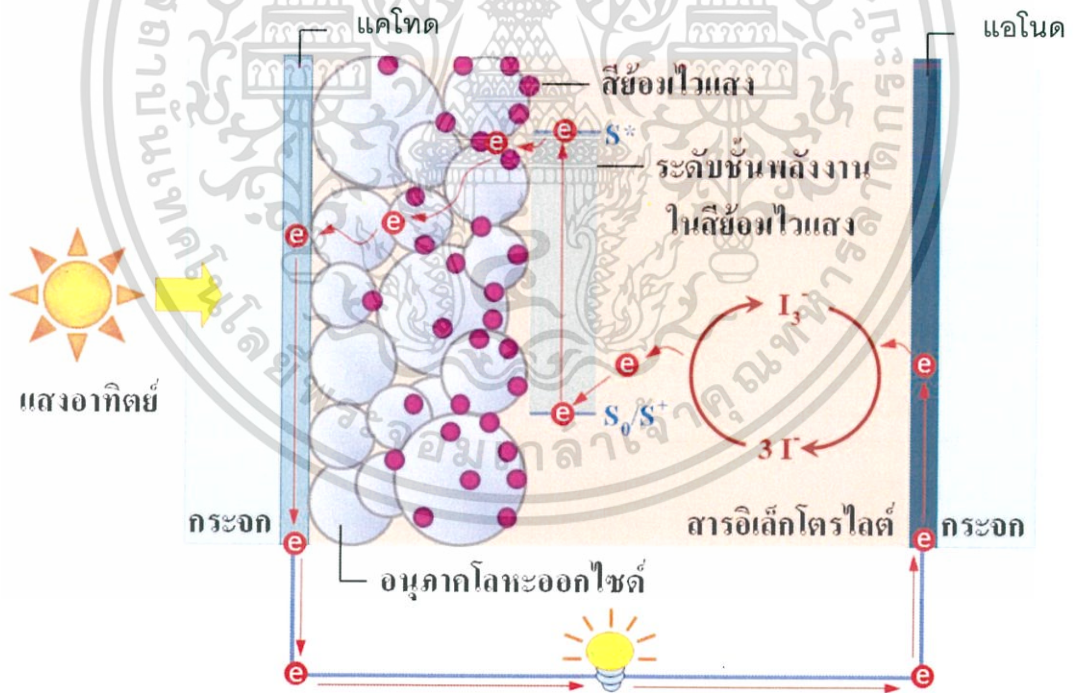
สารอิเล็กโทรไลต์เป็นชั้นส่งผ่านประจุที่มักอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักการแปลงพลังงานของ DSSC

หลักการทำงานของ DSSC จะคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงมีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 ดังนี้ [3]

- 1) แสงตกกระทบโมเลกุลสารย้อมสีไวแสงที่เกาะบนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ แล้วโมเลกุลของสีย้อมที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างรูพรุนของชั้นอนุภาคโลหะออกไซด์จะดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนในโมเลกุลสีย้อมจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้น (S_0) ไปอยู่ในสถานะเร้า (S^*)
- 2) อิเล็กตรอนในสถานะเร้า (S^*) ถูกส่งผ่านไปสู่อุปกรณ์นำไฟฟ้า (Conduction Band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
- 3) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังกระจกนำไฟฟ้าซึ่งเป็นขั้วแคโทดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์
- 4) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากวงจรภายนอกเซลล์แล้วอิเล็กตรอนวิ่งกลับไปขั้วแอโนด
- 5) ที่ขั้วแอโนด โลหะแพลทินัมจะเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยารีดอกซ์ ให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์รับอิเล็กตรอนและส่งอิเล็กตรอนคืนให้กับโมเลกุลสีย้อมสีไวแสง โมเลกุลสีย้อมสีไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) จึงคืนสภาพกลับสู่สถานะพื้น (S_0)



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบและการไหลของอิเล็กตรอนใน DSSC [1]

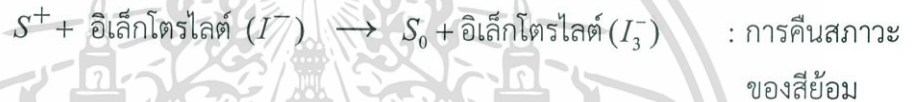
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

- ปฏิกิริยาที่ซัวร์เวิร์คกิง (ซัวร์แคโทด)



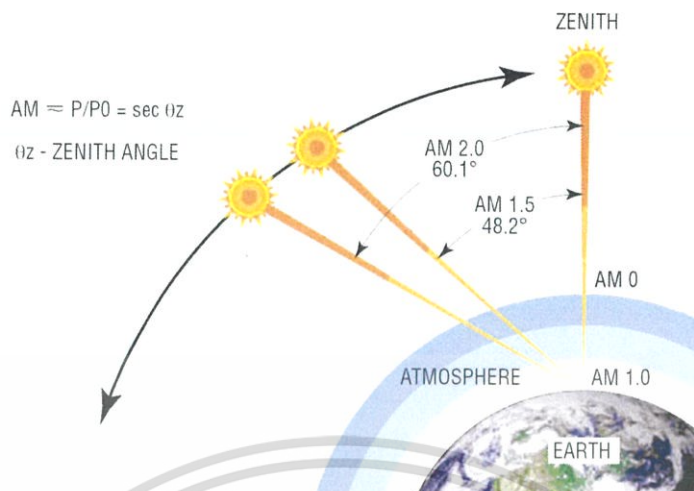
- ปฏิกิริยาที่ซัวร์แคโนเตอร์ (ซัวร์แอโนด)



2.1.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

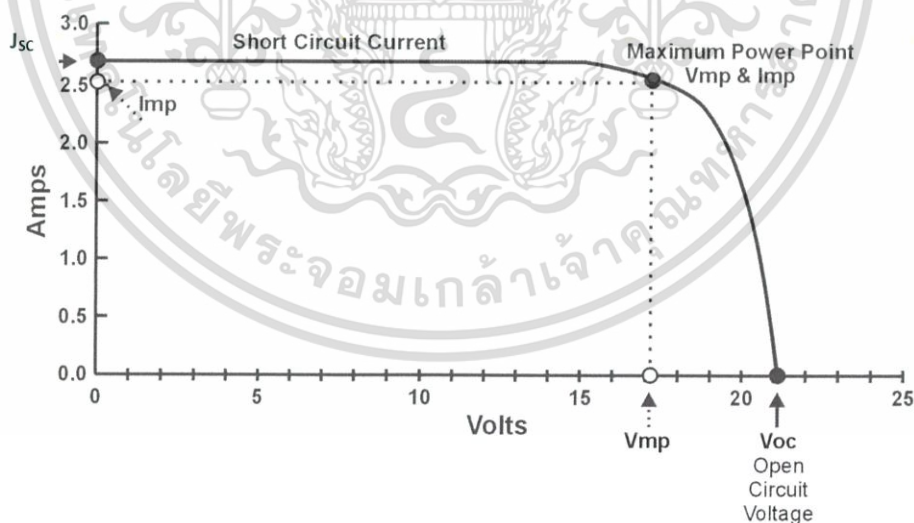
ชั้นบรรยากาศส่งผลต่อพลังงานรวมและความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวโลกซึ่งสามารถแสดงด้วยดัชนีที่เรียกว่า มวลอากาศ (Air mass, AM) ค่า AM หาได้จาก $1/\cos\theta_z$ โดยที่ θ_z เป็นค่ามุมที่อยู่ระหว่างแนวตั้งฉากกับระนาบระดับและแนวลำแสงดวงอาทิตย์ หรือ มุมซินิกซ์ (Zenith Angle) เช่น เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะ $\theta_z = 0^\circ$ ดังนั้น มีค่า AM เท่ากับ 1.0 และนอกชั้นบรรยากาศกำหนดว่าค่า AM เท่ากับ 0 สำหรับการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะนิยมศึกษาภายใต้ความเข้มแสง AM เท่ากับ 1.5 นั่นคือเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะ $\theta = 48.2^\circ$ ดังรูปที่ 2.4 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์กระทบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับค่ามวลอากาศ [5]

สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ (J - V Characteristic) ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปที่ 2.5 มีจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP, P_{max}) [4] ตัวอย่างประสิทธิภาพของ DSSC ที่สร้างด้วยสารกึ่งตัวนำและสีย้อมไวแสงชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 ลักษณะกราฟ J - V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณได้จาก

$$n = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% , \quad P_{\max} = J_{SC} \times V_{OC} \times FF \quad (2.1)$$

เมื่อ J_{SC} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short - Circuit Current Density)

V_{OC} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด (Open - Circuit Voltage)

FF คือ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)

P_{in} คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบบ 1000 W/m^2

P_{\max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด หน่วย W/m^2

- ค่า fill factor คำนวณได้จาก

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{SC} V_{OC}} \quad (2.2)$$

เมื่อ J_{mp} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Current Density)

V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างประสิทธิภาพของ DSSC ที่สร้างด้วยสารกึ่งตัวนำและสีย้อมไวแสงชนิดต่างๆ [3]

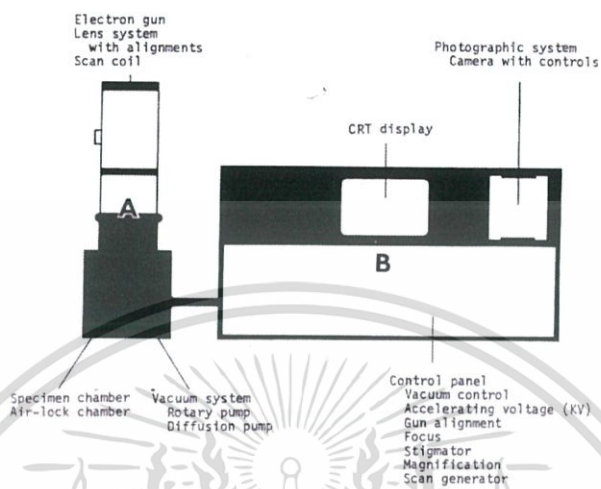
สารกึ่งตัวนำ	สีย้อมไวแสง	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η_{global} (%)	ความเข้มแสง (mW/cm ²)
TiO ₂	RuL ₂ (μ -(CN)Ru(CN)L"') ₂) ₂	12.0	0.60	7.1	100 (AM 1.5)
TiO ₂	Black Dye	20.5	0.72	10.4	100 (AM 1.5)
TiO ₂	N3	18.0	0.72	10.0	100 (AM 1.5)
TiO ₂	A natural cyanin-dye	1.5	0.40	0.56	100 (AM 1.5)
SnO ₂ /ZnO	N3	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

เมื่อ L = 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic
L" = 2,2'-bipyridine

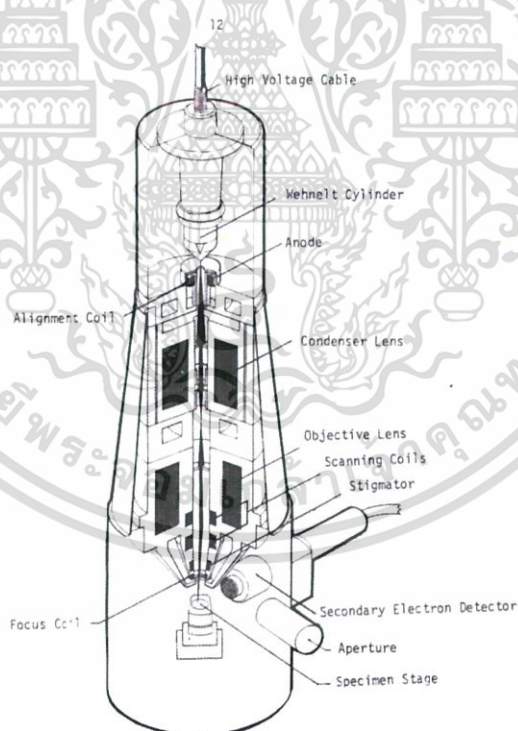
2.1.4 การตรวจสอบความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) บนขั้วเวิร์คกิ้ง (Working Electrode) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [7]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างง่ายๆ ที่เห็นได้ชัด 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังรูปที่ 2.6 คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลวงเรียกว่า Column และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า Console Unit ทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัดเพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของ SEM จะขาดอย่างใดอย่างหนึ่งไปไม่ได้ เพราะ Column ยังประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ภายในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ Column อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูกจัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกัน ส่วนภายใน Console Unit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศและระบบถ่ายภาพนั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบ เช่น การควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน Column จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ Console Unit นอกเหนือจาก Column และ Console Unit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับ SEM แล้วไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็นเช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ TEM คือ ระบบทำสุญญากาศ (Vacuum System) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Generator) และระบบทำความเย็น โดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (Water Cooling System)



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน Column (A) และ Console Unit (B) ของ SEM



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ

ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ซึ่งควรจะทราบถึงหลักการและเหตุผลพร้อมคำอธิบาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun)

อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงไฟจาก 110 Volts หรือ 220 Volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูง คือ ระหว่าง 1-30 Kilovolts ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่า Filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt Cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวย เมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 Volts จะไปเข้ามาสู่ Filament ลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศ ภายใน Column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (Anode Plate) ที่อยู่ด้านล่างของ Electron Gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนด คือ ลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electron Gun ซึ่งมี Filament และ Wehnelt Cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก Electron Gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ Electron Gun อยู่ในแนวตรงได้ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์ สนามแม่เหล็กภายใน Column ใน SEM สมัยใหม่ นอกจากจะมีปั๊มหรือสกรูที่ช่วยปรับ Electron Gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น Anode เพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรก ขดลวดดังกล่าวเรียกว่า Alignment Coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปั๊ม (Alignment Knobs) บนแผงของ Console Unit เหตุที่ต้องปรับ Electron Gun ก็เพื่อจะให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวออกไปจากศูนย์กลาง หากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)

2) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic Lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan Coil)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูสี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี Aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูขนาดต่างๆ กัน (50 μm – 400 μm) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ Aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ Aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปรวยที่สมมาตร Aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่าง เป็น Aperture พิเศษ เรียกว่า Objective Aperture มีไว้เพื่อกั้นกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆ บนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ ขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กวาดไป

บนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้ เรียกว่า Scan Coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์รับภาพ (CRT) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3) ช่องตัวอย่าง (Specimen Chamber)

ช่องตัวอย่างของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่าง คือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุม โดยใช้เฟืองขนาดต่างๆ เพื่อเลื่อนฐานนี้ไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า Goniometer Stage

4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & Scintillator)

เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ + ขนาด 30 - 250 Volts เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging Photographic Devices)

ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสง แสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด Photons นี้ไปเป็นอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอ CRT ที่ติดตั้งไว้บน Console Unit

2.1.5 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Percent Standard Error, PSE)

[8]

ค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Percent Standard Error, PSE) เป็นค่าที่ระบุความน่าจะเป็นของค่าเฉลี่ย หมายความว่า ถ้ามีการทดลองซ้ำจำนวนครั้งเท่ากับจำนวนครั้งที่วัดซ้ำ ค่าเฉลี่ยของแต่ละครั้งที่ทดลองซ้ำควรมีค่ากระจายแบบปกติ โดยมาจากการหาค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error, SE) ซึ่งคำนวณมาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ในกรณีที่มีการสุ่มตัวอย่างขนาด n โดยค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานนี้จะชี้บ่งถึงการกระจายหรือความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง (\bar{X}) ของแต่ละชุดตัวอย่างขนาด n ที่สุ่ม ซึ่งได้จากสมการ

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

เมื่อ n คือ จำนวนตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หาได้จาก ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.4)$$

ทำให้ได้ค่า PSE จากสมการ

$$PSE = \frac{SE}{MEAN} \times 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ *MEAN* คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

2.1.6 หลักการทำงานและส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

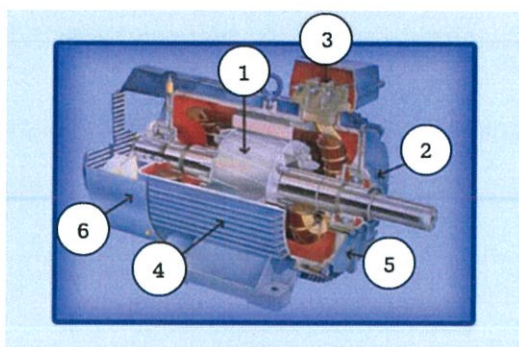
มอเตอร์ คือ เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยโครงสร้างมอเตอร์จะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทุกอย่าง จะมีข้อแตกต่างออกไปบ้างก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่าสภาพที่นำมาใช้งานแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไปจะเป็นชนิดเปิด (Open Type) กล่าวคือ ขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กจะพันเป็นแบบเปิดทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นกับลวดอย่างไรก็ตามเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องเดียว สามารถใช้ทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าได้ [10]

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

- 1) มอเตอร์แบบอนุกรมหรือเรียกว่าซีรี่ส์มอเตอร์ (Series Motor)
- 2) มอเตอร์แบบขนานหรือเรียกว่าชันทมอเตอร์ (Shunt Motor)
- 3) มอเตอร์ไฟฟ้าแบบผสมหรือเรียกว่าคอมเปาวด์มอเตอร์ (Compound Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตมาใช้งาน มีโครงสร้างและส่วนประกอบคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มีส่วนประกอบที่สำคัญเหมือนกัน มีรูปร่างลักษณะภายนอกคล้ายกัน แตกต่างกันตรงการนำไปใช้งาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดไฟฟ้าในรูปของแรงดันไฟตรงออกมา ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อย่างแรงดันไฟตรงให้มอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนเกิดพลังงานกลขึ้นมา ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.18 คือ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) คือขดลวดที่ถูกพันอยู่กับขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดกับโครงมอเตอร์ ทำหน้าที่กำเนิดขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) แทนแม่เหล็กถาวรขดลวดที่ใช้เป็นขดลวดอาน้ำยาล้วน สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟตรงให้มอเตอร์

2) ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces) คือแกนสำหรับรองรับขดลวดสนามแม่เหล็กถูกยึดติดกับโครงมอเตอร์ด้านใน ขั้วแม่เหล็กทำมาจากแผ่นเหล็กอ่อนบางๆ อัดซ้อนกัน (Lamination Sheet Steel) เพื่อลดการเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่จะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กลดลง ขั้วแม่เหล็กทำหน้าที่ให้กำเนิดขั้วสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุด แทนขั้วสนามแม่เหล็กถาวร ผิวด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กทำให้โค้งรับกับอาร์เมเจอร์พอดี

3) โครงมอเตอร์ (Motor Frame) คือส่วนเปลือกหุ้มภายนอกของมอเตอร์ และยึดส่วนอยู่กับที่ Stator ของมอเตอร์ไว้ภายในร่วมกับฝาปิดท้ายของมอเตอร์ โครงมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กให้เกิดสนามแม่เหล็กครบวงจร

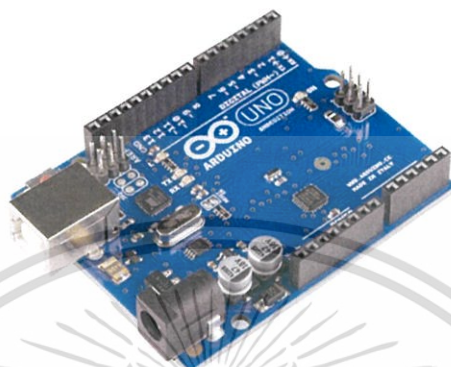
4) อาร์เมเจอร์ (Armature) คือส่วนเคลื่อนที่ Rotor ถูกยึดติดกับเพลา (Shaft) และรองรับการหมุนด้วยที่รองรับการหมุน (Bearing) ตัวอาร์เมเจอร์ทำจากเหล็กแผ่นบางๆ อัดซ้อนกัน ถูกเจาะร่องออกเป็นส่วนๆ เพื่อไว้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นขดลวดอาน้ำยาล้วน ร่องขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีขดลวดพันอยู่และมีลิมไฟเบอร์อัดแน่นซึ่งขดลวดอาร์เมเจอร์ไว้ ปลายขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อไว้กับคอมมิวเตเตอร์ แรงผลักดันของสนามแม่เหล็กทั้งสองทำให้อาร์เมเจอร์หมุนเคลื่อนที่

5) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) คือส่วนเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่ง ถูกยึดติดเข้ากับอาร์เมเจอร์และเพลา คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงแข็งประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก แต่ละแท่งทองแดงของคอมมิวเตเตอร์ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวนไมก้า (Mica) อาร์เมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เป็นขั้วรับแรงดันไฟตรงที่จ่ายมาจากแปรงถ่าน เพื่อส่งไปให้ขดลวดอาร์เมเจอร์

6) แปรงถ่าน (Brush) คือตัวสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทำเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผลิตมาจากคาร์บอนหรือแกรไฟต์ผสมผงทองแดง เพื่อให้แข็งและนำไฟฟ้าได้ดี มีสายตัวนำต่อร่วมกับแปรงถ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อไปรับแรงดันไฟตรงที่จ่ายเข้ามา แปรงถ่านทำหน้าที่รับแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่าย จ่ายผ่านไปให้คอมมิวเตเตอร์

2.1.7 การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย Arduino



รูปที่ 2.9 Arduino UNO R3 [13]

Arduino อ่านว่า อา-ดู-อี-โน้ หรือ อาดูยโน้ คือ Open Source Platform สำหรับการสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีจุดมุ่งหมายให้ Arduino Platform เป็น Platform ที่ง่ายต่อการใช้งานโดย Arduino Platform ประกอบไปด้วย [13]

1) ส่วนที่เป็น Hardware คือบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานหรือที่เรียกกันว่า บอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino เองก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ ซึ่งในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของบอร์ดหรือสเปค เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ, แรงดันไฟที่ใช้, ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างบอร์ด Arduino รุ่น UNO R3

2) ส่วนที่เป็น Software คือ

- ภาษา Arduino เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม MCU มีไวยากรณ์แบบเดียวกับภาษา C/C++

- Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino คอมไพล์โปรแกรม (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด (Upload)

Arduino ถูกใช้ประโยชน์ในลักษณะเดียวกับ MCU คือ ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตาม

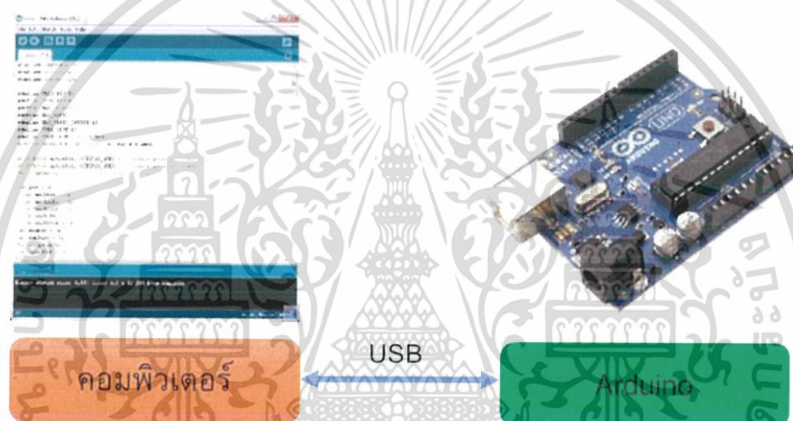
เงื่อนไขต่างๆ ที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Arduino ในชีวิตประจำวัน เช่น ระบบเปิด/ปิดไฟในบ้านอัตโนมัติ ระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ ระบบเปิด/ปิดประตูอัตโนมัติ ระบบเครื่องซักผ้าหยอดเหรียญ หรือ ใช้ควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เป็นต้น [13]

จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม คือ [13]

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community หรือกลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

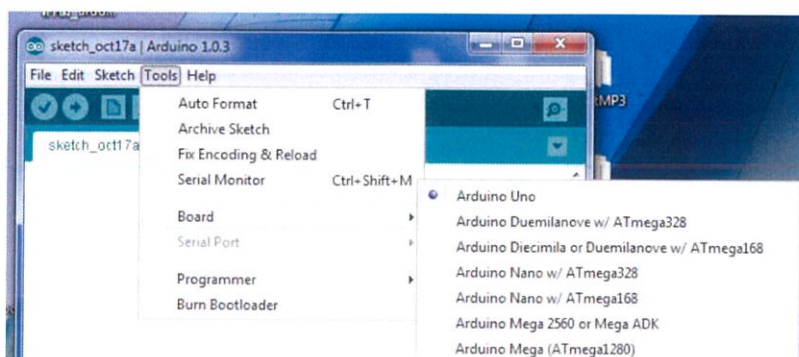
รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino [14]



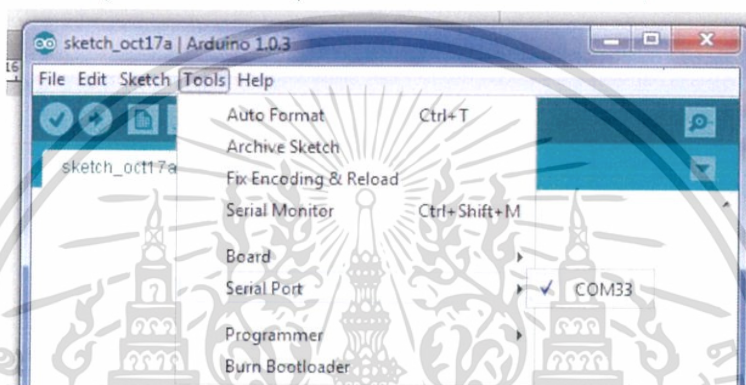
รูปที่ 2.10 การส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ไปยัง Arduino

- 1) เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม ArduinoIDE ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Arduino.cc/en/main/software
- 2) หลังจากเขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้ และหมายเลข Com Port ดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



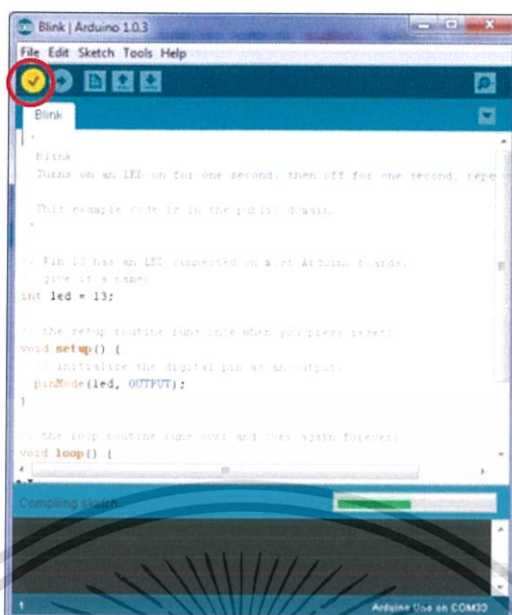
รูปที่ 2.11 เลือกบอร์ด Arduino ที่ต้องการ Upload



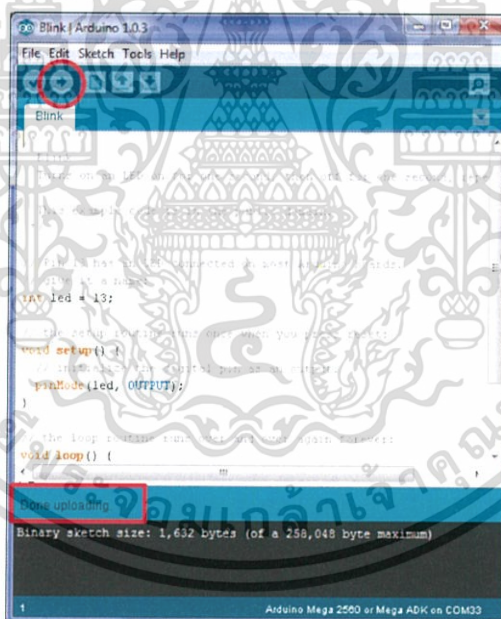
รูปที่ 2.12 เลือกหมายเลข Com Port ของบอร์ด

3) กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม ดังรูปที่ 2.13 จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done Uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที ดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



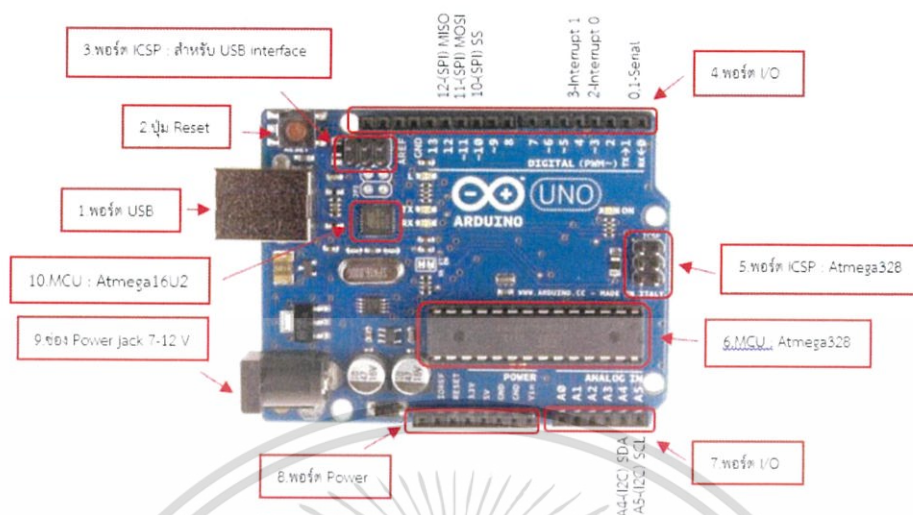
รูปที่ 2.13 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม



รูปที่ 2.14 Upload โค้ดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3) [13]



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆ ของ Arduino UNO R3

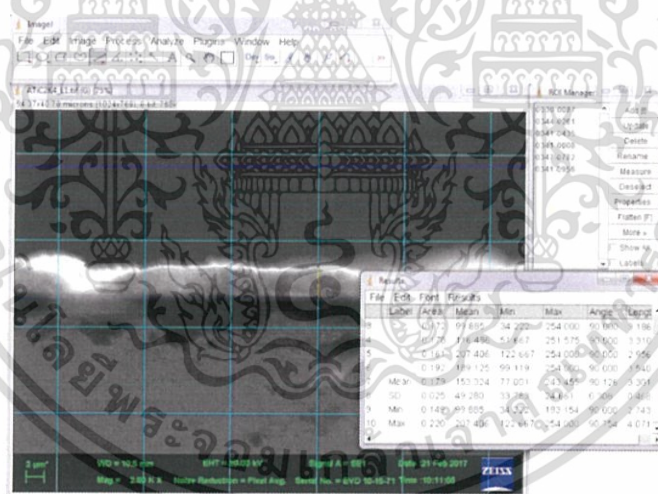
- 1) USBPort: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
- 2) Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
- 3) ICSP Port ของ Atmega16U2: เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Comport บน Atmega16U2
- 4) I/OPort: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0, 1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3, 5, 6, 9, 10 และ 11 เป็นขา PWM
- 5) ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
- 6) MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
- 7) I/OPort: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
- 8) Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอกประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
- 9) Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
- 10) MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.8 วัดความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM ด้วยโปรแกรม ImageJ [15]

ImageJ เป็นโปรแกรมที่มีประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยที่จำเป็นต้องวัดระยะหรือพื้นที่ของวัตถุนภาพที่ถ่ายจากกล้อง Microscope หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งทำงานโดยใช้คำสั่ง Analyze, Process และคำสั่งอื่นๆ บนทีกไฟล์ในรูปแบบ 8-bit, 16-bit, 32-bit และไฟล์ที่ตัวโปรแกรมอ่านได้ต้องบันทึกเป็นไฟล์ TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS หรือ raw ตัวโปรแกรมสามารถกำหนด Scale, Rotate, Flips ภาพได้ ซุมภาพได้และเปิดภาพพร้อมกันหลายภาพได้ สามารถคำนวณสัดส่วนพื้นที่และพื้นที่ของวัตถุนภาพได้ ในหน่วย Pixel ของรูปนั้นหรือหน่วยพื้นที่ตามมาตรฐาน เช่น ตารางมิลลิเมตร วัดระยะความยาวของวัตถุนภาพ วัดความหนาแน่นของรูปภาพแล้วแสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่ง จัดทำค่าต่างๆ ในรูปสถิติได้

ข้อดีของ ImageJ คือ การที่มันเป็นโปรแกรมแจกฟรี (Freeware) และอนุญาตให้ผู้ใช้แก้ไขตัวโปรแกรมและหา Plugin อื่นๆ เพื่อมาช่วยแก้ไขปัญหาในการวิเคราะห์ภาพ โดยสามารถศึกษาได้ในเว็บไซต์ของ ImageJ ในหมวด Plugin ที่มีการพัฒนามาให้ดาวน์โหลดใช้ได้และหากต้องการแก้ไข Code เอง ก็สามารถทำได้โดยการโหลดโปรแกรม BBEdit ซึ่งเป็นตัว Edit Code หรือโปรแกรม ANT ซึ่งเป็น Build Tool อีกหนึ่งตัวช่วยในการแก้ไข



รูปที่ 2.16 การใช้โปรแกรม ImageJ วัดความหนาของฟิล์ม TiO_2 จากภาพที่ถ่ายด้วยเครื่อง SEM

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [16]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นทำมาจากซิลิคอนเวเฟอร์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีราคาสูงมากเพราะต้องใช้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์จึงต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในกระบวนการผลิต ทำให้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมา หนึ่งในนั้นคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไว

แสง หรือ Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูง มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและใช้วัสดุราคาไม่แพง ทำให้ต้นทุนต่ำ เซลล์ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ติดตั้งบนอาคารและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของอาคารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีหลักการการทำงานโดยอาศัยกลไกทางปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่ทำจากอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ เช่น นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ นาโนซิงค์ออกไซด์ ทินออกไซด์ เป็นต้น สีย้อมไวแสง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

2.2.1 ตัวอย่างอุปกรณ์และวิธีการขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมไดออกไซด์และขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

DSSC มีโครงสร้างประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง (FTO glass), ไทเทเนียมไดออกไซด์ - เจล (TiO_2 - Gel), สีย้อมไวแสงชนิด N719 (Sensitizer Ruthenium N719), แพลทินัมเจล (Pt - Gel), แผ่นซีล (Sealant Sheet), สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Solution) ขั้นตอนการสร้างเริ่มต้นจากการนำกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง ขนาด $1.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ หนา 4 mm ไปทำความสะอาดโดยจุ่มในสารละลายเอทานอลภายในเครื่องอัลตราโซนิค ใช้เวลาประมาณ 15 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ต่อจากนั้นทำการสกรีนขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง โดยจะใช้บล็อกสกรีนเป็นผ้าสกรีนชนิดโพลีเอสเตอร์ เบอร์ผ้าสกรีน 61T mesh/cm เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นด้าย $60 \mu\text{m}$ รูเปิดของผ้าสกรีน $102 \mu\text{m}$ สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดของผ้าสกรีน 38.7% ความหนาของผ้าสกรีน $100 \mu\text{m}$ ปริมาตรหมึกพิมพ์ที่ใช้ต่อพื้นที่ $38.7 \text{ cm}^3/\text{m}^2$

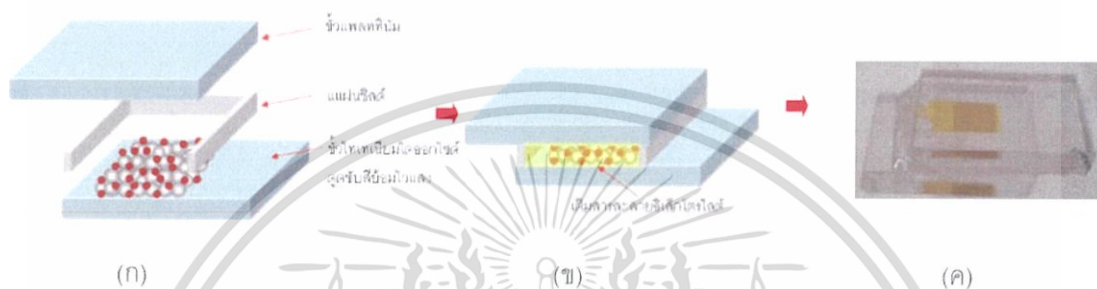
พื้นที่เซลล์ในการสกรีนอยู่ที่ $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ ต่อจากนั้นนำกระจกขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่ผ่านการสกรีนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วไปอบโดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที ถ้าหากต้องการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มก็สามารถทำได้โดยการสกรีนเพิ่มทีละชั้น (2-10 ชั้น) ตามลำดับ หลังจากสกรีนชั้นสุดท้ายแล้วจะอบ ที่อุณหภูมิ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และเผาต่อที่อุณหภูมิ $450 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที หลังจากทิ้งไว้ให้เย็นตัวแล้วก็นำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ไปจุ่มสารละลายสีย้อมไวแสง N719 ซึ่งผสมด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในอัตราส่วน (1 : 5) โดยจุ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบตามเวลาที่กำหนด นำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับสีย้อมไวแสงมาอบความร้อนที่อุณหภูมิ $80 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากฟิล์มและเก็บในที่สะอาดเพื่อรอการประกอบเป็นเซลล์ต่อไป

การสร้างขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ก็ใช้เทคนิคการสกรีนเช่นเดียวกันกับการสร้างขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้บล็อกสกรีนซึ่งใช้ผ้าสกรีนชนิดโพลีเอสเตอร์ เบอร์ผ้าสกรีน 90T mesh/cm เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นด้าย $40 \mu\text{m}$ รูเปิดของผ้าสกรีน $68 \mu\text{m}$ สัดส่วนของพื้นที่รูเปิดของผ้าสกรีน 38% ความหนาของผ้าสกรีน $62 \mu\text{m}$ ปริมาตรหมึกพิมพ์ที่ต้องใช้ต่อพื้นที่ $24 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ นำกระจกขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่ผ่านการสกรีนฟิล์มแพลทินัมแล้วไปอบที่อุณหภูมิ $100 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที และเผาต่อที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที ตามลำดับ หลังจาก 20 นาทีแล้วก็ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำไปประกอบเป็นเซลล์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ตัวอย่างการประกอบ DSSC

การประกอบ DSSC เริ่มต้นจากการนำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ดูดซับสีย้อมไวแสงมาประกบกับกระจกนำไฟฟ้าขั้วแพลทินัม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) โดยให้พื้นที่เซลล์ของแผ่นกระจกนำไฟฟ้าทั้งสองตรงกันซึ่งจะคั่นกลางระหว่างกระจกทั้งสองด้วยแผ่นซิล (SX 1170-60) ซึ่งมีความหนา 60 μm พื้นที่ช่องว่างของตัวแผ่นซิลจะใหญ่กว่าพื้นที่เซลล์ด้านละประมาณ 1 mm หลังจากประกอบเซลล์เสร็จแล้ว



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการประกอบ DSSC

จะใช้หัวแร้งเป็นตัวให้ความร้อนเพื่อให้แผ่นซิลละลายกลายเป็นกาวยึดติดกระจกนำไฟฟ้าทั้งสองเข้าไว้ด้วยกันอุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 100 - 120°C ต่อจากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกนำไฟฟ้าระหว่างพื้นที่เซลล์ทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) และปิดทับช่องว่างด้วยซิลิโคนเพื่อลดการระเหยของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ก็จะได้ DSSC ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ค)

