



รายงานฉบับสมบูรณ์ ปี 2558

การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์จากวิธีการสปาร์กและโซลเจลสำหรับ
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม

Preparation of Zinc Oxide Films from Sparking and Sol-Gel
methods for Dye-Sensitized Solar Cell

ผู้วิจัย

ดร. อรวรรณ วัชรวิทย์เวชยันต์
คณะวิทยาศาสตร์

เสนอต่อ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กุมภาพันธ์ 2558

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จากการเตรียมฟิล์ม ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บนกระจกนำไฟฟ้า Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) เป็นสารกึ่งตัวนำในโฟโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode) โดยวิธีสปาร์กสวดสังกะสีและวิธี sol-gel ซึ่งเป็นเทคนิคการเตรียมฟิล์มโลหะออกไซด์อย่างง่าย

ผู้วิจัยได้เตรียมฟิล์ม ZnO โดยวิธีสปาร์กสวดสังกะสีลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่ระยะเวลาการสปาร์กต่างๆ จากนั้นจึงนำชิ้นงานนี้ไปเผาที่อุณหภูมิ 350–550 °C ผลการวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM พบว่า ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสปาร์ก เมื่อนำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม ZnO ไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม พบว่าฟิล์ม ZnO ระยะเวลาการสปาร์ก 6 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ความหนา ~ 9 μm ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เท่ากับ 0.053% แต่ยังคงเป็นประสิทธิภาพที่ต่ำเนื่องจากฟิล์ม ZnO ที่เตรียมจากกระบวนการสปาร์กไม่ยึดเกาะกับกระจกนำไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการหลุดลอกระหว่างกระบวนการประกอบเซลล์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่สร้างจากฟิล์ม ZnO เตรียมโดยวิธี sol-gel พบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 2.14% ที่ความหนา ~5.6–6.2 μm เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบฟิล์ม ZnO โดยการสปาร์กสวดสังกะสีในสารละลายซิงค์ออกไซด์ พบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 1.64% เนื่องจากความร้อนของการสปาร์กทำให้สาร stabilizer ถูกเผาไหม้ฟิล์มที่เตรียมได้จึงมีความพรุนลดลง

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ ได้ผ่านความเห็นชอบจากนักวิจัยที่ปรึกษา (Mentor) แล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ สิงห์ใจ)

นักวิจัยที่ปรึกษา

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ ๑ บทนำ	
๑.๑ ที่มาและความสำคัญ	1
๑.๒ สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
๑.๓ ทฤษฎี	4
๑.๓.๑ ลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	4
๑.๓.๒ ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	5
๑.๓.๓ ลักษณะสมบัติ out put ของเซลล์แสงอาทิตย์	7
1.3.4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	8
1.3.5 สิ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	10
1.3.6 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนทางไฟฟ้าเคมีสเปกโทรสโคปี (electrochemical impedance spectroscopy, EIS)	12
1.3.7 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)	15
๑.๔ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	17
๑.๕ ขอบเขตการศึกษา	17
บทที่ ๒ วิธีการวิจัย	18
บทที่ ๓ ผลการทดลอง	20
๓.๑ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์ โดยกระบวนการสปาร์ก	20
๓.๑.๑ การเตรียมฟิล์ม ZnO จากวิธีการสปาร์กวดสังกระสีบนกระจก (glass slide)	20
๓.๑.๒ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์ก ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง RAMAN spectroscopy	23

3.๑.๓ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO	23
โดยกระบวนการสปาร์ก	
๓.๒ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์	26
โดยกระบวนการ sol-gel	
๓.๒.๑ การวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM	26
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง XRD และ	28
Raman spectrometer	
๓.๒.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO จากกระบวนการ	29
sol-gel ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer	
๓.๒.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO	31
โดยกระบวนการ sol-gel	
๓.๓ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียม	34
ฟิล์มซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการ sol-gel	
๓.๓.๑ การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์ม ZnO	34
3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง	35
X-ray Diffractometer	
๓.๓.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO	36
โดยกระบวนการ sol-gel ที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.7M ของ zinc acetate	
๓.๓.4 การวิเคราะห์ electrochemical impedance spectroscopy (EIS)	45
ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO โดนกระบวนการ sol-gel	
บทที่ ๔ สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	49
ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก (Appendix)	53

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
๑.๑ แสดงการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ	2
๑.๒ แสดงกระบวนการเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม	6
1.3 ระดับพลังงานและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม	7
1.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์	7
1.5 กราฟความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V curve)	9
1.6 แสดงการหา R_S และ R_{SH} จาก I-V curve	10
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_S และ R_{SH} ที่เปลี่ยนแปลงต่อ I-V curve	11
1.8 กระแสไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้ารูปแบบฟังก์ชันคลื่นไซน์ที่มีความต่างเฟส θ	12
1.9 Lissajous Figure	13
1.10 Nyquist plot ของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	14
1.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	15
1.12 (a) XRD patterns และ (b) การหาค่า the full width at half maximum (FWHM)	16
2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	19
๓.๑ ความหนาของฟิล์ม ZnO ตามระยะเวลาการสปาร์ก	20
๓.๒ Cross section image ของฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์ก	21
๓.๓ ลักษณะอนุภาคฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์ก (a) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า	22
๓.๔ Raman spectra ของ ZnO เตรียมโดยกระบวนการสปาร์กเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	23
๓.๕ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นในการทดลอง	24
๓.๖ ผลการจุ่มชิ้นงานเคลือบ ZnO บนกระจก FTO ใน Eoxin Y	24
๓.๗ J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการสปาร์ก	25
๓.๘ SEM image แสดงลักษณะอนุภาคฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel (a) Top view image (b) cross section image	27
๓.๙ AFM images ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	28

3.10 Raman spectra ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	29	๓.๑1
แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	29	
๓.๑2 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ที่ไม่ได้จุ่มสีย้อม Eoxin Y	30	
๓.๑3 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ที่จุ่มสีย้อม Eoxin Y	30	
๓.๑4 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel และ spark 5 รอบ จุ่มสีย้อม Eoxin Y	31	
3.๑5 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 1 รอบ จากการเตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	32	
3.๑6 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 1 รอบ ที่สปาร์กลดซึ่งค้บนฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	33	
3.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมวิธี sol-gel ที่เคลือบฟิล์ม 5 รอบ	35	
3.18 XRD spectra ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	36	
3.19 ลักษณะอนุภาคของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยการสปาร์ก ลดสังกะสีในสารละลาย ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel	38	
3.20 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียม โดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 1 ชั้น	40	
3.21 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียม โดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 2 ชั้น	40	
3.22 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียม โดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 3 ชั้น	41	
3.23 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียม โดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 4 ชั้น	41	
3.24 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียม โดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 2 ชั้น	42	
3.25 J-V curve ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ความหนา 3 ชั้น ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง 30 นาที	42	
3.26 J-V curve ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ความหนา 4 ชั้น ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง 1 ชั่วโมง	43	

3.27 แนวโน้มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ในการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง N719	44
3.28 แนวโน้ม J_{sc} เซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง N719	45
3.29 EIS spectra ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (a) Nyquist plots and (b) Bode phase plots at V_{oc} under one-sun illumination	46

สารบัญตาราง

	หน้าที่
๓.๑ แสดงความหนาของฟิล์ม ZnO ตามระยะเวลาการสปาร์ก	20
๓.๒ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการสปาร์ก	25
๓.๓ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO ที่ความเข้มข้นสารละลายต่างๆ	32
๓.๔ แสดงความหนาของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้จากวิธีการ doctor blade	34
๓.๕ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO ที่ความหนาและเวลาในการจุ่มในสีย้อม N719 ต่างๆ	37
3.6 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ZnO ที่ความหนาและเวลาในการจุ่มในสีย้อม N719 ต่างๆ	39
3.7 แสดงความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 3 รอบ	47