2.2.3 การวัดประสิทธิภาพของ DSSC

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงอาทิตย์จำลองจากหลอด Xenon Lamp สเปกตรัมของแสงที่ใช้คือ AM 1.5 ก่อนทำการวัดทุกครั้งจะทำการสอบเทียบ เพื่อให้ได้กำลังแสงที่ตกกระทบพื้นที่เซลล์ที่ 100 mW/cm^2 โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนเป็นเซลล์อ้างอิง ซึ่งเซลล์อ้างอิงที่ใช้นี้ได้ผ่านการวัดประสิทธิภาพจากศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) การวัดคุณสมบัติ I - V โดยการไบอัสเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดกระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่อง Keithley Digital Source Meter Model 2400 ต่อระบบอินเตอร์เฟซกับเครื่องคอมพิวเตอร์และควบคุมการทำงานผ่านทางโปรแกรมแบบจำลอง LabView

จากการทดลองสร้าง DSSC ด้วยเทคนิคการสกรีน พบว่าอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นกุญแจสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อจำนวนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่สำหรับยึดเกาะของโมเลกุลสีย้อมไวแสงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กระแสและประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์ที่ได้คือ 3.28% ที่ความ

หนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ $15.72 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีจำนวนชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น โอกาสการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจน ในชั้นที่ 9 และ 10 ปริมาณกระแสลัดวงจรลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษากระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) โดยการพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคการปาดเคลือบโดยการออกแบบเครื่องปาดเคลือบสำหรับใช้ในการผลิต DSSC เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (PSE) ลดลง และจะอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของ DSSC ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1 – 3.3



การเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด (Counter Electrode)

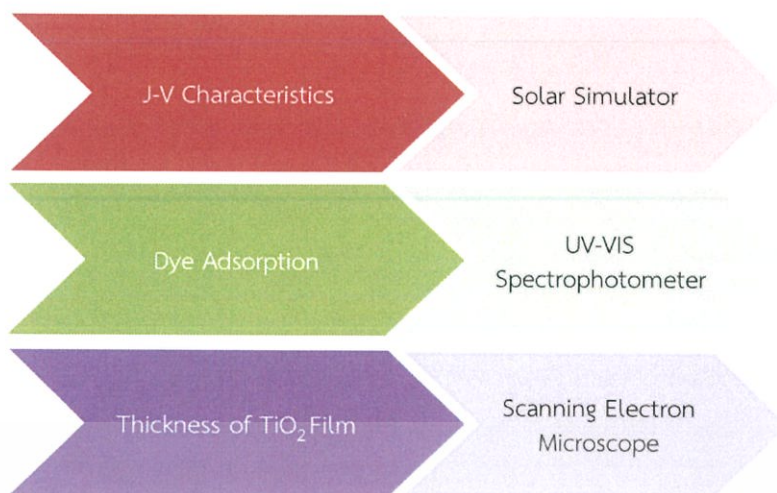
การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง (Working Electrode)

การเตรียมสีย้อม N719

การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การประกอบ DSSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียม DSSC ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



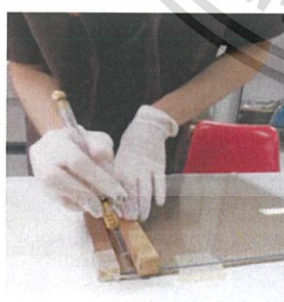
รูปที่ 3.3 เทคนิคการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของ DSSC

3.1 กระบวนการเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้เทคนิคการปาดเคลือบในการเตรียม DSSC ซึ่งในการจัดเตรียม DSSC มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้าและวิธีทำความสะอาดพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้า

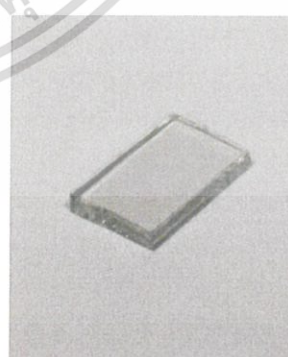
1) นำกระจกนำไฟฟ้า (FTO Glass, $7\Omega/\text{square}$) หนา 2.2 mm มาวัดขนาดช่องละ 1 cm ใช้มีดกรีดกระจกกรีดตามขนาดที่วัดไว้ ดังรูป 3.4 (ก) แล้วหักกระจกตามรอยที่กรีด ดังรูปที่ 3.4 (ข) จากนั้นนำกระจกที่หักเสร็จแล้วขนาดความกว้าง 1 cm มาแบ่งเป็นชิ้นวัดขนาดความยาว 1.5 cm ใช้มีดกรีดกระจกกรีดตามขนาดที่วัดไว้ ทำให้ได้กระจกนำไฟฟ้าตามขนาดที่ต้องการขนาด 1 cm x 1.5 cm ดังรูปที่ 3.4 (ค)



(ก)



(ข)

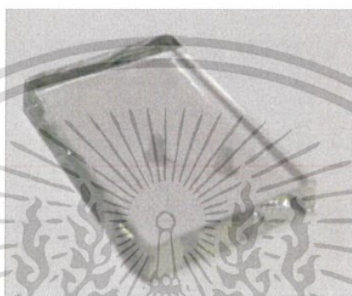


(ค)

รูปที่ 3.4 (ก) การใช้มีดกรีดกระจก (ข) หักกระจกตามรอยที่กรีดไว้ (ค) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 cm x 1.5 cm

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการตัดแล้วมาเจาะรู โดยใช้สว่านและดอกสว่านสำหรับเจาะกระจก วางกระจกนำไฟฟ้าไว้ในจานเพาะเชื้อ (Petri Dish) ที่มีน้ำบรรจุอยู่ (เพื่อลดอุณหภูมิและความเสียหายของกระจกนำไฟฟ้าขณะทำการเจาะกระจกนำไฟฟ้า) เจาะรู 2 รู โดยเจาะให้รูเรียงกันเป็นแนวทแยง ซึ่งรูของแนวทแยงจะต้องอยู่ในขนาดพื้นที่ $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ ดังรูปที่ 3.5 เพื่อใช้เป็นรูสำหรับฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปภายในเซลล์และอีกรูสำหรับให้อากาศที่ถูกละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปแทนที่ออกมาสู่ภายนอกเซลล์ได้ ซึ่งกระจกนำไฟฟ้าที่เจาะรูนี้จะถูกนำไปใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด



รูปที่ 3.5 กระจกที่จะใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทด

3) นำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเจาะรูสำหรับนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทดและกระจกนำไฟฟ้าที่ไม่ได้เจาะรูสำหรับนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง ทำความสะอาดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1) ล้างกระจกด้วยผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดครบสกปรก (น้ำยาล้างจาน) โดยเทน้ำยาล้างจานบนฟองน้ำ ผสมน้ำเล็กน้อย ถูฟองน้ำให้ทั่วกระจกแล้วล้างฟองออกด้วยน้ำสะอาด

3.2) ล้างกระจกด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionized Water, DI) เรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำ DI ลงในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner รุ่น Bandelin Sonorex Digitec DT100(H)) ดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 15 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.6 เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3) ล้างกระจกด้วยอะซิโตน (Acetone) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทอะซิโตนลงในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

3.4) ล้างกระจกด้วยน้ำ DI เรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำ DI ลงในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

3.5) ล้างกระจกด้วยเอทานอล (Ethanol) โดยเรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทเอทานอลลงในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

3.6) ล้างกระจกด้วยน้ำ DI เรียงกระจกลงในบีกเกอร์ เทน้ำ DI ลงในบีกเกอร์ให้ท่วมกระจกแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

4) นำกระจกที่ผ่านกระบวนการล้างเสร็จแล้ว เก็บไว้ในภาชนะปิดที่บรรจุน้ำ DI โดยให้ปริมาณน้ำ DI ท่วมกระจก ถ้านำไปใช้งานทันทีให้นำกระจกไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF55) ที่อุณหภูมิ 105 °C สังเกตจนกว่ากระจกจะแห้งจึงนำออกจากตู้อบ

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (Counter Electrode)

1) อุปกรณ์และสารเคมี

1.1) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 cm x 1.5 cm

1.2) เข็มฉีดยา

1.3) บล็อกสกรีนขนาด 0.7 cm x 0.7 cm

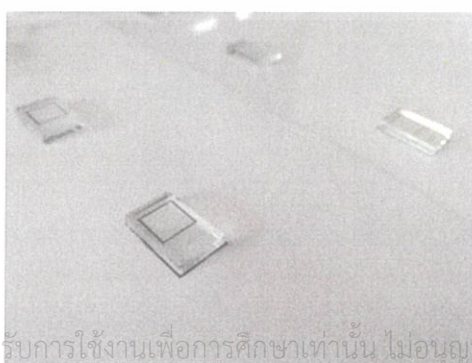
1.4) โวลต์มิเตอร์

1.5) สารละลายแพลทินัม (Pt)

1.6) เตาเผา (Homemade Furnace)

2) การเตรียมขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

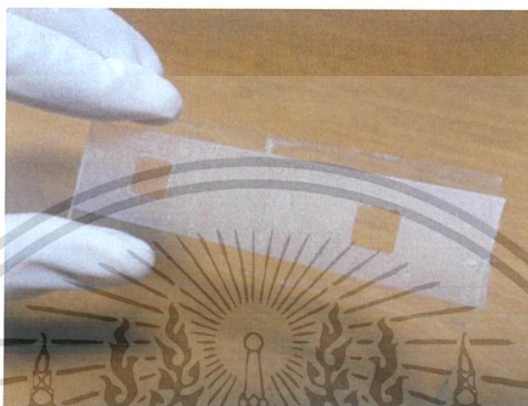
2.1) กระจกนำไฟฟ้าขนาด 1 cm x 1.5 cm ที่ผ่านการเจาะรูสำหรับฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์และทำความสะอาดแล้ววางลงบนกระดาษที่ถูกคลุมทับด้วยแผ่นฟิล์มถนอมอาหาร เพื่อให้กระจกไม่เยื้องขณะวางกระจกลง ดังรูปที่ 3.7 โดยวางให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งรูปที่ 3.7 การวางกระจกลงบนกระดาษที่ถูกคลุมทับด้วยแผ่นถนอมอาหารที่มีการนำไปใช้

2.2) นำบล็อกสกรีน (สติ๊กเกอร์ ยี่ห้อ Scotch Magic™ Tape 810 ขนาด 18 mm x 33 mm) ดังรูปที่ 3.8 ทาบลงบนกระจกด้านนำไฟฟ้า โดยให้บริเวณของบล็อกสกรีนอยู่บนพื้นผิวกระจก ยึดกระจกกับพื้นรองให้แน่น

2.3) ใช้เข็มฉีดยาดูดสารละลายแพลทินัมแล้วหยดใส่ในบริเวณบล็อกสกรีนจำนวน 2 หยด รอนจนสารละลายแพลทินัมแห้ง



รูปที่ 3.8 บล็อกสกรีน (สติ๊กเกอร์)

2.4) นำกระจกที่เคลือบสารละลายแพลทินัมแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับค่าอุณหภูมิของเตาเผาให้สูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องนาทีละ 10 °C จนถึง 450 °C

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมไวแสง N719

1) ส่วนประกอบในการเตรียมสารละลายสีย้อมไวแสง N719 ความเข้มข้น 0.5 mM

- สีย้อมไวแสง N719 (Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II) (MW 1187.7 g/mol))

- เอทานอล (Ethanol) บริษัท vwr BDH prolabo ชนิด Ethanol Absolute AnalaR NORMAPUR (MW 46.07 g/mol)

2) เตรียมปริมาณสาร

- สีย้อมไวแสง N719 จำนวน 0.1246 g

- เอทานอล จำนวน 210 ml

3) นำสีย้อมไวแสง N719 เทลงภาชนะ (โหลสุญญากาศ) ที่เตรียมไว้แล้วเทเอทานอลทั้งหมด (210 ml) ลงไป ปิดฝาภาชนะให้สนิทแล้วห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันแสง

4) จากนั้นนำไปกวนบนเครื่อง Hot Plate & Stirrer (Fisher Scientific Hot Plate/Stirrer, 11-100-49SH) ดังรูปที่ 3.9 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้ได้สีย้อมไวแสง N719 ความ

เข้มข้น 0.5 mM ส่วนนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่อง Hot Plate & Stirrer

3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

1) อุปกรณ์และสารเคมี

- 1.1) กระจก้นำไฟฟ้าขนาด 1 cm x 1.5 cm
- 1.2) กระจกสไลด์
- 1.3) บล็อกสกรีนขนาด 0.7 cm x 0.7 cm
- 1.4) โวลต์มิเตอร์
- 1.5) เต้าเผา
- 1.6) เครื่อง Hot Plate & Stirrer
- 1.7) ครีมไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.8) หลอดทดลอง

2) ขั้นตอนการเตรียมครีมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ส่วนประกอบของครีมไทเทเนียมไดออกไซด์

- ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25)
- เอทานอล (Ethanol) ความหนาแน่น 0.79 M (MW 46.07 g/mol)
- ตัวประสาน

โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

2.1) ทำการเตรียมตัวประสาน โดยผสมสารต่างๆ เข้าด้วยกัน ดังนี้

- เอทิลเซลลูโลส (Ethy Cellulose บริษัท Sigma-Aldrich chemistry)

จำนวน 0.5 g

- โทลูอีน (Toluene) จำนวน 8.767 ml
- เอทานอล (Ethanol) จำนวน 2.408 ml

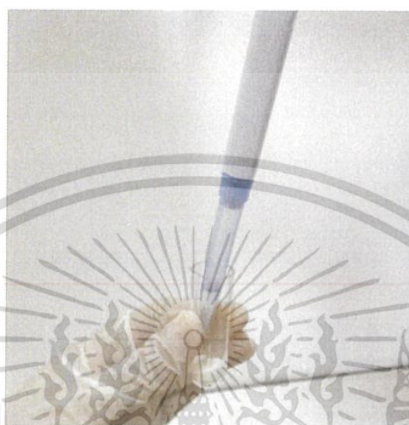
2.2) ทำการเตรียมปริมาณของสาร ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนผงไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 0.1 กรัม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งเอทานอล (MW 46.07 g/mol) จำนวน 0.3 ml ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวประสาน จำนวน 1 ml

2.3) นำ Magnetic Bar ขนาด 60 mm^2 ใส่หลอดทดลอง เทงไทเทเนียมไดออกไซด์ เอทานอลและตัวประสาน ในจำนวนที่เตรียมไว้ลงไปในห้องทดลอง ดังรูปที่ 3.10 ปิดจุกหลอดทดลองให้แน่น

2.4) นำหลอดทดลองไปเข้าเครื่อง Hot Plate & Stirrer ดังรูปที่ 3.9 กวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 การเติมเอทานอลลงในหลอดทดลองที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่

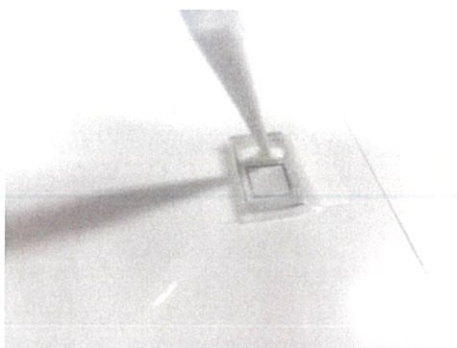
3) การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง

3.1) นำกระดาษนำไฟฟ้าขนาด $1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่ทำความสะอาดแล้ววางลงบนกระดาษที่ถูกคลุมทับด้วยแผ่นฟิล์มถนอมอาหารเพื่อให้กระดาษไม่เขี้ยวขณะวางกระดาษ ดังรูปที่ 3.7 โดยวางให้ด้านนำไฟฟ้าหงายขึ้น

3.2) นำบล็อกสกรีน (สติ๊กเกอร์ ยี่ห้อ Scotch Magic™ Tape 810 ขนาด $18 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$) ดังรูปที่ 3.8 ทาบลงบนกระดาษนำไฟฟ้า โดยให้บริเวณของบล็อกสกรีนอยู่บนพื้นผิวกระดาษ ยึดกระดาษกับพื้นรองให้แน่น

3.3) ใช้แปรงสีฟันชุบไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วหยดใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีนที่ติดอยู่บนกระดาษ ดังรูปที่ 3.11 ใช้กระดาษสไลด์ ดังรูปที่ 3.12 ปาดครีมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เต็มบล็อกสกรีนโดยตอนปาดครีมให้เอียงกระดาษเล็กน้อย รอจนครีมไทเทเนียมไดออกไซด์แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ดูดคริมไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วหยดใส่บริเวณขอบด้านล่างของบล็อกสกรีน



รูปที่ 3.12 กระจกสไลด์

3.4) นำกระจกที่เคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยปรับค่าอุณหภูมิของเตาเผาให้สูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องนาที่ละ 10 °C จนถึง 450 °C

3.5) ปล่อยกระจกที่ผ่านการเผาทิ้งไว้ประมาณ 1 - 2 ชั่วโมงหรือจนกว่ากระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วเก็บไว้ในบริเวณที่ควบคุมความชื้น

3.6) นำกระจกที่เคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และผ่านกระบวนการเผาแล้วไปจุ่มสีย้อม N719 โดยมีเงื่อนไขของการจุ่มสีย้อมที่ผู้ศึกษาสนใจที่จะศึกษา ดังนี้

อุณหภูมิสีย้อม N719 (°C)	ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อม (นาที)
30, 50 และ 70	30

3.7) ทำความสะอาดกระจกโดยเช็ดส่วนของสีย้อมที่เกินออกมาจากพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ขั้นตอนการประกอบ DSSC

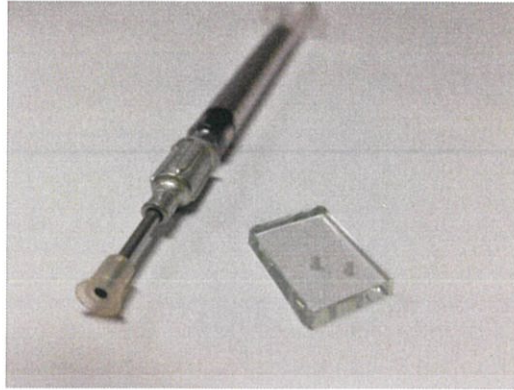
- 1) ส่วนประกอบเซลล์และอุปกรณ์ประกอบเซลล์
 - 1.1) กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง
 - 1.2) กระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์
 - 1.3) บล็อกพาราฟิล์มขนาด 0.5 cm x 0.5 cm
 - 1.4) เครื่อง Hot Plate & Stirrer (รุ่น Fisher Scientific Hot Plate/Stirrer, 11-100-49SH)
 - 1.5) คีมคีบ
 - 1.6) ตุ่มน้ำหนักขนาด 200 g
 - 1.7) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Mosalyte TDE – 250)
- 2) วิธีการประกอบเซลล์
 - 2.1) นำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งวางบนพื้นผิวเรียบ จากนั้นใช้คีมคีบบล็อกพาราฟิล์มทาบลงบนกระจกโดยให้บริเวณบล็อกตรงกับพื้นที่เซลล์
 - 2.2) จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์มาประกบ โดยให้บริเวณที่เคลือบแพลทินัมตรงกับช่องของบล็อกพาราฟิล์ม
 - 2.3) จากนั้นนำเซลล์ที่ประกบแล้วไปวางบนเครื่อง Hot Plate ที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้ตุ่มน้ำหนัก 200 g วางทับลงบนเซลล์เป็นเวลา 30 วินาที ดังรูปที่ 3.13 ใช้คีมคีบเซลล์ออกจากเครื่อง Hot Plate