บทที่ ๑

บทนำ

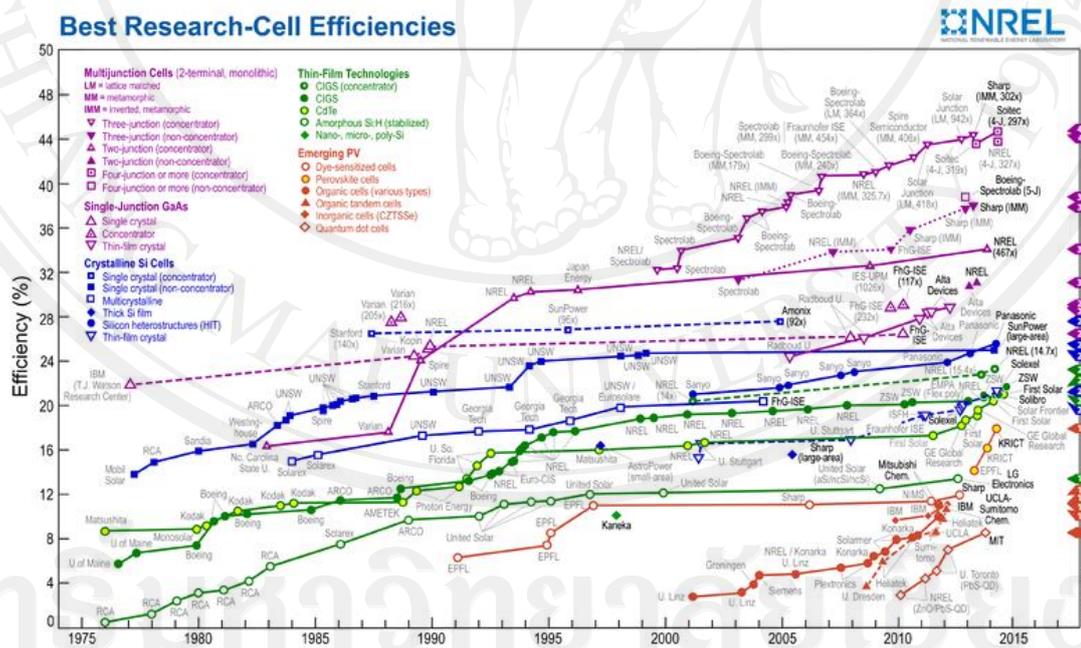
๑.๑ ที่มาและความสำคัญ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจและดำรงชีวิตของมนุษย์ การผลิตกระแสไฟฟ้าปัจจุบันได้มาจากแหล่งพลังงานต่างๆ อาทิเช่น เชื้อเพลิงจากสารชีวมวล พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อน และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น แต่พลังงานจากน้ำมัน ก๊าซ และถ่านหินที่เป็นสารชีวมวลเพื่อนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ยิ่งไปกว่านั้นพลังงานเหล่านี้กำลังจะหมดไป ทำให้ราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของโลก ดังนั้นการนำพลังงานทางเลือกที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาทดแทน จึงเป็นเรื่องที่นักวิจัยให้ความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่หาง่ายและไม่มีวันหมด พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิด อาทิเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (organic solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไฮบริดระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ (hybrid solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท (quantum dot solar cell) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ที่จะศึกษาและพัฒนาการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมที่ทำมาจากฟิล์ม ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำในโฟโตอิเล็กโทรด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และมีขั้นตอนในการผลิตง่ายกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น จึงมีประโยชน์อย่างมากที่จะทำการวิจัยและนำมาผลิตในเชิงการค้าได้

๑.๒ สรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงคิดค้นโดยคณะนักวิจัยของไมเคิล เกรสเซล และไบรอัน โอเรแกน (Michael Grätzel and Brian O'Regan) ในปีค.ศ. 1991 เริ่มแรกของงานวิจัยได้ศึกษาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำในโฟโตอิเล็กโทรด พบว่า พื้นที่ผิวต่อปริมาตรของชั้นสารกึ่งตัวนำมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่ามากจะส่งผลให้พื้นที่สำหรับยึดเกาะสีย้อมไวแสงมากขึ้นจึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงเพิ่มขึ้นด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงส่วนใหญ่เป็นชนิดที่ทำมาจาก TiO_2 และ ZnO โดยปัจจุบันมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 13% สำหรับ TiO_2 และประมาณ 6% สำหรับ ZnO ต่อมาได้มีความพยายามใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น WO_3 , Fe_2O_3 , SnO_2 และ Nb_2O_5 เป็นต้น



รูปที่ ๑.๑ แสดงการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

(ที่มา: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ทำจาก ZnO ปัจจุบันยังเป็นที่นิยมและได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์หลายท่านที่จะพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าให้ดีขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากราคาต้นทุนการผลิตต่ำ ปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ อาทิเช่น ลักษณะโครงสร้าง จำนวนชั้นและความหนาของฟิล์มโลหะออกไซด์ที่ใช้เป็นโพโตอิเล็กโทรด การเติมสารต่างชนิดลงในฟิล์มโลหะออกไซด์หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น

การเตรียมฟิล์ม ZnO โดยวิธีต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มแตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิเช่น T. P. Chou และคณะ ได้เตรียมฟิล์ม ZnO โดยวิธี solvothermal processing เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า พบว่า มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 3.5% ขณะที่ M. McCune และคณะ ได้เตรียมฟิล์ม ZnO nanowire ด้วยวิธี spin-coating พบว่า มีประสิทธิภาพสูงสุด 5.2% K. Park และคณะ ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO nanorod aggregate เตรียมโดยวิธี electrospray โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 200, 350 และ 450 องศาเซลเซียส แล้วนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม จากการทดลองพบว่า การให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าดีที่สุด เท่ากับ 2.89% Hosono และคณะ ได้ศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมโดยเตรียมฟิล์ม nanoporous ZnO ด้วยวิธีการ chemical bath deposition โดยวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เท่ากับ 4% เมื่อจุ่มชิ้นงานในสีย้อมชนิด N719 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อเปลี่ยนชนิดของสีย้อมเป็น D149 และจุ่มชิ้นงานในสารละลายนี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็น 4.27% D. Gültekin และคณะได้ศึกษาการเตรียม ZnO โดยวิธี sol-gel โดยใช้ Zinc acetate dehydrate เป็นสารตั้งต้นที่ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7M พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม ZnO โดยที่ความเข้มข้น 0.7M ลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม ZnO จะมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 31 นาโนเมตรทับถมกันก่อให้เกิดรูพรุน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มข้นนี้มีค่าสูงสุด เท่ากับ 2.2% จากการวิจัยการรวมตัวของประจุอิเล็กตรอนกับโฮล (charge recombination) ของ X. Tang และคณะ ซึ่งการรวมตัวของประจุนี้เป็น

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้ X. Tang ได้ทดลองโดยเปลี่ยนความหนาของฟิล์ม TiO_2 จากนั้นจึงนำไปจุ่มในสีย้อมไวแสง N719 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมไวแสงและระยะเวลาในการจุ่มชั้นงานแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์ม TiO_2 กับระยะเวลาในการจุ่มชั้นงานในสีย้อมไวแสงและความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกับโฮล ที่บริเวณรอยต่อของอนุภาค TiO_2 กับอิเล็กโทรไลต์ และช่วงอายุของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ภายในโมเลกุลของสีย้อมจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของประจุลดลง

๑.๓ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

๑.๓.๑ ลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

๑) การมีค่าดรรชนีหักเหสูง (high refractive index) ประมาณ 1.95–2.10 ทำให้วัสดุที่เคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์เกิดการสะท้อนแสงได้ดี

๒) คุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทนความร้อนและมีความเสถียรทางอุณหภูมิ

๓) ลักษณะสมบัติทางแสง ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.37eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าช่องว่างของแถบพลังงานของแกเลียมไนไตรด์ (GaN) และไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีราคาถูกกว่า จึงได้รับความนิยมนำมาสร้างเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ทำงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต เช่น LEDs, laser diodes, photodetectors หรือ solar cells เป็นต้น

๔) คุณสมบัติการเป็นผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์ โดยมีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ n-type ซึ่งในปัจจุบันได้มีความพยายามในงานวิจัยที่จะพัฒนาผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์ให้เป็นแบบ p-type โดยงานวิจัยบางงานได้รายงานถึงการสังเคราะห์ p-type polycrystalline film โดยผลึกเดี่ยวของซิงค์ออกไซด์สามารถขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน

๑.๓.๒ ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมมีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ต่างกันเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ ๑.๒ ประกอบด้วย

๑) กระจกใสที่ผ่านการเคลือบสารในกลุ่มออกไซด์ที่นำไฟฟ้าได้ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (anode electrode) เพื่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอน

๒) ฟิล์มของโลหะออกไซด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีรูพรุนระดับนาโนเพราะความพรุนทำให้ยึดเกาะสีย้อมไวแสงได้ดีทำหน้าที่เป็นโฟโตอิเล็กโทรด (photo electrode)

๓) สีย้อมไวแสง (sensitizing dye) มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงที่จะมากระทบ ทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสีย้อมถูกกระตุ้นและปลดปล่อยอิเล็กตรอนพลังงานสูงออกมา

๔) สารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลวที่นิยมใช้กันนั้นประกอบด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ กลีเซออลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนอาจเป็นของเหลวหรือเจล สารอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของประจุจากแคโทดรีดอกซ์ไปยังโฟโตอิเล็กโทรด และแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนดังปฏิกิริยาเคมี ดังต่อไปนี้

ในปฏิกิริยาสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมที่เป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (D^+)



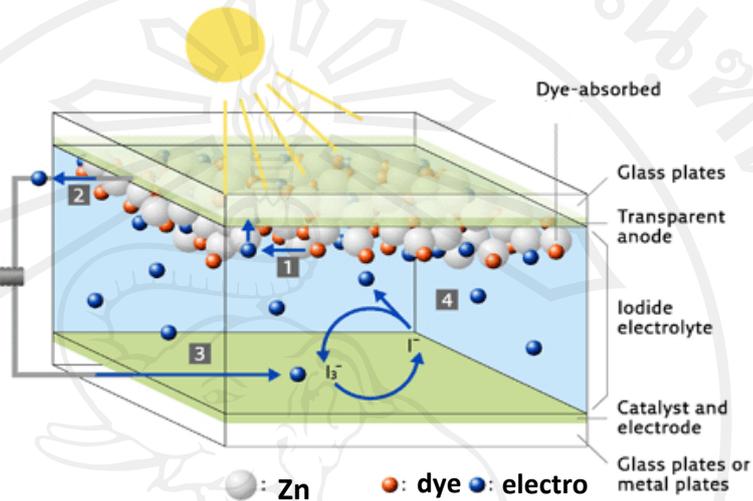
และเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับมาที่ขั้วแคโทดรีดอกซ์



นอกจากนั้นอิเล็กโทรไลต์ยังมีความสำคัญในกระบวนการไหลย้อนกลับของอิเล็กตรอน เกิดการรวมตัวของประจุระหว่าง I_3^- กับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ



๕) กระจกนำไฟฟ้าด้านล่างทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (cathode electrode) ที่จะรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกมาส่งให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อส่งอิเล็กตรอนคืนให้สีย้อมไวแสง วัสดุที่ใช้อาจเป็นฟิล์มกลุ่มออกไซด์ แก้วไฟต์หรือแพลทินัม

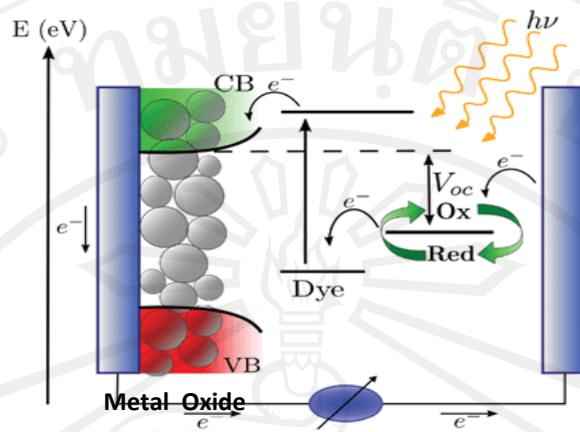


รูปที่ ๑.๒ แสดงกระบวนการเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม

(ที่มา http://www.nissha.co.jp/english/company/r_and_d/dsc/dsc_1.html)

กระบวนการเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมจะแบ่งออกเป็นสี่ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ ๑.๓

- (1) เมื่อโมเลกุลของสีย้อมไวแสงได้รับพลังงานจากโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสีย้อมถูกกระตุ้น และปลดปล่อยอิเล็กตรอนพลังงานสูงออกมา
- (2) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
- (3) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่สู่ขั้วแอนโนด (ขั้วลบ) ผ่านอนุภาคโลหะออกไซด์
- (4) อิเล็กตรอนจากขั้วแอนโนดเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกเข้าสู่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงจร
- (5) ไอโอดีน ที่ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด
- (6) ขบวนการสุดท้าย คือ โมเลกุลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะส่งอิเล็กตรอนคืนให้แก่โมเลกุลของสีย้อมไวแสง

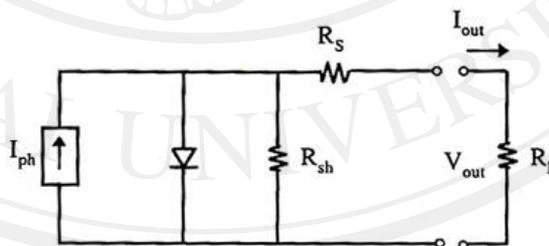


รูปที่ 1.3 ระดับพลังงานและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม
(ที่มา : <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/ee/c2ee23170k>)

๑.๓.๓ ลักษณะสมบัติ out put ของเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะสมบัติ out put ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ด้วยพารามิเตอร์ สำคัญ 5 ชนิด คือ

- 1) กระแสลัดวงจร (Short-circuit current , I_{sc}) คือ กระแส out put ที่อยู่ในสภาพลัดวงจร ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง



รูปที่ 1.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 1.4 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่าที่เกิดขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสง คือ I_0 และความต่างศักย์ไฟฟ้าคือ V เซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีรูปแบบการทำงานเหมือนไดโอด

$$I = I_0 [\exp(qV / nkT) - 1] \quad (1.1)$$

โดยที่ $I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp \left[\frac{E_g}{kT} \right]$ คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลออกสู่วงจรภายนอกจะเท่ากับผลต่างของกระแสไฟฟ้ามีดกับกระแสไฟฟ้าโฟโต ($I_{ph} = I_{sc}$) ที่เกิดขึ้นขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง จะได้ว่ากระแสไฟฟ้า out put ของเซลล์มีค่าเท่ากับ

$$I_{out} = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (1.2)$$

2) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage, V_{oc}) คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรมืด คำนวณได้จากสมการเมื่อ I_{out} เป็นศูนย์

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.3)$$

3) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) และ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) คือ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})

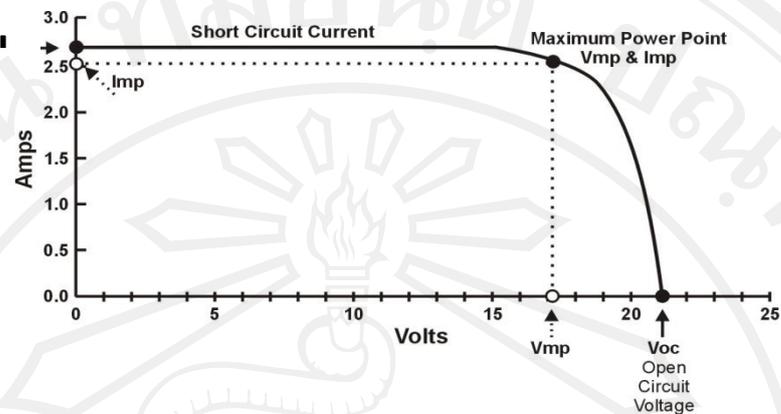
4) ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor, FF) คือ นิยามของอัตราส่วนของ $V_{max} \times I_{max}$ ต่อ $V_{oc} \times I_{sc}$

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.4)$$

5) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Efficiency, η) คือ ความสามารถในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้า out put สูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกสั้นๆว่า ประสิทธิภาพ

1.3.4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

การหาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแส หรือเรียกว่า I-V curve ดังรูปที่ ๑.๕ ที่อุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (η %) จากตำแหน่งที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า Maximum Power Point (P_{max})



รูปที่ 1.5 กราฟความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V curve)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของเซลล์ ($\eta\%$) มีดังนี้

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (1.5)$$

$$\eta\% = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \times 100 \quad (1.6)$$

เมื่อ $\eta\%$ คือ ประสิทธิภาพของเซลล์

P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์ (mW/cm^2)

P_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์ไฟฟ้า (mW/cm^2)

J_{max} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (mA/cm^2)

V_{max} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (mV/cm^2)

J_{sc} (Short circuit current) คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร หรือกระแสไฟฟ้าเมื่อความ

ต้านทานมีค่าต่ำและความต่างศักย์มีค่าเท่ากับศูนย์

V_{oc} (Open circuit voltage) คือ ความต่างศักย์วงจรเปิด หรือกระแสไฟฟ้าเท่ากับ

ศูนย์

FF คือ Fill factor

1.3.5 สิ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1) short circuit current

- การสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ I_{sc} ลด
- สารผู้ให้อิเล็กตรอนต้องดูดกลืนแสงได้ดีให้อิเล็กตรอนอิสระได้ง่ายและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้ต้องเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดได้ดีเป็นการเพิ่ม I_{sc}

2) open circuit voltage

พบว่า V_{oc} จะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy gap, E_g) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้า E_g เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าลดลง

3) อุณหภูมิ

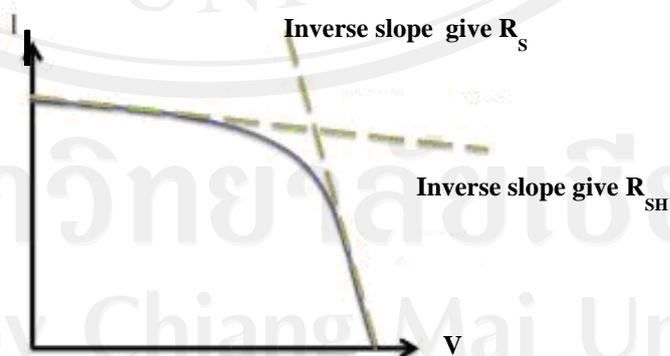
อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ความต่างศักย์และ fill factor จะลดลง (เนื่องจาก fill factor เป็นฟังก์ชันของ I_{sc} และ V_{oc}) โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา จะมีผลให้ประสิทธิภาพลดลงประมาณ 0.4-0.5%

4) ความต้านทานของเซลล์

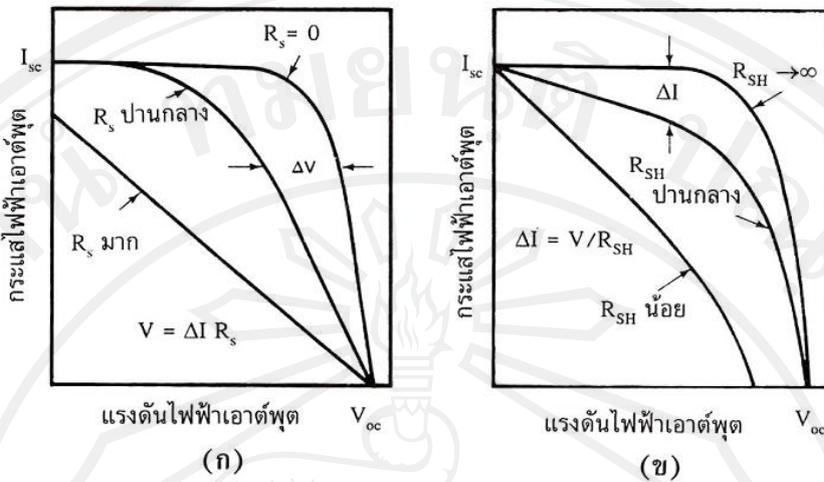
R_S = series resistances

R_{SH} = shunt resistances

สามารถคำนวณได้จะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ๑.๖



รูปที่ 1.6 แสดงการหา R_S และ R_{SH} จาก I-V curve



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_s และ R_{sh} ที่เปลี่ยนแปลงต่อ I-V curve