รูปที่ 3.13 ใช้ตุ่มน้ำหนัก 200 g วางทับบนเซลล์

- 2.4) จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Mosalyte TDE – 250) โดยใช้เข็มฉีดยา ดังรูปที่ 3.14 เข้าไปตรงรูข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปแทนที่อากาศภายในเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

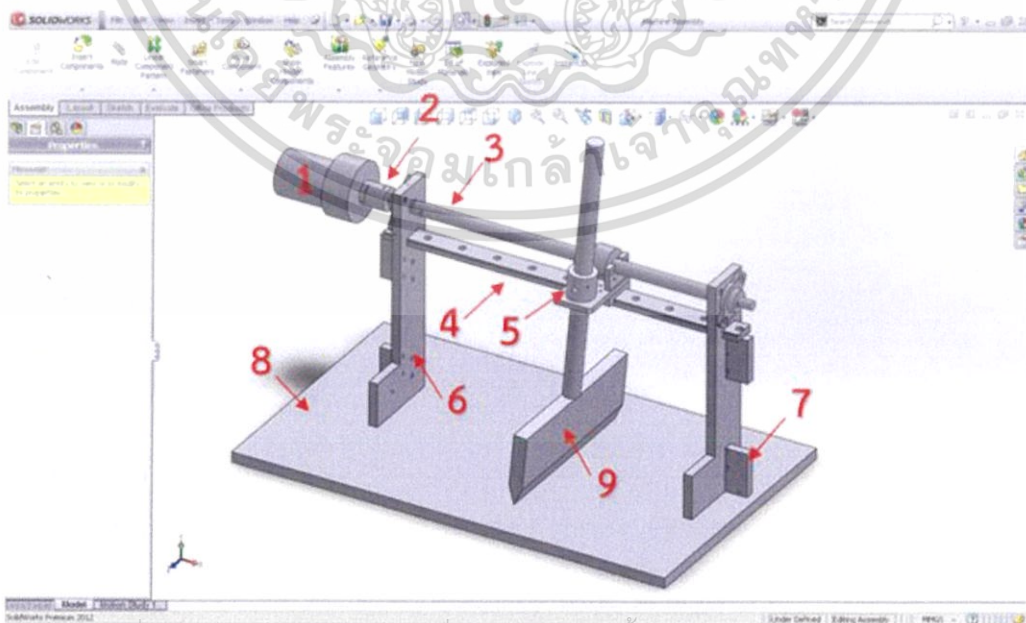


รูปที่ 3.14 เข็มที่ใช้ฉีดสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับกระจกนำไฟฟ้าขั้วแคโทด

2.5) หลังจากนั้นปิดรูสำหรับเติมสารละลายอิเล็กโตรไลต์ด้วยเทปใสเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ จะทำให้ได้ DSSC ที่เสร็จสมบูรณ์สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติของ DSSC ต่อไป

3.2 กระบวนการออกแบบเครื่องปาดเคลือบที่ใช้สำหรับปรับปรุงกระบวนการผลิต DSSC

ผู้ศึกษาได้ออกแบบเครื่องมือที่ใช้แทนเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง โดยใช้โปรแกรม Solidworks (เวอร์ชัน 2012) ได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งเครื่องปาดเคลือบมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกห่างจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และต้องขออนุญาตใช้เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

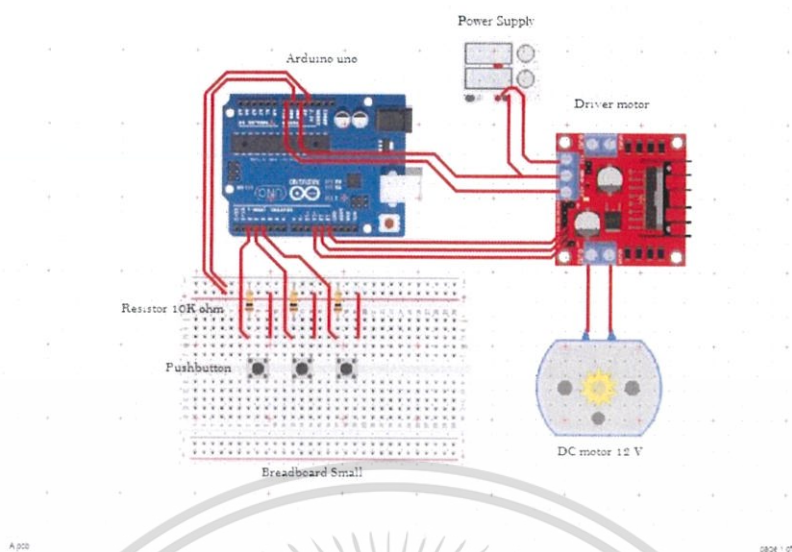
- 1) Motor: ทำหน้าที่ขับเคลื่อนแปรงปาด โดยใช้ DC Motor 12 V มีค่า rpm = 1000
 - 2) Flexible Coupling: ใช้ส่งผ่านการหมุนและแรงบิดจากเพลาด้านกำลังไปยังเพลาคู่มือ โดย Coupling ชนิดนี้สามารถช่วยลดผลเสียของความเยื้องศูนย์ และปกป้องเครื่องจากแรงบิดผิดปกติ
 - 3) Lead Screw: เป็นเกลียวนำของแท่นกลึงรูปยาวตามแนวนอน ทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่ในแนวหมุนเป็นการเคลื่อนที่ในเชิงเส้น
 - 4) Linear: เป็นรางเลื่อนที่ช่วยในการเลื่อน Bush Mounting ให้เคลื่อนที่เมื่อ Lead Screw หมุน หากไม่มีราง Linear จะทำให้ Bush Mounting ไม่เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง
 - 5) Bush Mounting: ทำหน้าที่ล็อกเสาของแปรงปาด โดยจะยึดให้เสาของแปรงเอียง 5°
 - 6) Slide Column: เป็นเสาที่ทำหน้าที่ประคองส่วนประกอบในข้อ 1) - 5) โดยต้องวางเสาทั้งสองให้ขนานกันและต้องวางเสาให้ตั้งฉากกับฐานของเครื่องด้วย
 - 7) Bracket: ทำหน้าที่ยึด Slide Column ให้แข็งแรง
 - 8) Base Plate: เป็นฐานของเครื่องปาดเคลือบขนาด 50 cm x 30 cm หนา 1.2 cm
 - 9) แปรงปาด: จะนำไปใส่กับ Bush Mounting ในเครื่อง เพื่อใช้ในการปาดครีမ် TiO_2 โดยใช้ยาง Polyurethane รูปตัว V หนา 0.9 cm ความแข็ง 75 Shore
- นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบสไลด์บนบล็อกสกรีนผ้าเพื่อนำมาใช้แทนบล็อกสติกเกอร์ โดยที่แต่ละช่องที่จะสกรีนครีမ် TiO_2 ลงไปมีขนาด 0.7 cm x 0.7 cm ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 บล็อกสกรีนผ้าที่ออกแบบสำหรับใช้กับเครื่องปาดเคลือบ

หลังจากออกแบบเครื่องมือทุกอย่างเสร็จแล้ว จึงได้ออกแบบชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบ ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบ

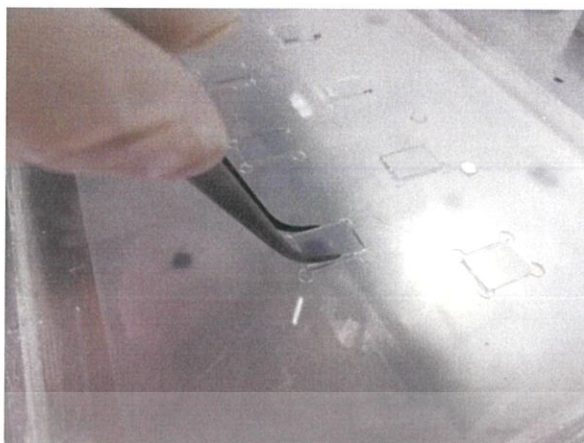
- 1) Arduino UNO R3: ทำหน้าที่สั่งการและควบคุมการทำงานของ Driver Motor เพื่อไปควบคุมมอเตอร์โดย Upload โค้ดที่เขียนไว้ลงบอร์ด Arduino
- 2) Driver Motor: รุ่น L298N Dual H-Bridge Motor Controller รับกระแสได้สูงสุด 2A และรับไฟเลี้ยงจาก Power Supply ได้ 5 - 12 V ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ทั้งหมด 2 Channel
- 3) Push Button: ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแปรงปาดในทิศทางที่ต้องการตามเงื่อนไขของ Code Arduino ที่เขียนไว้
- 4) Resistor 10K Ω : นำมาต่อเข้ากับ Push Button เป็นการต่อแบบ Pull Down ควบคุมลอจิก

3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

หลังจากออกแบบเครื่องปาดเคลือบเสร็จแล้ว จึงได้นำเครื่องปาดเคลือบมาใช้พัฒนากระบวนการเตรียม DSSC ในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1) ใช้ที่คีบคิบบัรจกที่เตรียมไว้ใส่ลงบล็อกวางกระจกขนาด 1 cm x 1.6 cm โดยหยากกระจกด้านนำไฟฟ้าขึ้น ดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 คีบกระจกนำไฟฟ้าใส่ลงบล็อกวางกระจก

2) นำบล็อกสกรีนผ้าวางครอบลงบนฐานวางกระจกให้ตรงกับตำแหน่งที่ต้องการ แล้วนำครีม TiO_2 ที่เตรียมไว้แล้วหยดลงใต้ช่องบล็อกขนาด $0.7 \text{ cm} \times 0.7 \text{ cm}$ ดังรูปที่ 3.19 จากนั้นกดปุ่มให้เครื่องปาดไปตามระยะที่เขียนโปรแกรมไว้ รอให้เครื่องปาดเสร็จจึงนำบล็อกสกรีนผ้าออก



รูปที่ 3.19 หยดครีม TiO_2 ลงใต้ช่องบล็อกผ้าขนาด $0.7 \text{ cm} \times 0.7 \text{ cm}$

3.4 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ DSSC

3.4.1 การวัดความหนาของครีม TiO_2 ที่เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง

- การวัดความหนาของครีม TiO_2

ความหนาของครีม TiO_2 ที่เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า สามารถตรวจสอบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยที่เครื่องนี้จะใช้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งความเร็วเป็นแหล่งที่มาของการส่องสว่าง กลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสีเพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนใช้

กลายเป็นลำ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์

- ขั้นตอนการวัดความหนาของฟิล์ม TiO_2

- 1) นำกระจกนำไฟฟ้าที่มีฟิล์ม TiO_2 เคลือบอยู่ตัดครึ่งในแนวตัดขวาง
- 2) นำกระจกที่ตัดไปติดบน SEM Stub โดยเอาส่วนตัดขวางขึ้น ดังรูปที่ 3.20
- 3) นำ Stub ที่ติดตัวอย่างไปวางบน Stage ของเครื่อง SEM
- 4) เปิดเครื่อง SEM (EVO MA10) ดังรูปที่ 3.21 พร้อมเลื่อน Stage เพื่อให้ได้ตำแหน่ง

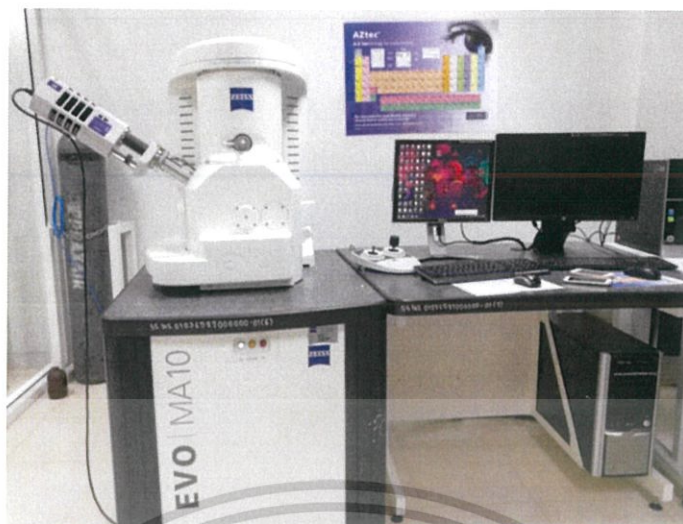
ที่ต้องการตรวจสอบความหนาของฟิล์ม TiO_2

- 5) สังเกตผลที่ได้ซึ่งสามารถดูได้จากคอมพิวเตอร์
- 6) บันทึกภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.20 การนำกระจกที่ตัดแล้วมาติดลงบน SEM Stub

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการตรวจสอบความหนาของฟิล์ม TiO_2

7) นำรูปที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM มาวัดความหนาของฟิล์ม TiO_2 ด้วยโปรแกรม ImageJ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 โปรแกรม ImageJ

8) นำค่าความหนาของฟิล์มที่วัดได้จากโปรแกรม ImageJ มาคำนวณหาค่า PSE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง N719 (Dye Absorption)

- การคำนวณค่า Dye Absorption

ค่า Dye Absorption หาได้จากสมการ

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3.1)$$

ตามหลักการของ Beer- Lambert Law หรือ Beer's law จะได้สมการ

$$A = \epsilon lc \quad (3.2)$$

เมื่อ A = Absorbance

ϵ = absorptivity

l = ระยะทางที่แสงผ่าน

c = ความเข้มข้น

- การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye Absorption

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า Dye Absorption แสดงดังรูปที่ 3.23

- 1) Spectrophotometer (AvaTes)
- 2) แหล่งกำเนิดแสง (SCHOTT รุ่น MEGALIGHT100)
- 3) แท่นจับยึดคิวเวทท์
- 4) สาย Fiber Optic ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในทางเทคนิคและ/หรือข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 3.23 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการวัดค่า Dye Absorption ที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนการวัดค่า Dye Absorption

1) เปิดโปรแกรม AvaSoft 7.4

2) นำสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ปริมาณ 2 ml ใส่คิวเวทท์ (Cuvette) ที่วางอยู่บนแท่นจับยึดคิวเวทท์ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมสารละลาย KOH มีดังนี้

2.1) ส่วนประกอบของสารละลาย KOH

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (MW 56.11 g/mol) ดังรูปที่ 3.24 จำนวน 0.02244 g

- น้ำปลอดประจุ (Deionized water) (MW 18.02 g/mol) ปริมาณ 200 ml

2.2) นำ KOH เทใส่บีกเกอร์ จากนั้นเทน้ำปลอดประจุทั้งหมดลงไปปิดฝาให้แน่น

สนิท

2.3) นำไปผ่านกระบวนการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner ให้ KOH ละลายในน้ำปลอดประจุจนกลายเป็นสารละลาย KOH



รูปที่ 3.24 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

3) เปิดแหล่งกำเนิดแสง

4) บันทึกค่า Absorbance ของสารละลาย KOH โดยใช้โปรแกรม

5) นำสารละลาย KOH ปริมาณ 2 ml ใส่ลงไปหลอดทดลอง จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งใส่ลงไปหลอดทดลองแล้วรอให้สียอมหลุดออกมาจากฟิล์มจนหมด

6) นำสารละลาย KOH ที่มีโมเลกุลของสียอมไวแสงผสมอยู่ปริมาณ 2 ml ใส่คิวเวทท์แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสียอม N719 โดยใช้โปรแกรม

7) นำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์หาปริมาณสียอมที่ถูกดูดซับ (Dye Absorption) บนฟิล์ม

ไทเทเนียมไดออกไซด์พื้นที่ 0.5 cm x 0.5 cm และคำนวณหาค่า PSE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 กระบวนการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSC

การวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ DSSC ภายใต้ค่าความเข้มแสงที่มวลอากาศ (Air Mass, AM) เท่ากับ 1.5

- การคำนวณค่าประสิทธิภาพของ DSSC

การบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของ DSSC สามารถบอกได้ด้วยค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (η) ได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก (P_{\max}) ต่อกำลังของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบน DSSC (P_{in}) คูณด้วย 100%

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

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short - Circuit Current Density)

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open - Circuit Voltage)

- การคำนวณค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor, FF)

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (3.4)$$

เมื่อ J_{mp} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Current Density)

V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Voltage)

- ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของ DSSC สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังสมการ

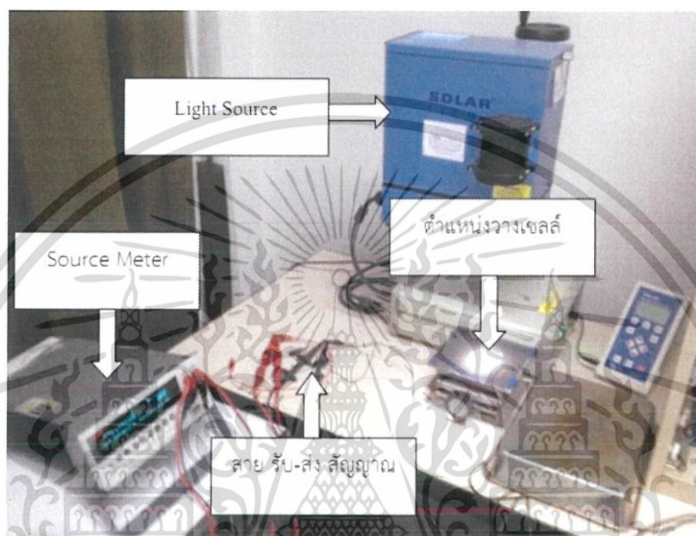
$$n = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\%, \quad P_{\max} = J_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (3.5)$$

เมื่อ P_{\max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด หน่วย W/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดประสิทธิภาพของ DSSC โดยใช้เครื่อง Solar - Simulator ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.25 ดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) (Solarlight รุ่น XPS-300)
- 2) เครื่อง 2400 Broad Purpose SourceMeter บริษัท KEITHLEY
- 3) สายรับ - ส่ง สัญญาณ
- 4) Silicone Reference Cell (s/n: 1369)



รูปที่ 3.25 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSC

- ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของ DSSC

- 1) จัดอุปกรณ์สำหรับวัดประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.25
- 2) เปิดแหล่งกำเนิดแสง ตั้งค่า Lamp Output ต่ำสุด ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
- 3) ทดสอบความเข้มแสง โดยใช้เครื่อง Pyranometer ดังรูปที่ 3.26 ปรับระดับของหลอดไฟจนได้ค่ากำลังของแสงเท่ากับ 1000 W/m^2
- 4) เปิดโปรแกรม Peccell JV Curve Analyzer
- 5) ทดสอบระบบโดยใช้ Silicon Reference Cell ดังรูปที่ 3.27
- 6) นำ DSSC ที่เตรียมไว้ไปวัดค่าประสิทธิภาพ โดยหนีบสายส่งสัญญาณกับขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์ ดังรูปที่ 3.28 (ขั้วบวกหนีบกับขั้วไฟฟ้าแคโทด : ขั้วลบหนีบกับขั้วไฟฟ้าแอโนด)
- 7) นำ DSSC ไปวางตรงกลางของแสงที่ได้ปรับค่าไว้ โดยหงายขั้วไฟฟ้าแอโนดขึ้น
- 8) บันทึกผลของการวัดค่าประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรม Peccell JV Curve Analyzer และคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (PSE)

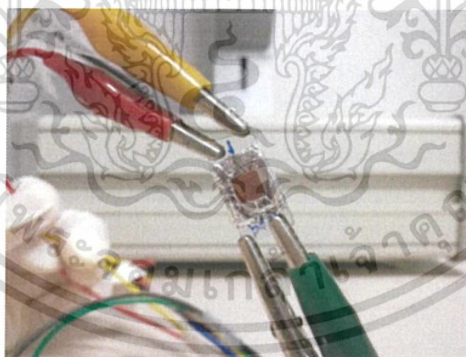
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 เครื่อง Pyranometer