จากรูปที่ ๑.๗ แสดงผลของการเปลี่ยนความต้านทานภายในเซลล์ R_s และ R_{sh} ต่อ I-V curve ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟ I-V curve ที่ส่งผลต่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย R_{sh} ลดลงส่งผลให้ V_{oc} ลดลง และ R_s ส่งผลให้ I_{sc} ลด ส่งผลต่อ fill factor (FF) ซึ่งแสดงได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$FF_{sh} = FF_0 \left(1 - \frac{1}{r_{sh}}\right) \quad (1.7)$$

และ
$$FF_s = FF_0(1 - r_s) \quad (1.8)$$

เมื่อ FF_s คือ fill factor ที่มีผลมาจาก r_s

FF_{sh} คือ fill factor ที่มีผลมาจาก r_{sh}

FF_0 คือ fill factor เริ่มต้นที่มีผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์

เมื่อ fill factor ลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อให้กระแสไหลผ่านได้มากที่สุด R_s ต้องมีค่าน้อยๆ R_{sh} ต้องมีค่ามาก

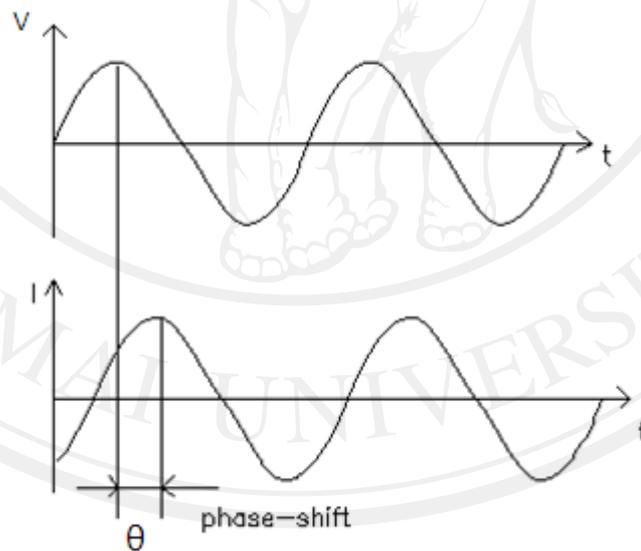
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ R_{sh} จะมีค่าเป็นอนันต์ และ R_s ควรจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์ จึงจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด

1.3.6 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนทางไฟฟ้าเคมีสเปกโทรสโคปี

(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)

EIS เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับการศึกษาคูณสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron transport property) และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (the light-to-electric conversion efficiency) วิธีวัดความต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อต่างๆ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การวัดจะทำภายใต้การให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักย์ที่มีค่าเท่ากับ V_{oc} แก่เซลล์ จากนั้นจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ออกมา ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์จะมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal potential) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะเป็นผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (a Fourier series)

ความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน (impedance) ปกติจะถูกวัดจากสัญญาณกระตุ้นต่างๆ มีลักษณะเป็น pseudo-linear กระแสไฟฟ้าจะตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงมีรูปแบบเป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับศักย์ไฟฟ้าแต่เฟสต่างกัน



รูปที่ 1.8 กระแสไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้ารูปแบบฟังก์ชันคลื่นไซน์ที่มีความต่างเฟส θ (ที่มา: <http://www.gamry.com/application-notes/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/> ,

5 กุมภาพันธ์ 2558)

จากสมการ

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos(\omega t - \theta)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \theta)} = Z_0 \exp(i\theta) = Z_0 (\cos\theta + i \sin\theta) \quad (1.9)$$

$V(t)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เวลา t ใดๆ

V_0 คือ แอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า

$I(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t ใดๆ

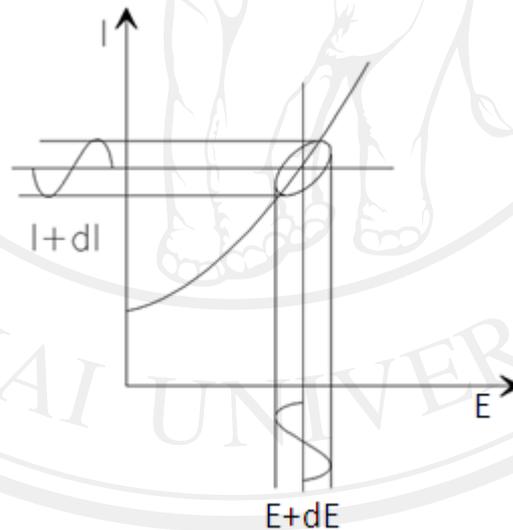
I_0 คือ แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้า

θ คือ ความต่างเฟส

ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม, $\omega = 2\pi f$

f คือ ความถี่

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I(t)$ และ $V(t)$ จะได้ลักษณะดังรูปที่ 1.9 ซึ่งรู้จักกันว่า เป็น "Lissajous Figure" การพิจารณา Lissajous Figure ในออสซิลโลสโคปถูกนำมาใช้วัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนในแบบจำลองของเครื่องวัด EIS

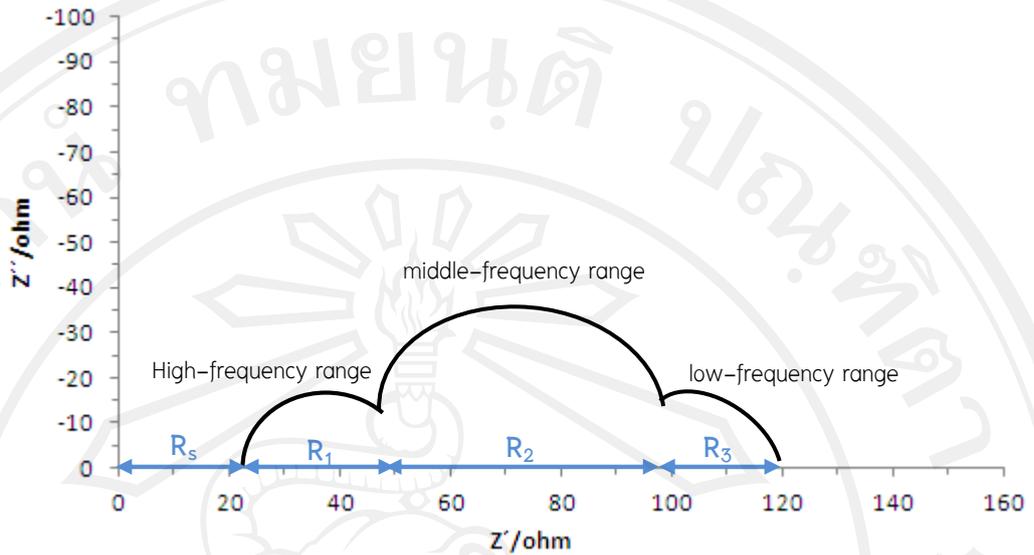


รูปที่ 1.9 Lissajous Figure

(ที่มา: <http://www.gamry.com/application-notes/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/> ,

5 กุมภาพันธ์ 2558)

จากสมการที่ 1.9 เมื่อนำความต้านทานเชิงซ้อนในส่วนของค่าจริงมาเขียนกราฟเป็นแกน x และนำส่วนจินตภาพมาเขียนกราฟเป็นแกน y จะได้กราฟที่เรียกว่า “Nyquist plot”



รูปที่ 1.10 Nyquist plot ของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำได้ที่ความถี่ 10^{-1} - 10^5 Hz โดยปกติ Nyquist plots จะมีเป็นรูปครึ่งวงกลมเรียงกัน 3 วง ดังแสดงในรูปที่ 1.11 โดย ครึ่งวงกลมแรกที่ช่วงความถี่ต่ำๆ (low-frequency < 1 Hz) สอดคล้องกับ the Warburg diffusion process ของ I/I_0 ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ครึ่งวงกลมที่ใหญ่ตรงกลาง ที่ช่วงความถี่ (middle frequency = 1- 10^3 Hz) แสดงถึงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ/สีย้อมไวแสง/อิเล็กโทรไลต์ (the oxide layer/dye/electrolyte interface) และ ครึ่งวงกลมที่ความถี่สูง (High-frequency range > 10^3 Hz in kHz range) แสดงถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ (the redox reaction) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อของแพลตินัมอิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ (Pt counter electrode/electrolyte interface) Nyquist plots จะแสดงความต้านทานในแนวแกน x และความต้านทานเชิงซ้อนในแนวแกน y ค่าความต้านทานต่างๆที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อสามารถอ่านได้จากกราฟ ได้แก่

R_s คือ ความต้านทานเริ่มต้นของกระจกนำไฟฟ้า

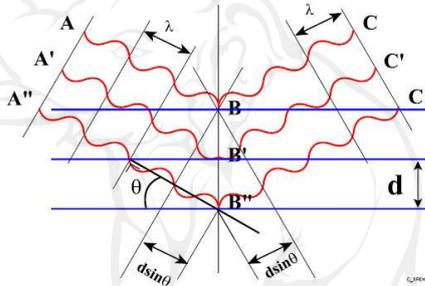
R_1 คือ ความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอน บริเวณรอยต่อระหว่างแพลตินัมอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์

R_2 คือ ความต้านทานของการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ/สีย้อมไวแสง/อิเล็กโทรไลต์

R_3 คือ ความต้านทานสารของสารอิเล็กโทรไลต์

1.3.7 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและ ขนาด Unit Cell ไม่เหมือนกัน ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงภายในโครงสร้างผลึกแตกต่างกันด้วย จาก XRD patterns เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆที่ผสมอยู่ในวัสดุ กับรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ นำไปสู่การวิเคราะห์ว่าสารตัวอย่างประกอบไปด้วยสารชนิดใดและปริมาณของสารองค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่างมีค่าเท่าใด นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาค, ความเครียดของตัวอย่าง ความหนาของฟิล์ม และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย



รูปที่ 1.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(ที่มา: ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง)

โดยธรรมชาติรังสีเอกซ์จะสามารถทะลุทะลวงเข้าสู่ระนาบของผลึกหลายร้อยชั้น โดยระนาบของผลึกในแต่ละชั้นจะทำหน้าที่กระเจิงรังสีเอกซ์ออกไปในทุกทิศทางดังแสดงในรูปที่ 1.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในผลึก

ถ้ารังสีเอกซ์ที่ยิงเข้าไปในผลึกมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างของระนาบแต่ละชั้น (interplanar spacing) จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ดังนั้นถ้าหากทราบความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ก็จะสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้โดยอาศัยสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ในสมการที่ 1.10

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (1.10)$$

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระนาบระนาบ (hkl)

θ คือ มุมตกกระทบ

λ คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบนเป็นเลขจำนวนเต็ม ($n=1,2,3,\dots$)

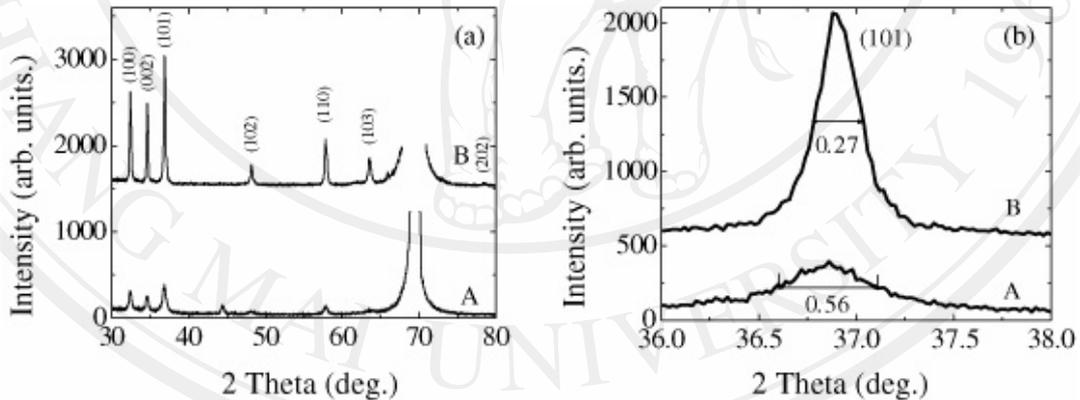
จาก XRD patterns ดังแสดงในรูปที่ 1.12 สามารถนำมาคำนวณหาขนาด grain size เฉลี่ยของอนุภาคภายในสารตัวอย่างได้จากสมการของ Scherrer's equation

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1.11)$$

เมื่อ D คือ the crystallite size,

k คือ the shape factor (0.9)

β คือ the full width at half maximum (FWHM) ในหน่วยเรเดียน



รูปที่ 1.12 (a) XRD patterns และ (b) การหาค่า the full width at half maximum (FWHM)

(ที่มา : งานวิจัยของ L. Da และคณะ)

๑.๔ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ๑) เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ด้วยกระบวนการสปาร์ก
- ๒) เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ด้วยกระบวนการ sol-gel
- ๓) เพื่อนำฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม

๑.๕ ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมฟิล์ม ZnO ด้วยกระบวนการสปาร์ก และกระบวนการ sol-gel บนกระจกนำไฟฟ้า FTO เท่านั้น นำชิ้นงานที่เคลือบฟิล์ม ZnO ในเงื่อนไขต่างๆไปจุ่มในสีย้อมไวแสงที่ระยะเวลาแตกต่างกัน จากนั้นประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและทำการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ หาเงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม ZnO และระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง ที่ทำให้มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์ดีที่สุด

บทที่ 2 วิธีการวิจัย

๑) เตรียมฟิล์ม ZnO

เตรียมโดยวิธีสปาร์กสวดสังกะสีบนกระจกนำไฟฟ้า fluorine doped tin-oxide (FTO) ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของสวด จะทำให้เกิดการสปาร์กเกิดอนุภาคของ ZnO ตกสะสมบนกระจก การเตรียมฟิล์มจะทำให้ความหนาต่างๆ โดยเปลี่ยนระยะเวลาการสปาร์ก ๒-๙ ชั่วโมง จากนั้นนำกระจกที่เคลือบ ฟิล์ม ZnO ที่ความหนาต่างๆนี้ ไปอบที่อุณหภูมิ ๓๕๐, ๔๕๐ และ ๕๕๐ °C เป็นเวลา ๖๐ นาที

เตรียมสารละลาย ZnO โดยวิธี sol-gel ผสม Zinc acetate ในตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7M ตามลำดับ นำสารละลายไปเคลือบบน FTO โดยวิธี doctor blade และนำไปเผาที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง

- สปาร์กสวดซิงค์จำนวน ๕ รอบ บนฟิล์ม ZnO ที่เตรียมฟิล์มโดยวิธี doctor blade นำไปเผาที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C เป็นเวลา ๓๐ นาที

2) ผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ความเข้มข้น 0.3 M ของ LiI กับ 0.03 M ของ I₂ ในอะซิโตนไตรีท

3) การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม ZnO

- วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)
- วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
- วิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่อง RAMAN spectroscopy
- วิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

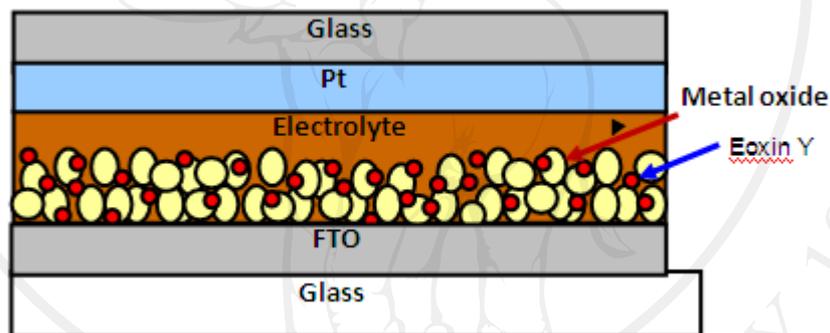
4) สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมต้นแบบ ดังรูปที่ ๒.๑ นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม ZnO และอบที่อุณหภูมิต่างๆ ไปจุ่มในสารละลายสีย้อมไวแสง Eoxin Y ความเข้มข้น 0.58mM เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคของฟิล์มดูดซับอนุภาคของสีย้อมไว้ จากนั้นจึงหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงบนชิ้นงาน และนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ

5) ปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นี้โดยเลือกเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม ZnO ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดมาศึกษาต่อโดยทำการปรับเปลี่ยน

- ความหนาของฟิล์ม
- สีย้อมไวแสงเป็น N719 ความเข้มข้น 0.3mM
- ระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงานในสีย้อมไวแสงเป็น ๑๐ นาที, ๒๐ นาที, ๓๐ นาที, ๖๐ นาที และ ๒๔ ชั่วโมงตามลำดับ

6) เตรียมฟิล์ม ZnO ผสมระหว่างการสปาร์กและวิธี sol-gel โดยทำการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ZnO ที่เตรียมจากวิธี sol-gel นำสารละลายนี้ไปเคลือบบนกระจก FTO โดยเลือกเงื่อนไขที่ความหนาของฟิล์ม ZnO ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C เป็นเวลา ๖๐ นาที และจุ่มชิ้นงานในสีย้อมไวแสง N719 แล้วนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมและวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