รูปที่ 3.27 Silicon Reference Cell



รูปที่ 3.28 การหนีบขั้วไฟฟ้ากับเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ผู้ศึกษาต้องการปรับปรุงเทคนิคการปาดเคลือบ (Doctor Blade) โดยการออกแบบเครื่องปาดเคลือบสำหรับใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ผู้ศึกษาจึงได้ผลิต DSSC ด้วยเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือและเครื่องปาดเคลือบที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการผลิต DSSC โดยศึกษาและเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (PSE) ในแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ปริมาณการดูดซับสีย้อม N719 ของ TiO_2 สมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC และเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO_2

4.1 ผลการทดลองเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

4.1.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2

เมื่อนำกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบฟิล์ม TiO_2 โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือไปวัดความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาและหลังเผาด้วยเครื่อง SEM ได้ผลดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำรูปไปเปรียบเทียบกับผลการวัดความหนาของฟิล์มในแต่ละด้านที่วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผานั้นมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งฟิล์มและความหนาของฟิล์ม TiO_2 หลังเผาในแต่ละตำแหน่งนั้นมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งฟิล์มเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2 สาเหตุอาจเกิดจากเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือไม่สามารถควบคุมแรงกดและความเร็วที่ใช้ในการปาดให้เท่ากันได้ทุกครั้ง ความหนาของฟิล์มจึงไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งบล็อกสติกเกอร์ขนาด 0.7 cm x 0.7 cm



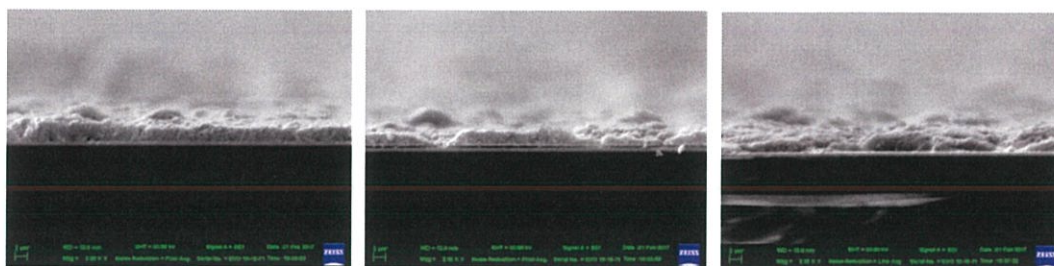
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือก่อนเผา จาก

กล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ของฟิล์ม ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวาของฟิล์ม

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาและหลังเผา โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

พารามิเตอร์ ตัวอย่างฟิล์ม	ความหนา เฉลี่ย (μm)	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)	ค่าความคลาด เคลื่อนมาตรฐาน (μm)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)
ก่อนเผา	3.840	0.273	0.157	4.101
หลังเผา	2.473	0.816	0.471	19.059

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 เฉลี่ย ทั้งก่อนเผาและหลังเผา (ตารางที่ 4.1) พบว่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มก่อนเผามีค่ามากกว่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มหลังเผา และค่า PSE ของฟิล์มก่อนเผามีค่าน้อยกว่าฟิล์มหลังเผา ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเมื่อนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตัวทำละลายและตัวประสานจะสลายตัวออกไปหมดจนเหลือแต่ TiO_2 ทำให้เนื้อฟิล์มหลังเผาจะบางกว่าและมีรอยแตกมากกว่าเนื้อฟิล์มก่อนเผา ความหนาของฟิล์มหลังเผาแต่ละตำแหน่งจึงมีโอกาสที่จะแตกต่างกันได้มากขึ้น

4.1.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO_2

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม TiO_2 โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่ต้องใช้เวลานานในการเตรียม ซึ่งในขั้นตอนการเตรียม TiO_2 ด้วยเทคนิคนี้ เริ่มจากการตัดบล็อกสติกเกอร์ให้ได้ขนาด $0.7\text{ cm} \times 0.7\text{ cm}$ การวางกระจกบนฐานวางกระจก การนำบล็อกติดลงบนกระจก การหยดแล้วปาดครีม TiO_2 และการแกะบล็อกออกจากกระจก ซึ่งเมื่อทำการทดลองจับเวลาเอกสารในการเตรียมฟิล์ม TiO_2 จำนวน 20 ชิ้น จะได้เวลาในการเตรียมเฉลี่ยทั้งหมด 37 นาที ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีของ N719 ของ TiO_2

ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีของ TiO_2 โดยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อคำนวณหาจำนวนโมลของสี N719 ที่เกาะอยู่บน TiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

การคำนวณหาจำนวนโมลของสี N719 ที่เกาะอยู่บน TiO_2 ทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่า Absorbance (A) จาก Beer-Lambert Law ดังสมการที่ 4.1

$$A = \epsilon c l \quad (4.1)$$

โดยที่ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (Molar absorptivity, ϵ) ของสี N719 มีค่าเท่ากับ $1.41 \times 10^4 \text{ dm}^3\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่น 515 nm สามารถนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสี (c) ได้ และนำค่าความเข้มข้นของสารละลายสีมาคำนวณหาจำนวนโมลของสีที่เกาะอยู่ TiO_2 บนพื้นที่ $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ ได้จากสมการที่ 4.2 และคำนวณหาจำนวนโมลของสีที่เกาะอยู่ TiO_2 บนพื้นที่ $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ได้จากสมการ 4.3 ผลการคำนวณเป็นดังตารางที่ 4.2

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

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

เมื่อ n = จำนวนโมล

c = ความเข้มข้นของสารละลาย

v = ปริมาตรของสารละลาย

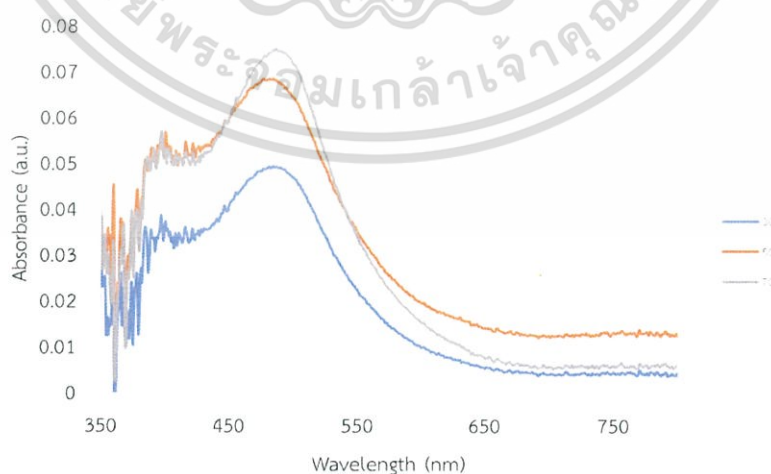
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณจำนวนโมลของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนฟิล์ม TiO₂ ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

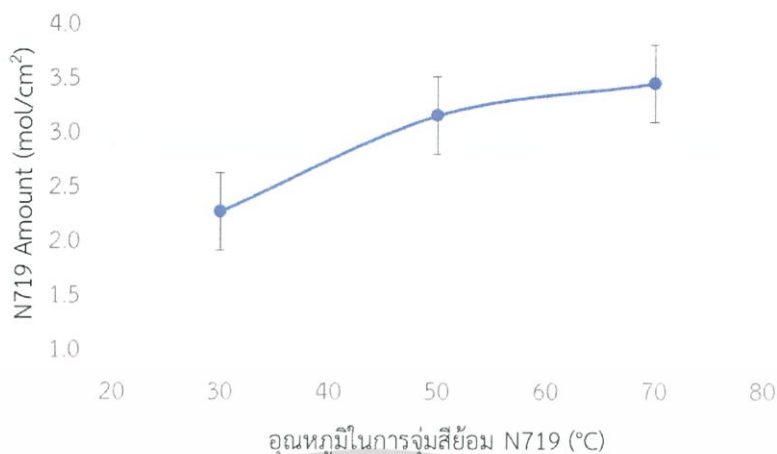
อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	N719 × 10 ⁻⁸ (mol/cm ²)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mol/cm ²)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (mol/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	2.24987	0.73999	0.33093	14.70901
50	3.13447	1.20318	0.53808	17.16649
70	3.43228	0.73955	0.33074	9.63607

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่า pH ของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิของสีย้อม N719 (°C)	ค่า pH จำนวนครั้ง					ค่า pH เฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
	1	2	3	4	5		
	30	6.87	6.86	6.87	6.88		
50	6.72	6.75	6.73	6.71	6.72	6.73	0.68
70	6.62	6.61	6.62	6.59	6.63	6.61	0.68



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงของสีย้อมกับค่าความยาวคลื่นเมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70°C โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 ต่อพื้นที่ 1 cm x 1 cm กับอุณหภูมิการจุ่มสีย้อม โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการย้อมสีต่อปริมาณสีย้อมที่ได้โดยการคำนวณจำนวนโมลการดูดซับสีย้อมของ TiO_2 ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 °C ซึ่งได้จากขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่จุ่มสีย้อม N719 เป็นเวลา 30 นาที (ตารางที่ 4.2) การวัดค่า pH ของเอทานอล (ตารางที่ 4.3) ค่าความหนืดของเอทานอล [17] และการสังเกตปริมาณตะกอนของสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ (ตาราง 4.5) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม ความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อม การเกิดตะกอนของสีย้อม และค่าความหนืดของเอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายของสีย้อมล้วนมีผลต่อปริมาณการดูดซับของสีย้อมที่วัดได้ดังนี้ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งไปละลายในสารละลาย KOH เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.4) ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น สารละลายสีย้อมมีเอทานอลเป็นตัวทำละลายเมื่อสารละลายสีย้อมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเอทานอลจะมีความเป็นกรดมากขึ้นดังจะเห็นได้จากค่า pH ของสารละลายสีย้อมที่ตรวจวัดได้ค่าความเป็นกรดที่สูงขึ้น สภาวะความเป็นกรดอาจส่งผลทำให้อนุภาคของ TiO_2 บางส่วนละลายออก ทำให้ขนาดของอนุภาค TiO_2 เล็กลงหรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้ TiO_2 ดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณสีย้อมก็จะมีมากขึ้นนอกจากนี้เมื่อสารละลายสีย้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้นยังส่งผลให้เอทานอลมีความหนืดลดลงดังตารางที่ 4.4 สารละลายสีย้อมที่มีความหนืดลดลงจะสามารถซึมผ่านชั้นของ TiO_2 ได้ดีขึ้นทำให้ขั้วสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้นกว่าสารละลายที่มีความหนืดสูง อย่างไรก็ตามตรวจพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไม่ได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการจุ่มสีย้อมถึง 70°C ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทั้งนี้อาจเกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมที่มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น(ตารางที่ 4.5) ตะกอนของสีย้อมเหล่านี้แม้จะทำให้ตรวจพบปริมาณสีย้อมได้สูงแต่อาจไม่สามารถใช้ผลต่ออิเล็กตรอนที่นำไปใช้งานได้เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมไม่ได้สร้างพันธะกับ TiO_2 โดยตรง สำหรับค่า PSE ของจำนวนโมลในการดูดซับสีย้อม

ย่อมอาจเกิดจากความหนาของฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่ใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืด (Viscosity) ของเอทานอลที่อุณหภูมิต่างๆ [17]

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

ตารางที่ 4.5 ปริมาณตะกอนของสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิของสีย้อม N719 (°C)	ปริมาณตะกอน (g)
30	0.0003
50	0.0008
70	0.0013

4.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC

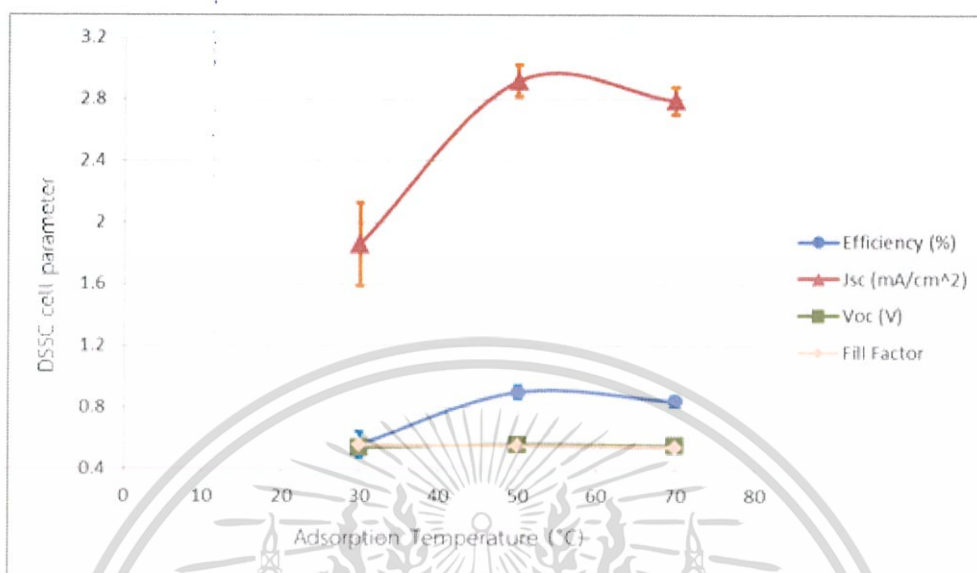
ผู้ศึกษาได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC โดยการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSC ในพื้นที่การทำงาน $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ ภายใต้ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ต่อพื้นที่ (Solar Power Irradiance) 1000 W/m^2 สมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC หาได้จากการวัด J และ V ด้วยเครื่อง Solar Simulator และคำนวณค่า J_{sc} , V_{oc} , Fill Factor และ Efficiency ด้วยโปรแกรม Peccell IV Curve Analyzer 2.1 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.6 เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

พารามิเตอร์ อุณหภูมิใน การจุ่มสีย้อม (°C)	V _{oc}		J _{sc}		Fill Factor		Efficiency	
	ค่าเฉลี่ย (V)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย (mA/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)
30	0.54	0.93	1.86	14.25	0.56	1.79	0.56	14.29
50	0.56	0.89	2.92	3.42	0.55	0.91	0.90	4.44
70	0.55	0.91	2.79	3.05	0.54	4.63	0.84	3.57

จากตาราง 4.6 นำค่า J_{sc} , V_{oc} , Fill Factor และ Efficiency มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

จากรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_{sc}) มีแนวโน้มเดียวกับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Efficiency) แสดงให้เห็นว่าค่า J_{sc} ส่งผลต่อค่า Efficiency มากที่สุด โดยผลของ J_{sc} และค่า Efficiency เป็นดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	ตัวอย่างที่	J_{sc} (mA/cm ²)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA/cm ²)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (mA/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	1	2.12	0.53	0.27	14.25
	2	1.10			
	3	2.30			
	4	1.92			
	ค่าเฉลี่ย	1.86			
50	1	2.92	0.20	0.10	3.42
	2	3.15			
	3	2.94			
	4	2.65			
	ค่าเฉลี่ย	2.92			
70	1	2.99	0.17	0.09	3.05
	2	2.64			
	3	2.88			
	4	2.67			
	ค่าเฉลี่ย	2.79			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ

อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	ตัวอย่างที่	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	1	0.67	0.16	0.08	14.29
	2	0.33			
	3	0.66			
	4	0.59			
	ค่าเฉลี่ย	0.56			
50	1	0.91	0.08	0.04	4.44
	2	0.97			
	3	0.94			
	4	0.79			
	ค่าเฉลี่ย	0.9			
70	1	0.91	0.06	0.03	3.57
	2	0.87			
	3	0.77			
	4	0.81			
	ค่าเฉลี่ย	0.84			

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 เป็นตารางแสดงค่า J_{sc} และค่า Efficiency ในการจุ่มสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 °C โดยที่อุณหภูมิ 50 °C DSSC มีค่า J_{sc} และค่า Efficiency สูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 70 และ 30 °C ตามลำดับ

นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลกับค่า PSE ของค่า Efficiency มากที่สุดคือค่า J_{sc} (ตารางที่ 4.7) ซึ่งขั้นตอนที่ส่งผลต่อค่า J_{sc} จะเกิดขึ้นจากการผลิตเซลล์ในขั้นตอนเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง ซึ่งเทคนิคการเตรียมด้วยมือนี้ไม่สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้

ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ออกแบบเครื่องมือเพื่อใช้แทนเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ เพื่อลดค่า PSE ในการผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง โดยผลการทดลองจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 ผลการออกแบบเครื่องปาดเคลือบเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต DSSC

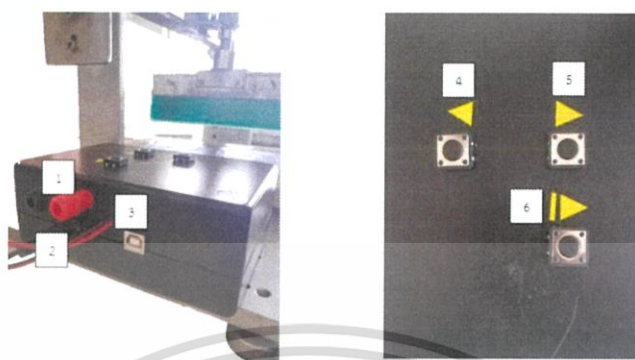
จากการออกแบบเครื่องปาดเคลือบที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ทำให้ได้เครื่องปาดเคลือบดังรูปที่ 4.6 และมีส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องปาดเคลือบ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องปาดเคลือบ ได้แก่ (ก) DC Motor 12V (ข) Flexible Coupling (ค) ชุด Bush Mounting (จ) ชุดแปรงปาด (ฉ) บล๊อควางกระจก ซึ่งอยู่ติดกับฐานของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ยังมีส่วนที่เป็นชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบซึ่งได้ใส่ไว้ในกล่องควบคุม ดังรูปที่ 4.8 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดระบบควบคุมเครื่องปาดเคลือบ ได้แก่ (ก) ช่องเชื่อมต่อระหว่างชุดระบบควบคุมกับอุปกรณ์ต่างๆ (ข) ชุดปุ่มกดควบคุมแปรงปาด

- 1) ช่องเชื่อมต่อ Power Supply
- 2) ช่องเชื่อมต่อ Adaptor
- 3) ช่องเชื่อมต่อ USB ของ Arduino
- 4) ปุ่มคำสั่ง เริ่ม/หยุด ให้แปรงปาด เลื่อนไปทางซ้าย
- 5) ปุ่มคำสั่ง เริ่ม/หยุด ให้แปรงปาด เลื่อนไปทางขวา
- 6) ปุ่มคำสั่ง ให้แปรงปาดไปทางขวามือและหยุดเองตามที่ได้เขียนโปรแกรมควบคุมไว้

เมื่อทดสอบการทำงานของเครื่องปาดเคลือบ โดยการกดปุ่มคำสั่ง 6) วัดเวลาและระยะทางของแปรงปาดเพื่อนำไปคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของแปรงปาด ซึ่งผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 โดยพบว่าการคำนวณระยะทางและเวลาในแต่ละครั้งที่ทดลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าอัตราเร็วมีค่าใกล้เคียงกันในระยะที่กำหนดไว้ด้วยเช่นกัน จึงนำเครื่องปาดเคลือบนี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง โดยผลการทดลองจะแสดงในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบอัตราเร็วของแปรงปาดในเครื่องปาดเคลือบ

ระยะทาง (cm)	เวลา (s)	อัตราเร็ว (cm/s)
9.30	1.25	7.44
9.10	1.23	7.40
9.20	1.24	7.42
9.20	1.24	7.42
9.50	1.27	7.48
เฉลี่ย (cm/s)		7.43