7) เขียนรายงานผลการทดลอง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

บทที่ 3

ผลการทดลอง

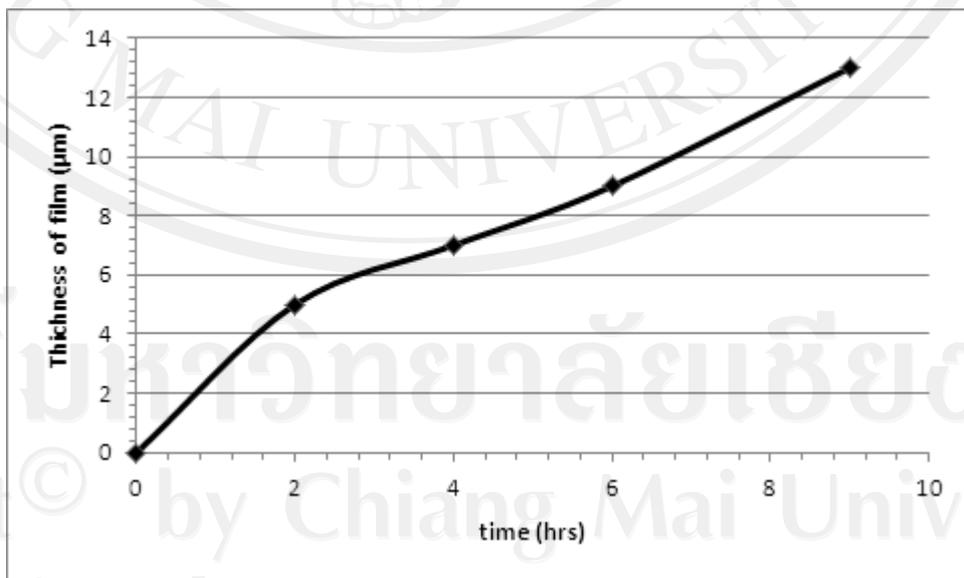
๓.๑ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการสปาร์ก

๓.๑.๑ การเตรียมฟิล์ม ZnO จากวิธีการสปาร์กวดสังกะสีบนกระจก (glass slide)

สปาร์กวดสังกะสีบนกระจกสไลด์ โดยระยะห่างระหว่างลวดกับกระจกเท่ากับ ๐.๑ เซนติเมตร นำฟิล์ม ZnO ที่เตรียมไว้ไปเผาที่อุณหภูมิ ๓๕๐ °C เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง วิเคราะห์ความหนาของฟิล์มด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง SEM พบว่า ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสปาร์กที่เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงซึ่งกันและกัน ดังแสดงในตารางที่ ๓.๑ และรูปที่ ๓.๑

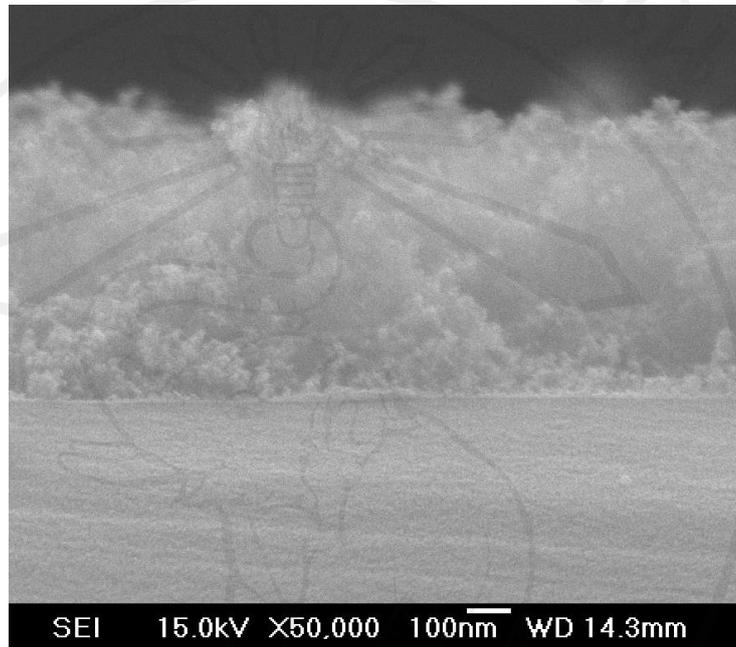
ตารางที่ ๓.๑ แสดงความหนาของฟิล์ม ZnO ตามระยะเวลาการสปาร์ก

โลหะออกไซด์	ระยะเวลาการสปาร์ก (hour)	ความหนา (μm)
ZnO	2	~5.0
	4	~7.0
	6	~9.0
	9	~13.0



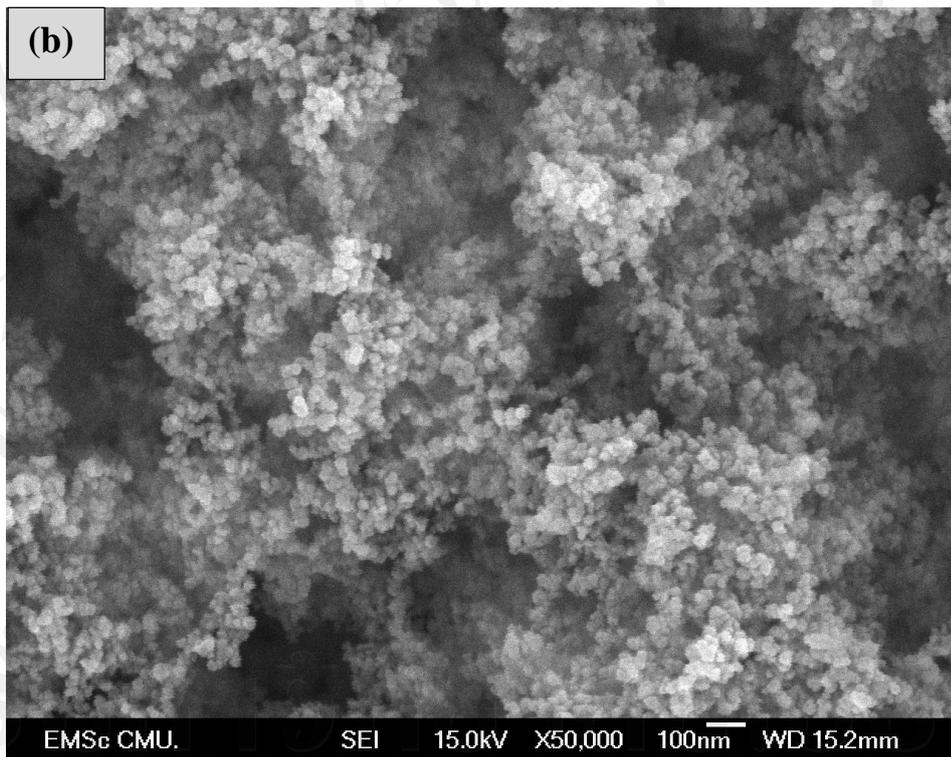
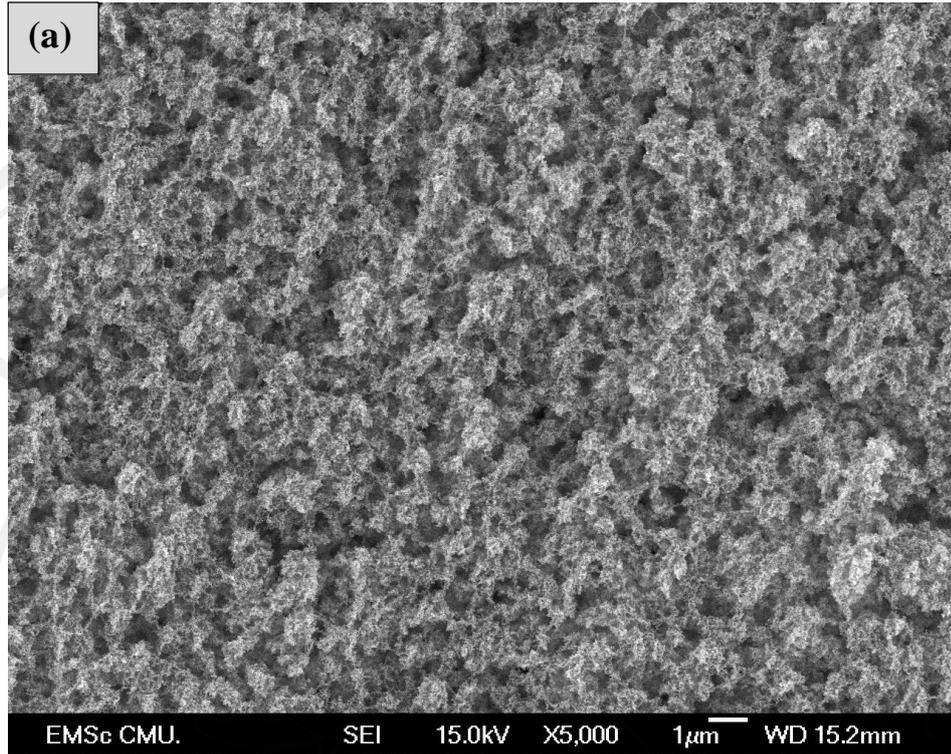
รูปที่ ๓.๑ ความหนาของฟิล์ม ZnO ตามระยะเวลาการสปาร์ก

จากภาพถ่ายตัดขวาง SEM ของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยกระบวนการสปาร์ก บนกระจกนำไฟฟ้า พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคขนาดเล็กเรียงตัวซ้อนทับถมกันเป็นชั้นคล้ายฟองน้ำดังแสดงในรูปที่ ๓.๒



รูปที่ ๓.๒ Cross section image ของฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์ก

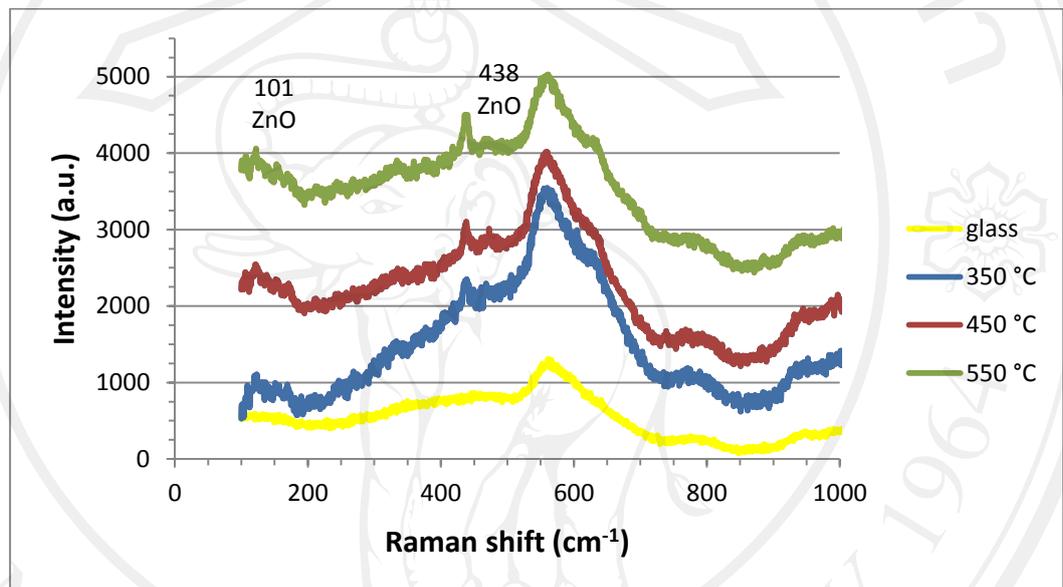
รูปที่ ๓.๓ แสดงลักษณะพื้นผิวด้านบน (Top view image) ของฟิล์ม ZnO พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคขนาดเล็กเกาะกลุ่มทับถมกัน มีความพรุนสูง คุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่ดีของฟิล์มที่จะนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมไวแสงและสารอิเล็กโทรไลต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ ๓.๓ ลักษณะอนุภาคฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์ก (a) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

๓.๑.๒ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์กที่อุณหภูมิ ต่างๆ ด้วยเครื่อง RAMAN spectroscopy

เตรียมฟิล์ม ZnO ที่ระยะเวลาการสปาร์ก ๖ ชั่วโมง นำชิ้นงานที่เตรียมนี้ไปเผาที่
อุณหภูมิ ๓๕๐, ๔๕๐ และ ๕๕๐ °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วไปวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม
ด้วยเครื่อง RAMAN spectroscopy



รูปที่ ๓.๔ Raman spectra ของ ZnO เตรียมโดยกระบวนการสปาร์กเผาที่อุณหภูมิต่าง

เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟ Raman spectra ชิ้นงานที่เคลือบ ZnO พบ peak ที่แสดงถึง
ฟิล์ม ZnO ที่ 101 cm^{-1} และ 438 cm^{-1} โดยที่อุณหภูมิ ๕๕๐ °C จะพบ peak ของ ZnO ที่เด่นชัดกว่า
อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ๓.๔

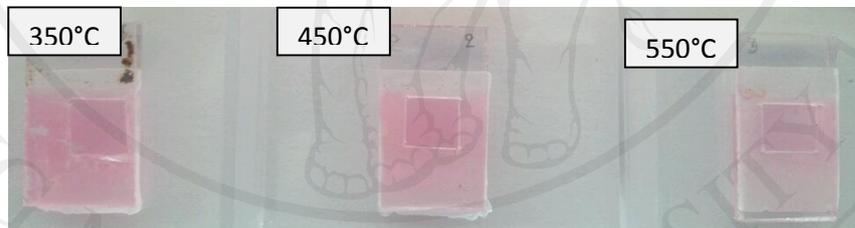
3.๑.๓ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO โดยกระบวนการ สปาร์ก

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมมีส่วนประกอบเซลล์แสดงในรูปที่ ๓.๕ ประกอบ
ด้วยกระจกนำไฟฟ้า FTO ซึ่งเป็นขั้วลบ, metal oxide films, สีย้อมไวแสง Eoxin Y, สารละลายอิ
เล็กโตรไลต์ และแพลตินัม (Pt) เป็นขั้วบวก



รูปที่ ๓.๕ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นในการทดลอง

นำชิ้นงานที่เคลือบฟิล์ม ZnO ที่ระยะเวลาการสปาร์กบนกระจก FTO ๖ ชั่วโมง ไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม โดยจุ่มชิ้นงานในสารละลายสีย้อมไวแสง Eoxin Y ความเข้มข้น 0.548 mM เป็นเวลา ๑ ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ที่อุณหภูมิในการอบมากขึ้นการดูดซับอนุภาคสีย้อมไวแสงของฟิล์มจะน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ ๓.๖ เนื่องจากอนุภาคของ ZnO มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบ ตามงานวิจัยของนายวีรเดชและคณะ ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสสารละลายและการแทรกซึมของอนุภาคสีย้อมไวแสงเป็นไปได้ยาก



รูปที่ ๓.๖ ผลการจุ่มชิ้นงานเคลือบ ZnO บนกระจก FTO ใน Eoxin Y

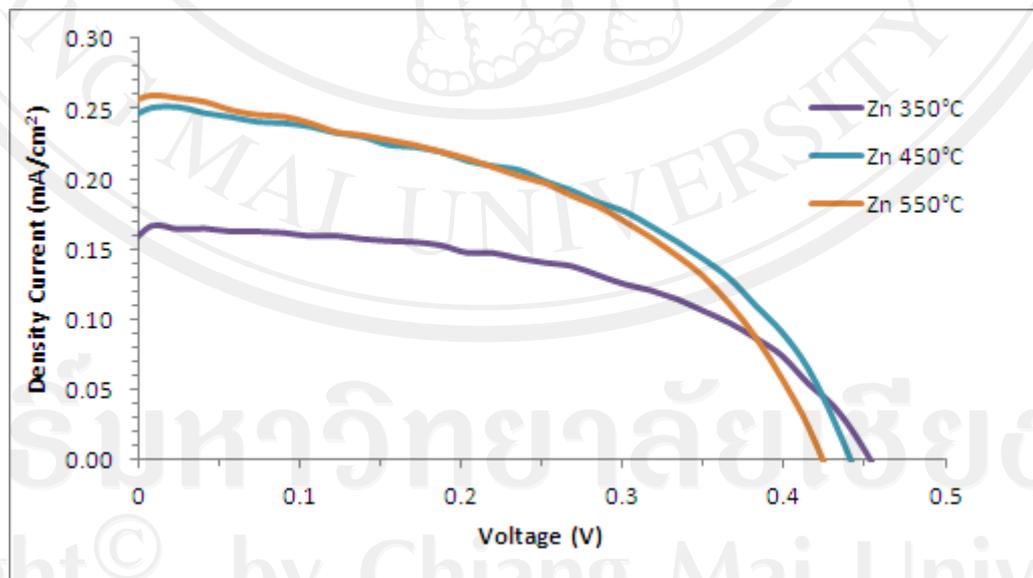
นำชิ้นงานที่จุ่มสีย้อมไวแสงแล้วไปทดสอบหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) โดยหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี ส่วนผสม 0.3M ของลิเทียมไอโอดีน (Lithium iodide, LiI) กับ 0.03M ของไอโอดีน (I_2) ในอะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile) แล้วนำไปวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้รับพลังงานจากโฟตอน(แสง) อิเล็กตรอนของสีย้อมไวแสง จะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) หรือ LUMO level (lowest unoccupied molecular orbital) อิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นนี้จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วลบ

(Anode) โดยผ่าน conduction band ของอนุภาค ZnO แล้วไหลไปยังขั้วบวก (cathode) ซึ่งทำจาก แพลตตินัม จากนั้นสารอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วบวกเพื่อคืนให้กับสีย้อม ไวแสงเกิดกระแสไฟฟ้าในวงจร จากกระบวนการดังกล่าวสามารถวัดกระแสไฟฟ้า ความต่าง ศักย์ Fill factor (FF%) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดังตารางที่ ๓.๒

ตารางที่ ๓.๒ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็น พลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการสปาร์ก

อุณหภูมิ (°C)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	%FF	η (%)
350	0.46	0.161	52.29	0.038
450	0.44	0.248	48.84	0.053
550	0.42	0.258	47.08	0.051



รูปที่ ๓.๓ J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO

เตรียมโดยกระบวนการสปาร์ก

จากตารางที่ ๓.๒ และรูปที่ ๓.๗ พบว่า ฟิล์ม ZnO ระยะเวลาการสปาร์ก ๖ ชั่วโมงเผา ที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เท่ากับ 0.053% โดยมีค่า $J_{sc} = 0.248 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0.44 \text{ V}$ และ %FF = 48.84% ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่เตรียมฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์กมีค่าต่ำมาก เนื่องจากฟิล์ม ZnO หลุดระหว่างการประกอบเซลล์