4.3 ผลการทดลองเตรียม DSSC โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

4.3.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2

เมื่อนำกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบฟิล์ม TiO_2 โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปวัดความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาและหลังเผาด้วยเครื่อง SEM ได้ผลดังรูปที่ 4.9 เมื่อนำรูปไปเปรียบเทียบกับผลการวัดความหนาของฟิล์มในแต่ละด้านที่วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ ได้ผลดังตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาในแต่ละช่วงนั้นมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งฟิล์ม และความหนาของฟิล์ม TiO_2 หลังเผาในแต่ละตำแหน่งนั้นมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งฟิล์มเช่นกัน ดังรูปที่ 4.10 สาเหตุอาจเกิดจากเนื้อครีม TiO_2 เหลวเกินไปซึ่งไม่เหมาะกับ Mesh ของบล็อกสกรีนผ้าที่เลือกใช้และเมื่อปาดครีมเสร็จแล้วนำบล็อกสกรีนผ้าออกจะมีครีมบางส่วนติดไปกับบล็อกสกรีน จึงทำให้พื้นผิวของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ



(ก)

(ข)

(ค)

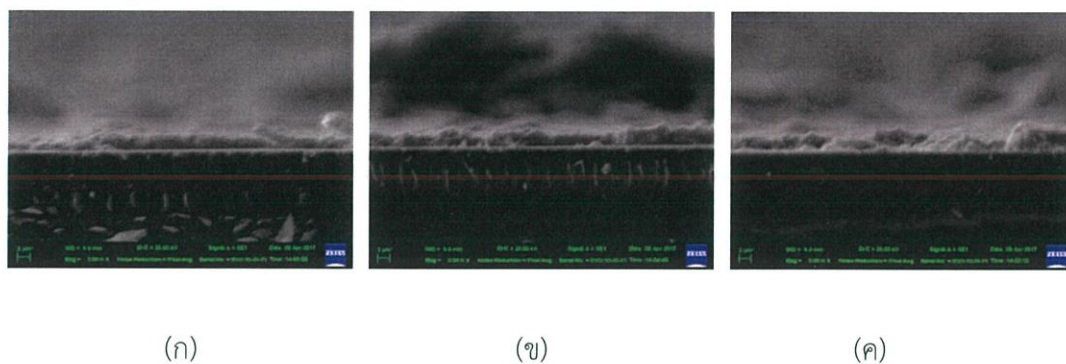
รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ

ก่อนเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง

และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ก่อนเผาและหลังเผา โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย (μm)	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)	ค่าความคลาด เคลื่อนมาตรฐาน (μm)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)
ความหนา ของฟิล์ม				
ก่อนเผา	9.063	0.311	0.180	1.981
หลังเผา	3.904	0.633	0.365	9.361

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 เฉลี่ย ทั้งก่อนเผาและหลังเผา (ตาราง 4.10) พบว่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มก่อนเผามีค่ามากกว่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มหลังเผา และค่า PSE ของฟิล์มก่อนเผาก็มีค่าน้อยกว่าฟิล์มหลังเผา ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเมื่อนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ สารที่มีจุดเดือดต่ำกว่า $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสลายตัวออกไปหมดจนเหลือแต่ TiO_2 ทำให้เนื้อฟิล์มหลังเผาจะบางกว่าและมีรอยแตกมากกว่าเนื้อฟิล์มก่อนเผา ความหนาของฟิล์มหลังเผาแต่ละตำแหน่งจึงมีโอกาสที่จะแตกต่างกันได้มากขึ้น

4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO_2

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม TiO_2 โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมด้วยเทคนิคนี้ จะเริ่มจากการวางกระจกลงบนบล็อกวางกระจก การวางบล็อกสกรีนผ้าครอบลงบนฐานวางกระจก การหยดครีมน TiO_2 ลงบนบล็อกสกรีนผ้าและกดปุ่มคำสั่งเพื่อให้แปรงเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้เนาไปเซปรีเยชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปาดทำงาน เสร็จแล้วจึงนำกระจกออกจากบล็อควงกระจก ซึ่งเมื่อทำการทดลองจับเวลาในการเตรียมฟิล์ม TiO₂ จำนวน 20 ชิ้น จะได้เวลาในการเตรียมเฉลี่ยทั้งหมด 6 นาที

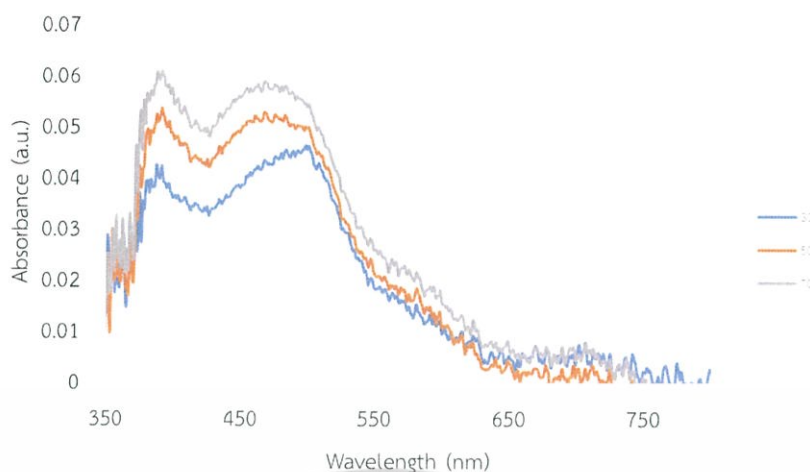
4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม N719 ของ TiO₂

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการย้อมสีต่อปริมาณสีย้อมที่ได้โดยการคำนวณจำนวนโมลการดูดซับสีย้อมของ TiO₂ ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 °C ซึ่งได้จากข้อไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่จุ่มสีย้อม N719 เป็นเวลา 30 นาที (ตารางที่ 4.11) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมมีผลต่อปริมาณการดูดซับของสีย้อมที่วัดได้ดังนี้ เมื่อนำข้อไฟฟ้าเวิร์คกิ้งไปละลายในสารละลาย KOH เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน ดังรูปที่ 4.11 พบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.12) ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ค่า pH ของเอทานอล และค่าความหนืดของเอทานอลที่ลดลง อย่างไรก็ตามตรวจพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสน้ำไม่ได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการจุ่มสีย้อมถึง 70°C ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ทั้งนี้อาจเกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมที่มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตะกอนของสีย้อมเหล่านี้แม้จะทำให้ตรวจพบปริมาณสีย้อมได้สูงแต่อาจไม่สามารถใช้ผลิตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมไม่ได้สร้างพันธะกับ TiO₂ โดยตรง สำหรับค่า PSE ของจำนวนโมลในการดูดซับสีย้อมอาจเกิดจากความหนาของฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเตรียมข้อไฟฟ้าเวิร์คกิ้งที่ใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบ

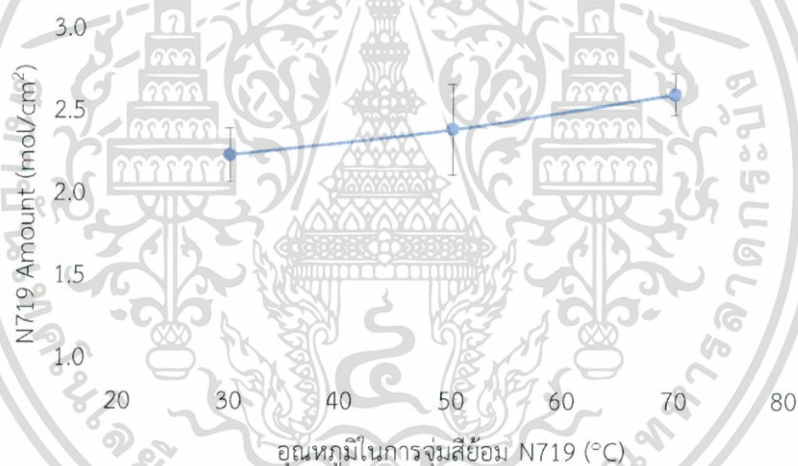
ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณจำนวนโมลของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนฟิล์ม TiO₂ ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	N719 × 10 ⁻⁸ (mol/cm ²)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mol/cm ²)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (mol/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	2.21867	0.35709	0.15970	7.19780
50	2.37379	0.62030	0.27741	11.68623
70	2.59098	0.28757	0.12861	4.96357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงของสีย้อมกับค่าความยาวคลื่นเมื่อจุ่มสีย้อมที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70°C โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของสีย้อม N719 ต่อพื้นที่ 1 cm x 1 cm กับอุณหภูมิการจุ่มสีย้อม โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

4.3.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC

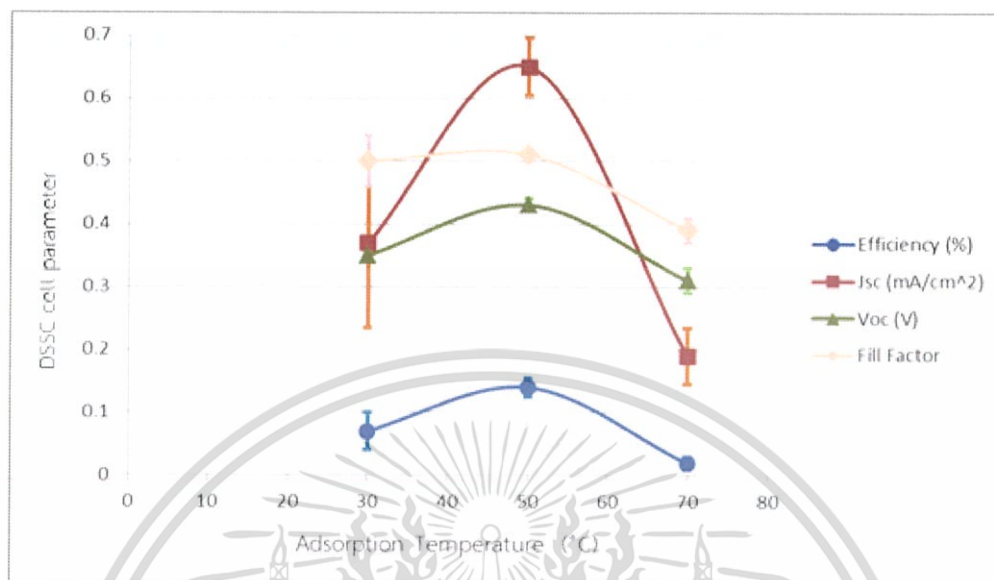
หลังจากที่ได้ปรับปรุงขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ผู้ศึกษาได้วัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSC ในพื้นที่การทำงาน 0.5 cm x 0.5 cm ภายใต้ความเข้มแสง 1000 W/m² โดยได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์ อุณหภูมิ ในการจุ่มสีย้อม (°C)	V _{oc}		J _{sc}		Fill Factor		Efficiency	
	ค่าเฉลี่ย (V)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย (mA/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (%)
30	0.35	1.43	0.37	36.49	0.50	8.00	0.07	46.21
50	0.43	2.33	0.65	6.92	0.51	1.96	0.14	10.86
70	0.31	6.45	0.19	23.68	0.39	5.13	0.02	42.07

จากตารางที่ 4.12 นำค่า J_{SC} , V_{OC} , Fill Factor และ Efficiency มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC กับอุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปิดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 4.13 พบว่ากราฟของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_{SC}) มีแนวโน้มเดียวกับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Efficiency) แสดงให้เห็นว่าค่า J_{SC} ส่งผลต่อค่า Efficiency มากที่สุด ลดลงมาคือค่า Fill Factor และ V_{OC} ตามลำดับ โดยผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเป็นดังตารางที่ 4.13 และ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	ตัวอย่างที่	J_{sc} (mA/cm ²)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mA/cm ²)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (mA/cm ²)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	1	0.29	0.27	0.14	36.49
	2	0.77			
	3	0.23			
	4	0.19			
	ค่าเฉลี่ย	0.37			
50	1	0.75	0.09	0.05	6.92
	2	0.53			
	3	0.69			
	4	0.64			
	ค่าเฉลี่ย	0.65			
70	1	0.12	0.09	0.05	23.68
	2	0.32			
	3	0.17			
	4	0.15			
	ค่าเฉลี่ย	0.19			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อมต่างกัน โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม N719 (°C)	ตัวอย่างที่	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
30	1	0.05	0.06	0.03	46.21
	2	0.16			
	3	0.03			
	4	0.03			
	ค่าเฉลี่ย	0.07			
50	1	0.17	0.03	0.02	10.86
	2	0.10			
	3	0.16			
	4	0.14			
	ค่าเฉลี่ย	0.14			
70	1	0.01	0.02	0.01	42.07
	2	0.05			
	3	0.02			
	4	0.01			
	ค่าเฉลี่ย	0.02			

จากตาราง 4.13 และ 4.14 เป็นตารางแสดงค่า J_{SC} และค่า Efficiency ในการจุ่มสีย้อม N719 ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 °C โดยที่อุณหภูมิ 50 °C DSSC มีค่า J_{SC} และค่า Efficiency สูงสุด รองลงมาคือ ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 °C ตามลำดับ

นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลกับค่า PSE ของค่า Efficiency มากที่สุดคือค่า J_{SC} (ตาราง 4.12 ของ J_{SC}) ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดของกระบวนการผลิตเซลล์ในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้ง ซึ่งเมื่อใช้เครื่องปาดเคลือบแล้วใช้บล็อกสกรีนกำหนดขนาดของพื้นที่การทำงาน ทำให้ฟิล์ม TiO_2 ที่ได้ออกมามีพื้นผิวเป็นตารางตาม Mesh ของผ้าสกรีน ฟิล์มจึงมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และสีย้อม N719 บางส่วนถูกนำไปใช้ในการวัด pH ของสีย้อม ทำให้สีย้อมมีตะกอนเกิดขึ้น ส่งผลให้

ข้อไฟฟ้าเวิร์คกิงคูดซ์สีย้อมไม่ดีเท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.13 ไม่ได้มีเพียงค่า J_{SC} ที่มีผลต่อ Efficiency แต่ยังมีค่า Fill Factor ที่ยังส่งผลด้วย ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการประกอบเซลล์ การควบคุมพื้นที่การทำงานของเซลล์ ปริมาณของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และปริมาณแพลทินัมบนข้อไฟฟ้าเคาน์เตอร์

4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

4.4.1 ผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2

เมื่อนำผลของการศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่า PSE ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบ ($PSE_{Machine}$) ก่อนเผาจะมีค่าน้อยกว่าค่า PSE ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มด้วยมือ (PSE_{Hand}) ก่อนเผา ดังตารางที่ 4.15 สาเหตุอาจเกิดจากการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบนั้นสามารถควบคุมแรงและอัตราเร็วในการปาดแต่ละครั้งได้เท่าๆ กันทุกครั้ง และจากการเตรียมทั้ง 2 วิธีนั้นได้ค่า PSE ของฟิล์มหลังเผาจะมากกว่าค่า PSE ของฟิล์มก่อนเผา เนื่องจากเมื่อนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}C$ ตัวทำละลายและตัวประสานจะสลายตัวออกไปหมดจนเหลือแต่ TiO_2 ทำให้เนื้อฟิล์มหลังเผาบางกว่าและอาจเกิดรอยแตกมากกว่าจึงทำให้ค่า PSE หลังเผาเพิ่มขึ้นจากค่า PSE ก่อนเผานั้นเอง

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

เทคนิคการเตรียม	การเตรียมด้วยมือ		การเตรียมด้วยเครื่อง	
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์	ค่าเฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์
ความหนาของฟิล์ม	(μm)	คลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	(μm)	คลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
ก่อนเผา	3.840	4.101	9.063	1.981
หลังเผา	2.473	19.059	3.904	9.361

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO₂

เมื่อเปรียบเทียบผลของเวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม TiO₂ โดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น พบว่าการเตรียมฟิล์มด้วยมือจะใช้เวลานานกว่าการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบ ซึ่งการเตรียมฟิล์มโดยใช้เครื่องปาดเคลือบนั้นสามารถลดเวลาในการเตรียมฟิล์มลงได้มากกว่า 5 เท่า ($Time_{hand} = 37 \text{ min}$, $Time_{machine} = 6 \text{ min}$)

4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับสีของ N719 ของ TiO₂

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนโมลการดูดซับสีของ N719 ของ TiO₂ จากการเตรียมฟิล์มด้วยมือกับการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาด โดยเปรียบเทียบค่า PSE_{Hand} กับ $PSE_{Machine}$ พบว่าการดูดซับสีของ N719 ของ TiO₂ ที่อุณหภูมิ 50 °C และการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบสามารถลดค่า PSE ของจำนวนโมลการดูดซับสีของ N719 ของ TiO₂ ลงได้ ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบจำนวนโมลการดูดซับสีของ N719 ของ TiO₂ ที่ใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

เทคนิคการเตรียม	การเตรียมด้วยมือ		การเตรียมด้วยเครื่อง	
	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)
อุณหภูมิในการจุ่มสี (°C)	$N719 \times 10^{-8} \text{ (mol/cm}^2\text{)}$		$N719 \times 10^{-8} \text{ (mol/cm}^2\text{)}$	
30	2.24987	14.70901	2.21867	7.19780
50	3.13447	17.16649	2.37379	11.68623
70	3.43228	9.63607	2.59098	4.96357

4.4.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC

เมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าของการเตรียมฟิล์มด้วยมือกับการเตรียมด้วยเครื่องปาดเคลือบ พบว่าค่า J_{sc} ส่งผลต่อค่า Efficiency มากที่สุด โดยที่ค่าเฉลี่ยของ J_{sc} ของการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบจะมีค่าน้อยกว่าการเตรียมด้วยมือดังตารางที่ 4.17 เนื่องจากจำนวนโมลของสีที่ติดบนฟิล์ม TiO₂ มีค่าลดลง (ตารางที่ 4.16) และเมื่อเปรียบเทียบค่า PSE พบว่าการเตรียมด้วยเครื่องไม่สามารถลดค่า PSE ของทุกอุณหภูมิลงได้ เนื่องจากการเตรียมด้วยเครื่องปาดเคลือบมีค่า Fill Factor และค่า V_{oc} ที่ส่งผลต่อค่า Efficiency มากกว่าการเตรียมด้วยมือ (รูปที่ 4.5 และ 4.13)

โดยทั้ง Fill Factor และ V_{oc} ของเซลล์ที่เตรียมด้วยเครื่องมีค่าลดลง (ตาราง 4.6 และตาราง 4.12) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าฟิล์มที่มีลักษณะเป็นตารางตามลักษณะของผ้าสกรีน (Mesh) อาจทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนภายในเซลล์ (Recombination) ได้มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง อย่างไรก็ตามค่า Fill Factor และค่า V_{oc} ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการควบคุมพื้นที่การทำงาน ปริมาณสีย้อม และลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้จากการใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือกับเทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

เทคนิคการเตรียม	อุณหภูมิในการจุ่มสีย้อม (°C)		30	50	70	
			พารามิเตอร์			
การเตรียมด้วยมือ	ค่าเฉลี่ย (mA/cm^2)	ค่าเฉลี่ย (mA/cm^2)	1.86	2.92	2.79	
		ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	14.25	3.42	3.05	
	Efficiency (%)	ค่าเฉลี่ย (%)	0.56	0.90	0.84	
		ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	14.29	4.44	3.57	
	การเตรียมด้วยเครื่อง	J_{sc} (mA/cm^2)	ค่าเฉลี่ย (mA/cm^2)	0.37	0.65	0.19
			ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	36.49	6.92	23.68
Efficiency (%)		ค่าเฉลี่ย (%)	0.07	0.14	0.02	
		ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (%)	46.21	10.86	42.07	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
ของพารามิเตอร์ต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน มาตรฐาน พารามิเตอร์	การเตรียม ด้วยมือ (%)	การเตรียม ด้วยเครื่อง (%)	เปอร์เซ็นต์ความ แตกต่าง (%)
ความหนาฟิล์ม TiO ₂ ก่อนเผา	4.101	1.981	51.690
จำนวนโมลของสีย้อม N719 ที่ดูดซับบนฟิล์ม TiO ₂	17.16649	11.68623	31.92417
เวลาในการเตรียมฟิล์ม TiO ₂	34.00	6.00	82.35
ประสิทธิภาพการแปลง พลังงาน	4.44	10.86	144.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตในขั้นตอนการผลิตขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งโดยการทำเครื่องปาดเคลือบมาใช้แทนการปาดเคลือบด้วยมือ เพื่อที่จะควบคุมให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (PSE) ของความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่ได้จากการใช้เครื่องปาดเคลือบลดลงจากการใช้การปาดเคลือบด้วยมือ

จากผลการทดลองโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ พบว่าค่าความหนาของฟิล์มมีค่าไม่สม่ำเสมอกันส่งผลให้ได้ค่า PSE ของฟิล์มก่อนเผาและหลังเผามีค่า 4.101% และ 19.059% ตามลำดับ เมื่อนำไปจุ่มสีย้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสีย้อมเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณของสีย้อมเกาะอยู่บนอนุภาค TiO_2 มากขึ้น และเมื่อนำเซลล์ไปวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_{sc}) มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 °C รองลงมาคือ 70 และ 30 °C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Efficiency) โดยได้ค่า Efficiency สูงสุดที่อุณหภูมิ 50 °C เท่ากับ 0.9% และได้ค่า PSE เท่ากับ 4.44 โดยการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือจะใช้เวลาเฉลี่ยทั้งหมด 37 นาที

จากผลการทดลองโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นพบว่าค่าความหนาของฟิล์มมีค่าไม่สม่ำเสมอกันส่งผลให้ได้ค่า PSE ของฟิล์มก่อนเผาและหลังเผามีค่า 1.981% และ 9.361% ตามลำดับ เมื่อนำไปจุ่มสีย้อมไวแสง N719 ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสีย้อมเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณของสีย้อมเกาะอยู่บนอนุภาค TiO_2 มากขึ้น และเมื่อนำเซลล์ไปวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของ DSSC พบว่า ค่า J_{sc} มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 °C รองลงมาคือ 30 และ 70 °C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับค่า Efficiency โดยได้ค่า Efficiency สูงสุดที่อุณหภูมิ 50 °C เท่ากับ 0.14% และได้ค่า PSE เท่ากับ 10.86 โดยการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบจะใช้เวลาเฉลี่ยทั้งหมด 6 นาที

เมื่อนำผลการทดลองจากทั้งสองเทคนิคมาเปรียบเทียบ พบว่าค่าความหนาของฟิล์มและจำนวนโมลของสีย้อม N719 ของเซลล์ที่ผลิตโดยใช้เครื่องปาดเคลือบ มีค่า PSE ลดลงจากเซลล์ที่ผลิตโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือ โดยสามารถลดค่า PSE ความหนาของฟิล์มก่อนเผาได้ 51.69% ลดค่า PSE ของจำนวนโมลของสีย้อมลงได้ 31.92% ซึ่งการเตรียมฟิล์มด้วยเครื่องปาดเคลือบยังสามารถลดระยะเวลาในการเตรียมลงได้ 83.78% แต่ไม่สามารถลดค่า PSE ของ Efficiency ลงได้ดังตารางที่ 4.18 เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตในส่วนของขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งเท่านั้น ซึ่งยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่า PSE ของ Efficiency เช่น พื้นที่การทำงาน ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ และความหนาของฟิล์มแพลทินัมที่ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงวนเวสสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ข้อเสนอแนะ

จากขั้นตอนในการทำโครงการพิเศษที่ได้กล่าวไปข้างต้น หากต้องการให้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถลดค่า PSE ของ Efficiency ลงได้ ควรควบคุมกระบวนการผลิตดังนี้

- 1) เลือกใช้ mesh ของผ้าสกรีนให้เหมาะสมกับความหนืดของครีม TiO_2
- 2) เลือกใช้ตัวทำละลายที่สามารถล้างครีม TiO_2 ที่ติดอยู่ช่องบล็อกสกรีนผ้าออกได้โดยไม่ทำให้สีของบล็อกสกรีนผ้าหลุดออกมาขณะล้าง
- 3) ควบคุมปริมาณการหยดสารละลายแพลทินัมลงบนกระจกนำไฟฟ้า
- 4) ควบคุมปริมาณสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้อยู่เต็มพื้นที่การทำงานของเซลล์
- 5) ควบคุมพื้นที่การทำงานของเซลล์ขณะที่ประกอบเซลล์ให้ได้ขนาดเท่ากับที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรวุฒิ ช่วงโชติ. 2557. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.kmutt.ac.th/hynae/%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B9%84%E0%B8%A7%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87/>.
- [2] 2558. ปรากฏการณ์ โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic Effect). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://ienergyguru.com/2015/06/photovoltaic-effect/>.
- [3] นูรฮัยนี ดาโอะ. 2552. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง Dye Sensitize Solar Cells, DSSCs. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.slideshare.net/Multipleainee/seminar-power-point-dyesensitized-solar-cellsdsscs>.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ม.ป.ป. การประยุกต์ใช้ เซลล์แสงอาทิตย์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.cssckmutt.in.th/cssc/cssc_training/doc/Designer_CH1toCH5.pdf.
- [5] JAY JEONG. 2552. PHOTOVOLTAICS: Measuring the 'Sun'. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/05/photovoltaics-measuring-the-sun.html>.
- [6] Module Model. [Online]. ม.ป.ป. เข้าถึงได้จาก : https://www.folsomlabs.com/modeling/module/module_model.
- [7] วิสันต์ สกุลเจริญ, วิสุทธิ์ มณีสุขเกษม, สายันต์ อ่วมภูมิ และ สมชาย จารุติลกุล. ม.ป.ป. ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://elec.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/sem/pong/4.html>.
- [8] 2540. Chapter 2- Fundamentals of Statistics for Quality Control. [Online]. เข้าถึงได้จาก : eng.sut.ac.th/ceramic/old/course_link/30.ppt.
- [9] โกศล ดีศีลธรรม. 2546. การวัดผลผลิตภาพสายการผลิตด้วย SIX SIGMA. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.technologymedia.co.th/PDF/etoday63_51/procuctivity.pdf.
- [10] มงคล ศิริธนานุกุลวงศ์. 2552. ทฤษฎีและหลักการทำงาน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://tisade.blogspot.com/>.
- [11] 2546. การควบคุมมอเตอร์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/electric4/topweek9.htm>.
- [12] ม.ป.ป. ความรู้เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้า. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://202.129.59.73/tm/motor10-52/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] 2559. บล็อกของ PoundXI สอนใช้ลินุกซ์, พัฒนาซอฟต์แวร์ และ อิเล็กทรอนิกส์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://poundxi.me/arduino-คืออะไร>.
- [14] 2555. แนะนำเพื่อนใหม่ที่ชื่อ Arduino. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/บทความ-arduino-คืออะไร-เริ่มต้นใช้งาน-arduino.html>.
- [15] Chanya Chuenarrom. 2558. ImageJ 1: โปรแกรม ImageJ คืออะไร. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://comdigest.blogspot.com/2015/10/imagej.html>.
- [16] จ่านงค์ บุญลอย และ สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์. ม.ป.ป. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยเทคนิคการสกรีน Fabrication of Dye-sensitized solar cells by Screen printing technique. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.lib.ku.ac.th/KUCONF/2555/KC4911014.pdf>.
- [17] ม.ป.ป. Properties of Ethanol Alcohol. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.efunda.com/materials/common_mat/show_liquid.cfm?MatlName=AlcoholEthanol



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

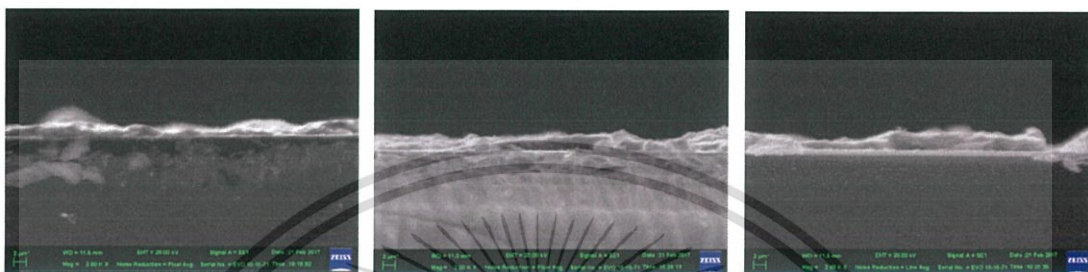
ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO₂ ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

- ชั้นที่ 1

(ก)

(ข)

(ค)

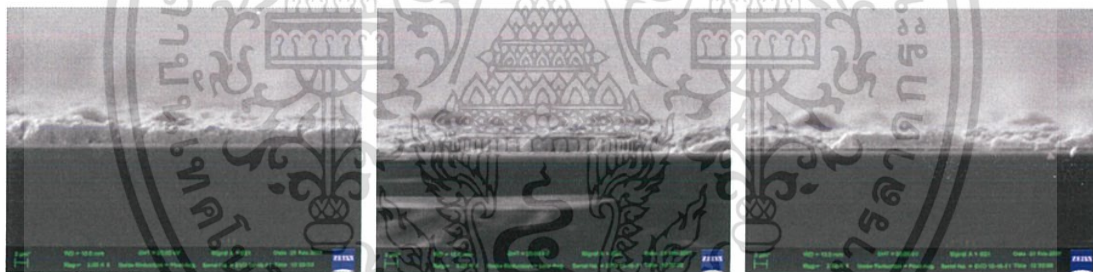


- ชั้นที่ 2

(ก)

(ข)

(ค)

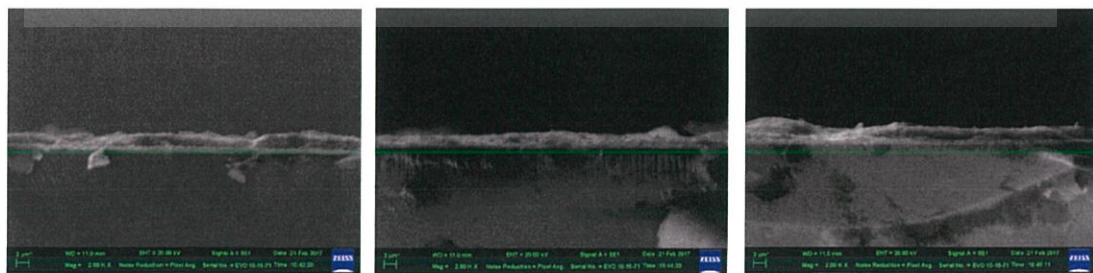


- ชั้นที่ 3

(ก)

(ข)

(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

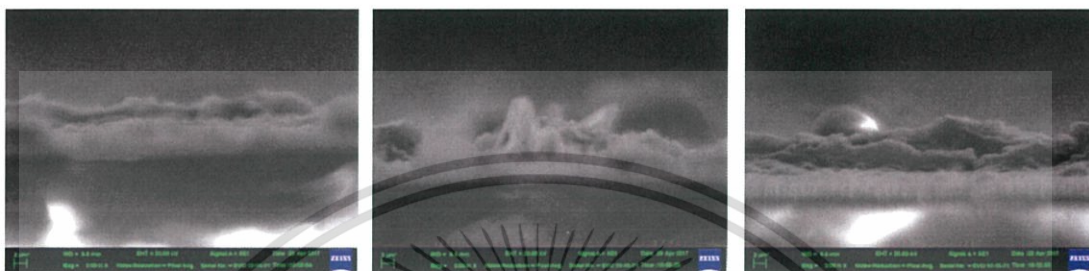
ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบก่อน
เผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

- ชั้นที่ 1

(ก)

(ข)

(ค)



- ชั้นที่ 2

(ก)

(ข)

(ค)

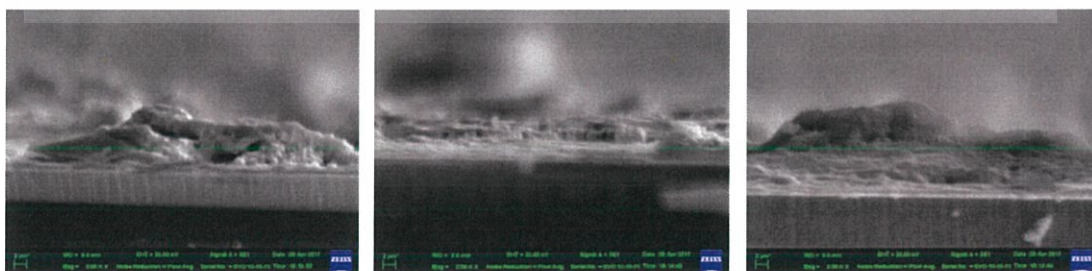


- ชั้นที่ 3

(ก)

(ข)

(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

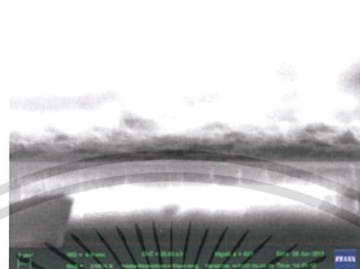
ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบหลัง เมา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

- ชั้นที่ 1

(ก)



(ข)

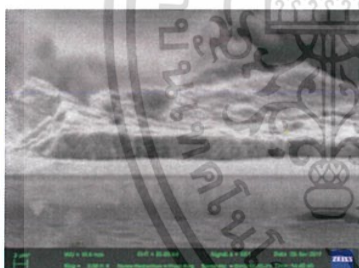


(ค)



- ชั้นที่ 2

(ก)



(ข)



(ค)

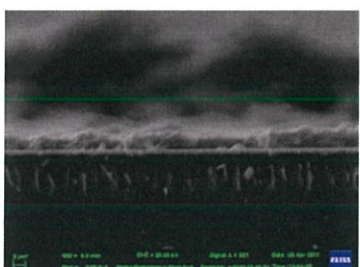


- ชั้นที่ 3

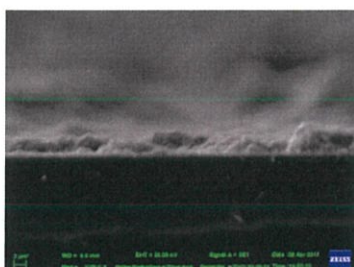
(ก)



(ข)



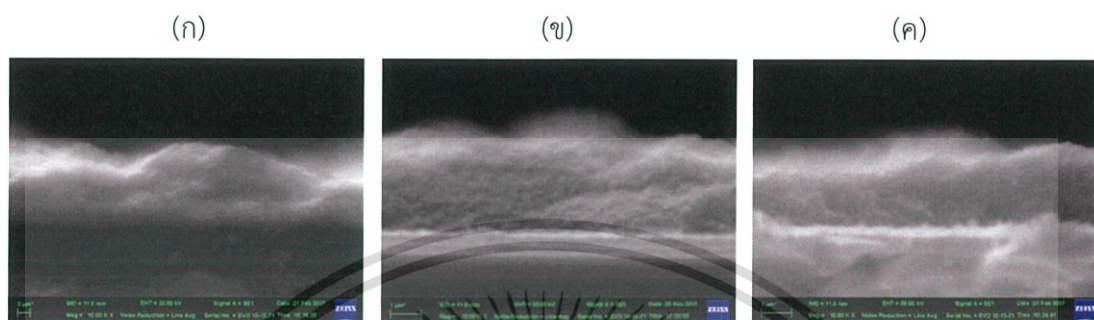
(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 10000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของฟิล์ม

- ชั้นที่ 1



- ชั้นที่ 2

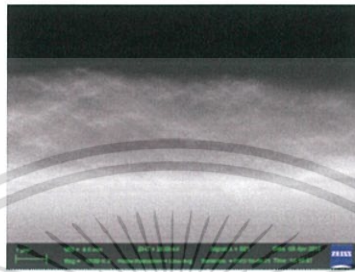


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบก่อน
เผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 10000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของ
ฟิล์ม

- ชั้นที่ 1

(ข)



ภาพตัดขวางของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบหลัง
เผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย 10000 เท่า โดยถ่ายจากมุม (ก) ซ้าย, (ข) กลาง และ (ค) ขวา ของ
ฟิล์ม

- ชั้นที่ 1

(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั้นที่ 2

(ข)



- ชั้นที่ 3

(ข)

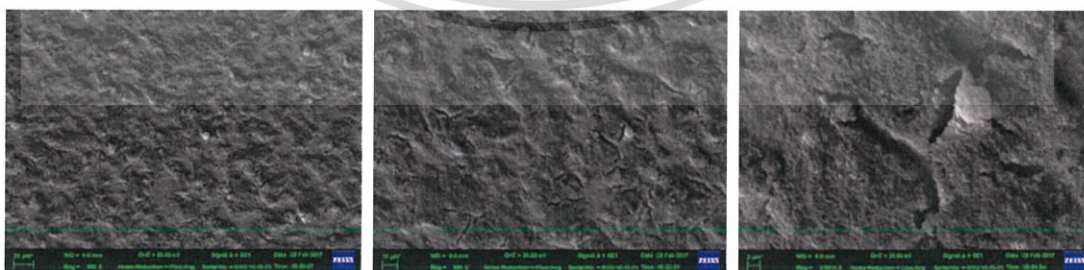


ภาพพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือก่อนเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 2000 เท่า

(ก)

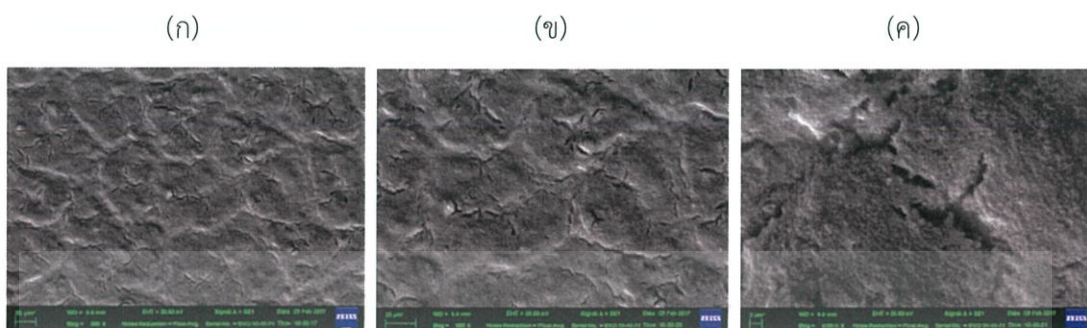
(ข)

(ค)

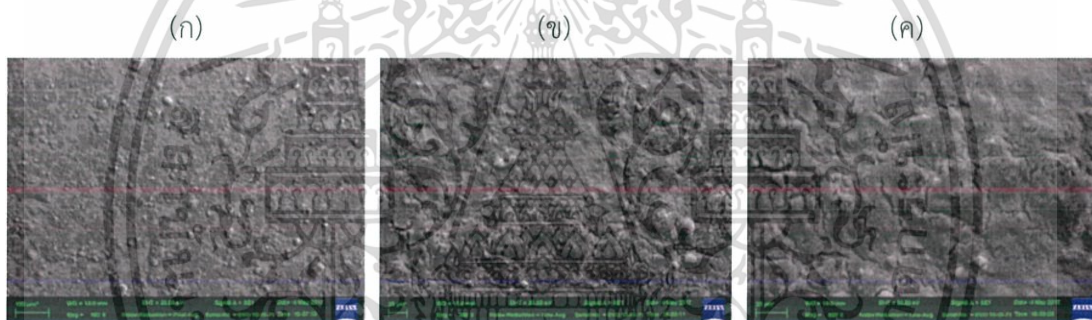


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยมือหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 2000 เท่า



ภาพพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบก่อนเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย (ก) 100 (ข) 300 และ (ค) 500 เท่า



ภาพพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการปาดเคลือบด้วยเครื่องปาดเคลือบหลังเผา จากกล้อง SEM กำลังขยาย (ก) 100 (ข) 300 และ (ค) 500 เท่า

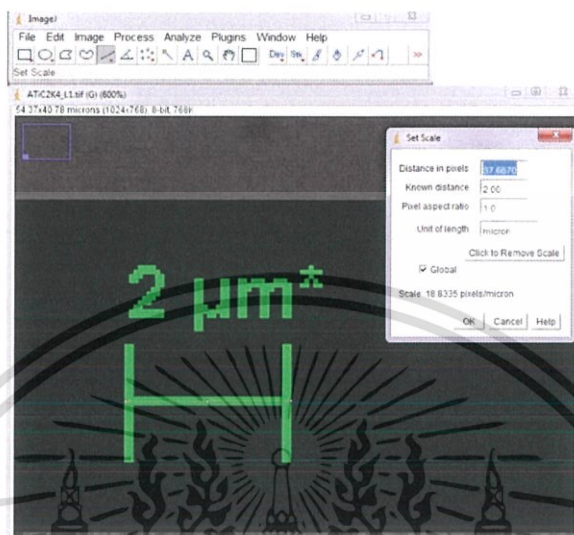


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความหนาเฉลี่ยของภาพฟิล์ม TiO_2 ที่ถ่ายได้จาก SEM โดยใช้โปรแกรม ImageJ

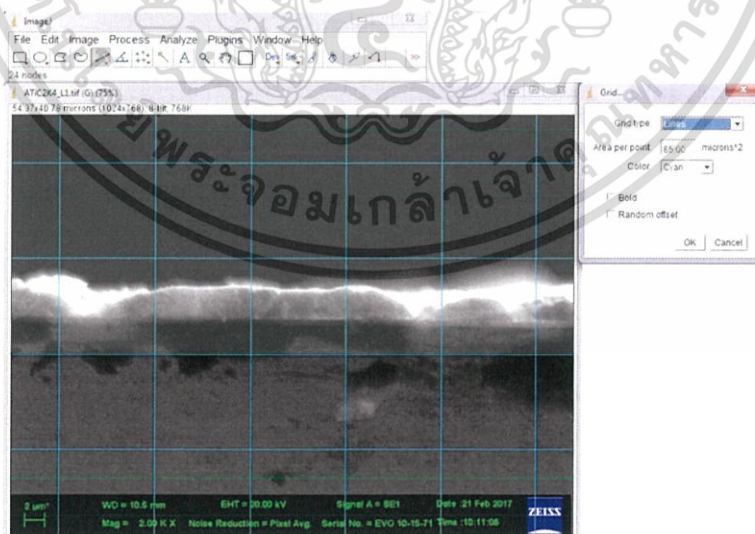
1) ตั้งค่าสเกลในโปรแกรมโดยใช้สเกลบาร์ที่มากับรูปเป็นตัวอ้างอิง ดังรูปที่ 10 โดยกดที่

Analyze → Set Scale



รูปที่ 10 การตั้งค่าสเกลการวัดในโปรแกรม ImageJ

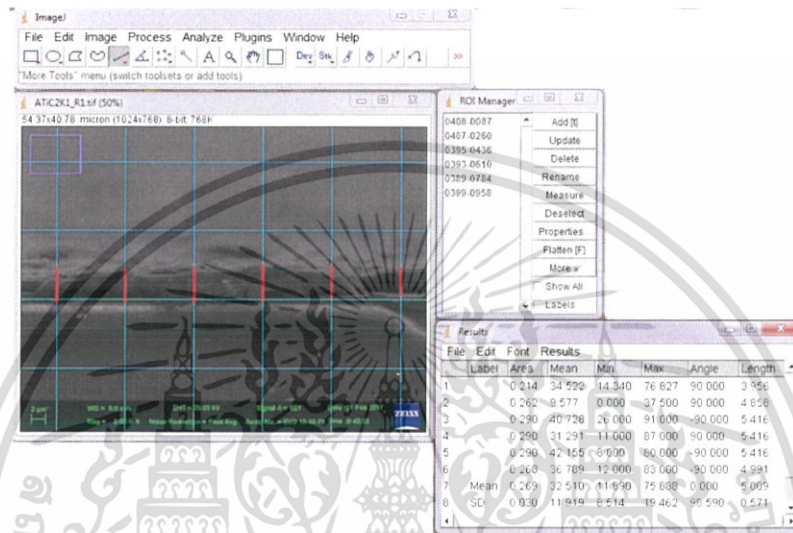
2) สร้าง Grid ขึ้นมาบนรูปเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดค่าความหนาแต่ละจุด ดังรูปที่ 11 โดยกดที่ Analyze → Tools → Grid



รูปที่ 11 การสร้าง Grid บนรูปในโปรแกรม ImageJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) กดไปที่ Analyze → Tools → ROI Manager แล้วลากเส้นวัดความหนาของฟิล์ม โดยลากทับเส้น Grid เพื่อให้ระยะห่างในแต่ละจุดที่วัดมีระยะห่างเท่ากัน โดยเมื่อลากเส้นวัดแต่ละจุดเสร็จให้กด Add จากนั้น เมื่อวัดครบ 6 จุด กด Measure แล้วจะมีหน้าต่าง Results ขึ้นมา กด Results → Summarize จะได้ค่าการวัดออกมาดังรูปที่ 12 แล้วกด Files → Save As แล้วค่าที่วัดจะถูกบันทึกไว้เป็นไฟล์ Excel



รูปที่ 12 ค่าการวัดต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม ImageJ

4) นำค่าที่ได้คำนวณหาค่าความหนาของฟิล์ม TiO_2 เกลียว และคำนวณหาค่า PSE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม N719 (Dye Absorption) โดยใช้โปรแกรม AvaSoft 7.4

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า Dye Absorption แสดงดังรูปที่ 1 ได้แก่

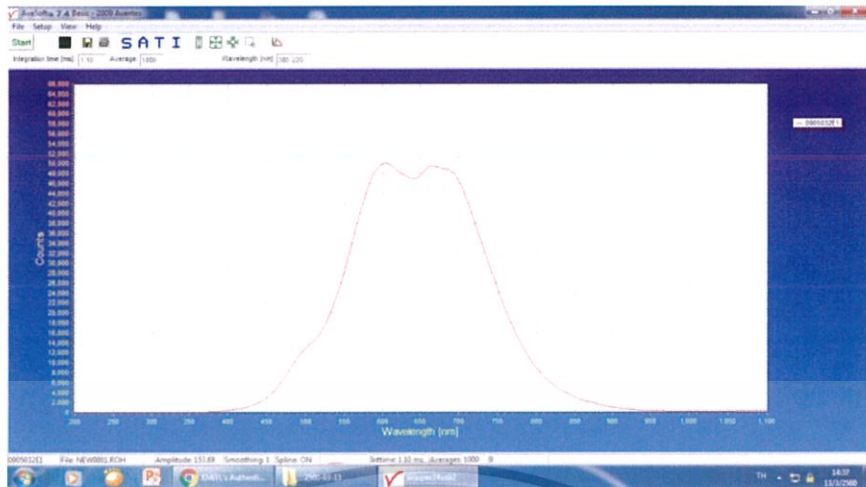


รูปที่ 1. การจัดวางเครื่องที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสง




- (1) Spectrophotometer ยี่ห้อ AvaTes
- (2) แหล่งกำเนิดแสง ยี่ห้อ SCHOTT รุ่น MEGALIGHT100
- (3) แท่นจับยัดคิวเวทท์ (Cuvette Holder)
- (4) สาย Fiber Optic ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร

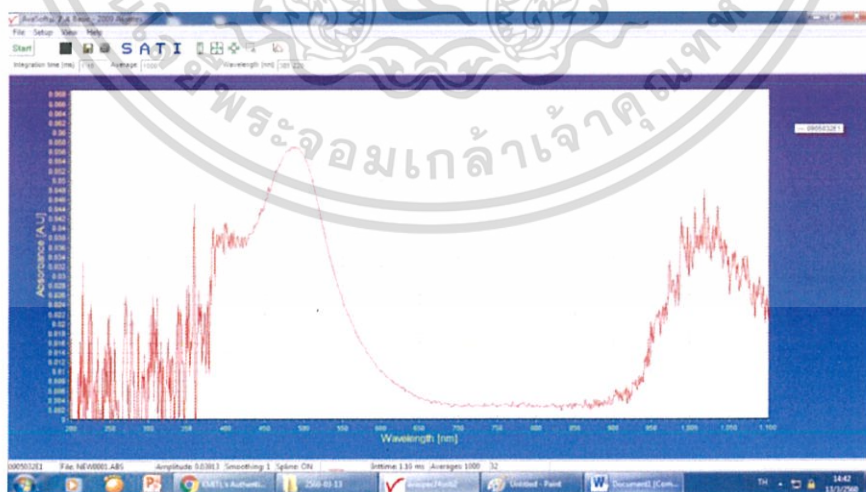
- 1) เปิดโปรแกรม AvaSoft 7.4 จากนั้นกด Start →  →  → Set up → Subtract saved dark เพื่อ Set ให้เป็น Standard ในโหมดที่ไม่มีแสง จากนั้นจึงกด Stop
- 2) ทำการถอดจุกของ (1) เพื่อใส่ (4) ที่ต่อจาก (3)
- 3) แล้วจึงกด Start →  → ปรับความเข้มแสงให้ได้ประมาณ 50000 Lux ทำการปรับ (2) จะได้ดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 การ Set โปรแกรมก่อนวัดงาน

- 4) ใส่ Sample ที่ใช้วัดเป็นตัว Standard กด  (เพื่อให้เป็นค่า Reference) แล้วกด Stop
- 5) จากนั้นจะทำการ Save ข้อมูล โดยไปกด File → Start New Experiment ทำการตั้งชื่อ File แล้วกด Ok
- 6) เมื่อทำทุกขั้นตอนเสร็จแล้ว ต่อไปทำการวัดงานได้โดยนำ Sample ที่ใช้วัดเป็น Standard ออกแล้วใส่ Sample ที่จะใช้วัดลงไป
- 7) กด Start →  →  (เพื่อวัดค่าการดูดกลืน) จะได้ดังรูปที่ 3



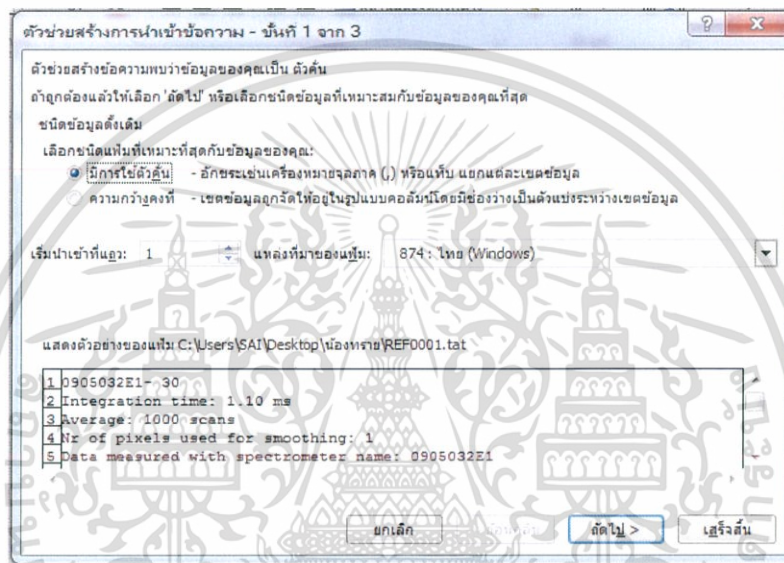
รูปที่ 3 กราฟที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงจากงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) รอประมาณ 7 วินาที แล้วกด Stop จากนั้นทำการ Save โดยกด File → Save → Experiment → ใส่ชื่อ Sample ที่ใช้วัด

9) เมื่อต้องการเปิดค่าที่วัดได้จากเครื่อง กด File → Convert Graph → TO ASCII จากนั้นกดเลือก File ที่จะ Convert Graph ก็จะมี File .tat ขึ้นมาก็จะสามารถนำไปเปิดใน Excel ได้

10) ถ้าจะเปิด File เข้าไปที่ Excel → Open แล้วเข้าไปโฟลเดอร์ที่ Save งานไว้ เลือกเปิดไฟล์ .tat จะมีหน้าต่างนี้ขึ้นมาแล้วกดถัดไป จากนั้นเลือกตามรูปแล้วกดเสร็จสิ้น



รูปที่ 4 วิธีการเปิด File งานที่ได้บันทึกไว้

11) จากนั้นจะได้ข้อมูลตามรูปแล้วเลือกค่าที่นำมาใช้ Plot Graph การดูคลิกก็จะทำให้ได้กราฟออกมา ดังรูปที่ 5

Wave (nm)	Dark (counts)	Ref (counts)	Sample (counts)	Absorbance (A.U.)
198.42	3.838	38.476	39.612	0.01326
199.62	3.1107	42.586	41.171	0.01585
199.82	4.4678	45.097	43.775	0.01435
200.28	3.9358	45.137	45.039	0.0203
200.81	2.6705	44.691	44.027	6.92E-03
201.41	1.9342	44.717	42.814	0.01676
202.01	1.1703	43.554	42.717	8.46E-03
202.6	0.8173	42.411	42.314	3.01E-03
203.2	0.6188	41.988	41.373	6.51E-03
203.8	0.2305	40.694	41.178	5.16E-03
204.4	0.06	39.66	42.197	-0.02673
204.99	0.6982	40.221	43.371	-0.0331
205.59	1.5373	41.51	42.843	0.01425
206.19	1.1953	42.551	42.268	2.99E-03
206.79	0.5635	42.935	42.174	7.87E-03
207.38	0.5408	42.504	41.069	0.01511
207.98	0.05675	41.459	40.728	7.72E-03
208.58	4.397	41.3	42.18	5.07E-03
209.18	0.0435	42.224	41.841	3.96E-03
209.77	-0.3957	42.263	40.458	0.01877
210.37	0.5017	42.062	41.384	6.97E-03
210.97	0.8073	41.91	42.6	2.24E-03
211.56	1.387	41.447	42.597	<0.01279
212.16	0.9988	41.416	40.408	6.019E-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรูปที่ 5 มีข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยใช้โปรแกรม AvaSoft 7.4 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) และถ้าจะทำการวัดตัวอย่างต่อไปให้ทำซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 6 (ตั้งแต่ข้อ 10 ขึ้นไปสามารถเก็บไว้ทำหลังจากที่วัดงานเสร็จหมดแล้ว)

วิธีการใช้โปรแกรม Peccell IV Curve Analyzer 2.1

- 1) เมื่อเปิดอุปกรณ์การวัดค่า $J_{sc}V_{oc}$ ของ DSSC เรียบร้อยแล้วจึงเปิดโปรแกรม Peccell IV Curve Analyzer 2.1 ดังรูปที่
- 2) ทดสอบความพร้อมของเครื่อง Solarr Simulator ด้วยการต่อขั้วไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยต่อให้ตรงตามตัวเลขที่เขียนไว้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเช็ทเครื่องด้วยการต่อขั้วไฟฟ้าเข้าด้วยกัน

- 3) ใส่ค่าตามที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 7

Start / V	-0.1
Stop / V	0.8
Step / V	0.01
Cmpl / A	0.2
SrcDs / s	0.12
NPLC	1
Hold / s	0.2
Area / cm ²	.4
InPw / mW cm ⁻²	100
Segment	1

4-wire
 High Current

Check Isc

Cmpl / A

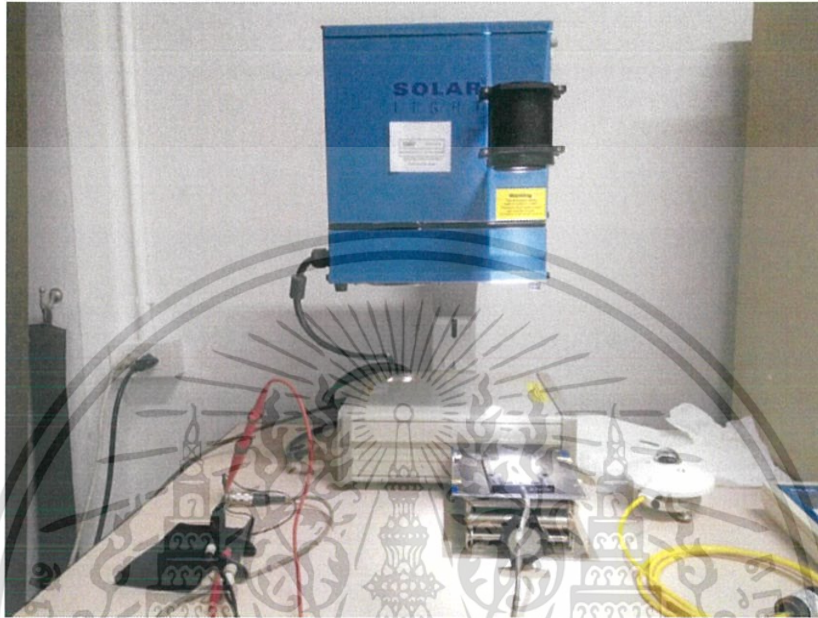
Isc / mA

Peccell
Peccell Technologies, Inc.

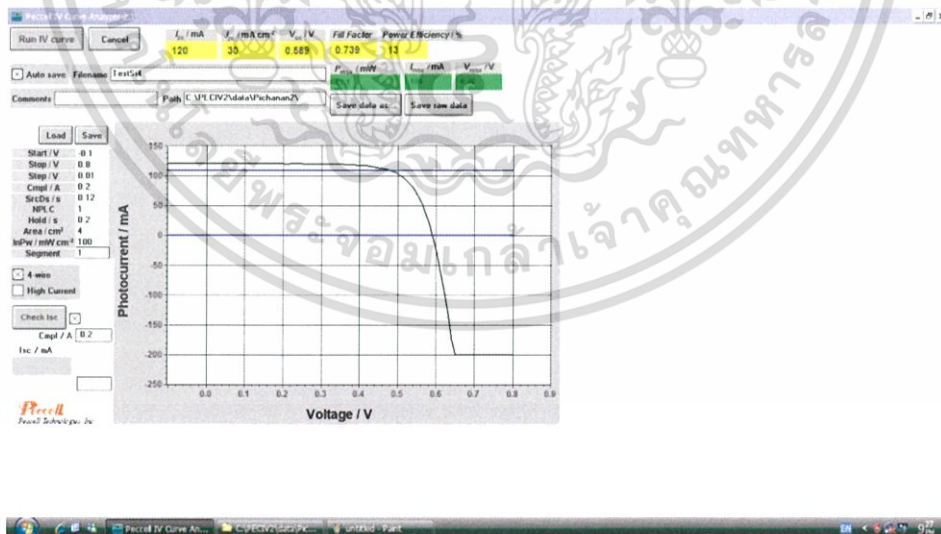
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 7 การตั้งพารามิเตอร์เพื่อทดสอบระบบการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) พิมพ์ชื่อข้อมูลตามที่ต้องการที่ช่อง File Name แล้วเลือก Path ที่ต้องการเก็บข้อมูล จากนั้นกดเลือกที่ Auto Save เพื่อให้บันทึกข้อมูลอัตโนมัติทุกครั้งที่เกิด Run IV Curve

5) นำ Silicon Standard Cell ต่อเข้ากับเครื่องโดยวางตรงกลางของแหล่งกำเนิดแสงดังรูปที่ 8 จากนั้นกด Run IV Curve ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การทดสอบการตั้งค่ามาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ Silicon Standard Cell



รูปที่ 9 ตัวอย่างผลการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ Silicon Standard Cell

6) เมื่อเสร็จทุกขั้นตอนแล้วสามารถวัดเซลล์ได้ตามที่ต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้