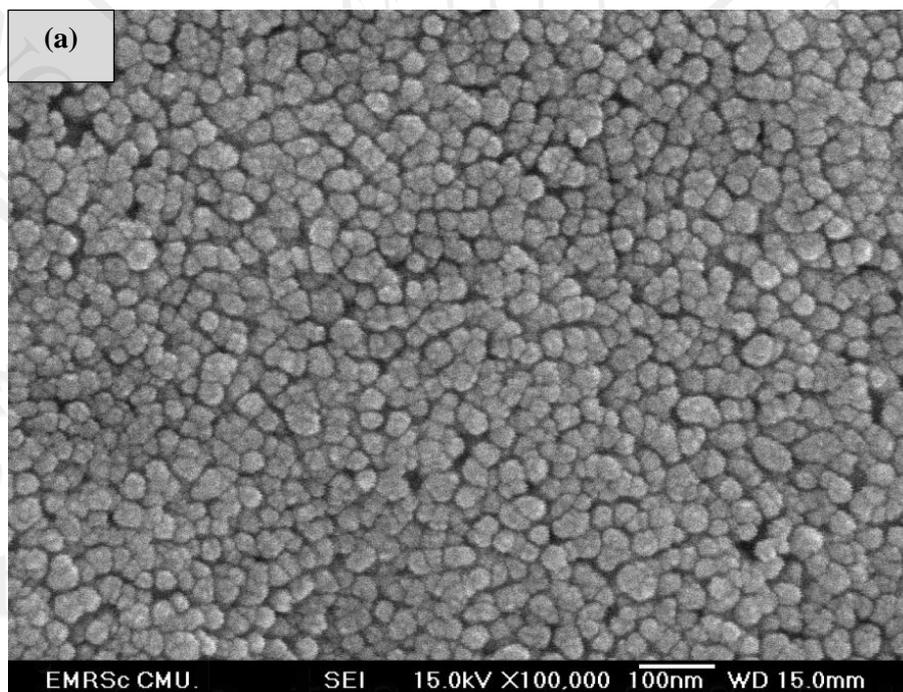
๓.๒ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์โดย

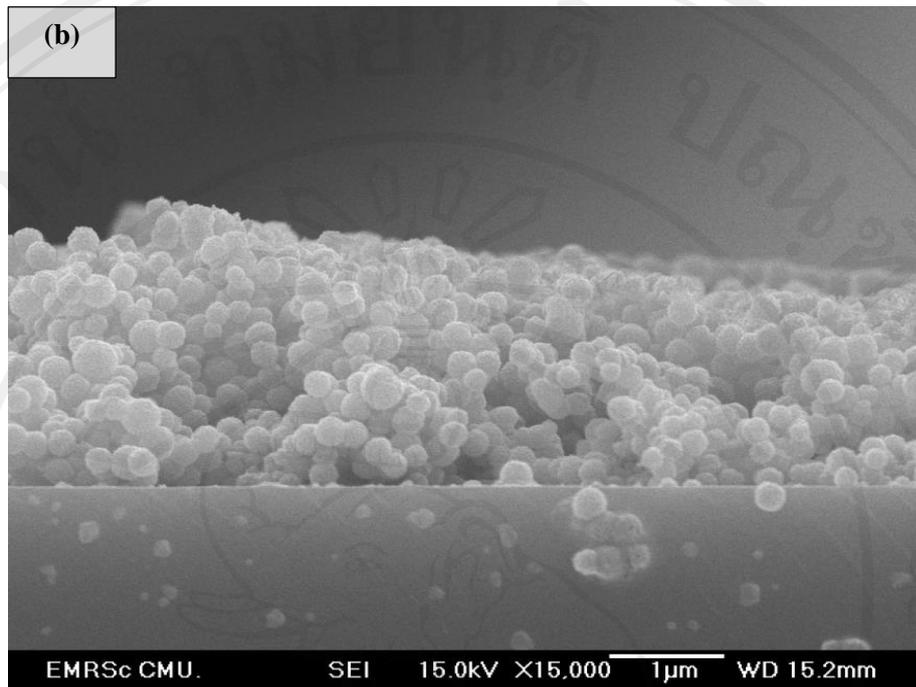
กระบวนการ sol-gel

๓.๒.๑ การวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM

เตรียมสารละลาย ZnO โดยผสมสารตั้งต้น Zinc Acetate ในตัวทำละลายเอทานอล นำสารละลาย ZnO ที่เตรียมนี้ไปเตรียมฟิล์มโดยการ doctor blade บนกระจก FTO ควบคุมความหนาของฟิล์มโดยใช้เทป ๑ ชั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C ๖๐ นาที

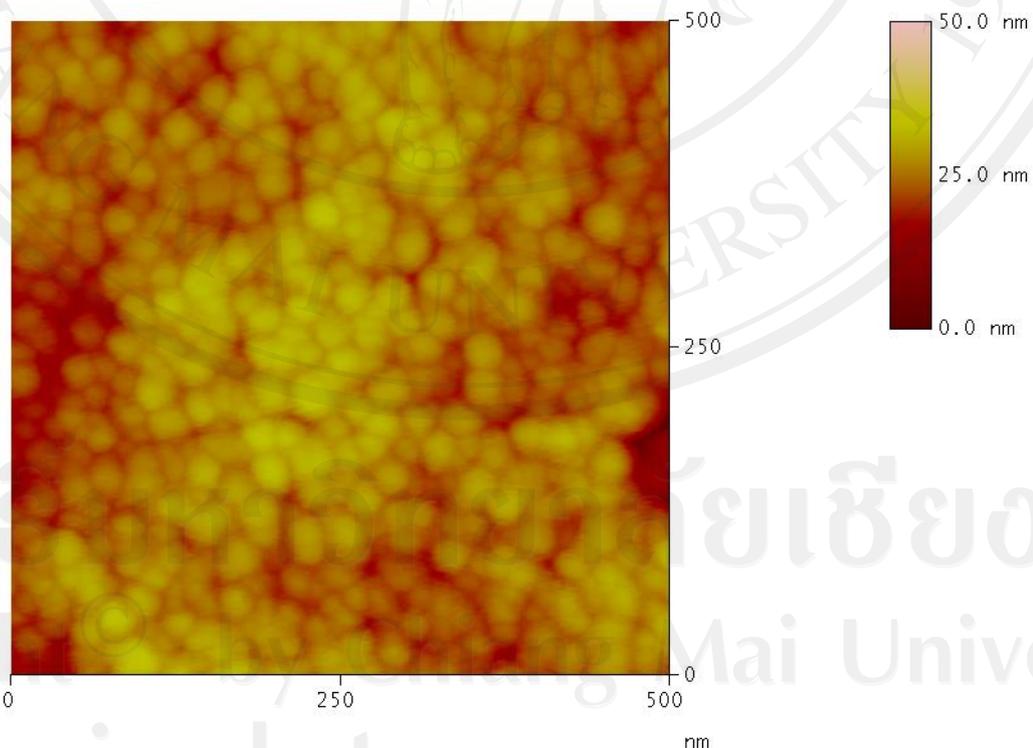
จากรูปที่ ๓.๘ แสดงลักษณะของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้จากวิธี sol-gel มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กซ้อนทับถมกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ~24 -37 นาโนเมตร และการวิเคราะห์ morphology ของฟิล์ม ZnO ด้วย AFM image ยืนยันว่าอนุภาคของ ZnO ที่สังเคราะห์จากวิธี sol-gel มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีค่า surface mean roughness (Ra) เท่ากับ 2.784 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9





รูปที่ ๓.๘ SEM image แสดงลักษณะอนุภาคฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

(a) Top view image (b) cross section image



รูปที่ ๓.๙ AFM images ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

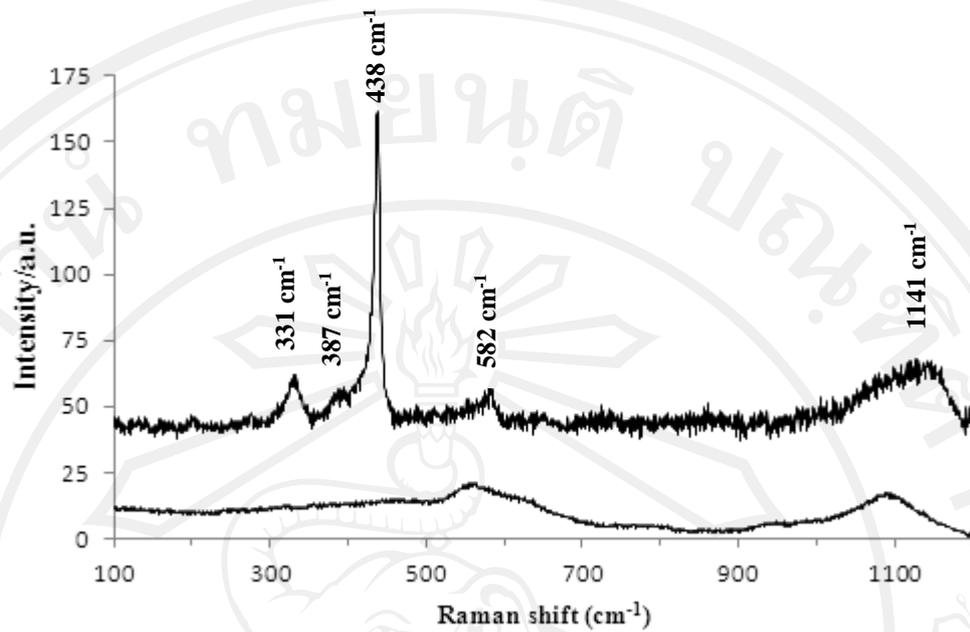
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง Raman

spectrometer

โดยทั่วไปโครงสร้างฟิล์ม ZnO จะเป็นแบบ The Wurtzite hexagonal nanostructure ที่อยู่ใน C_{6v}^4 (P6₃mc) space group ในการหมุนรอบแกน 240° สำหรับอนุภาค ZnO ที่มีความเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ จาก the group theory ได้ทำนายพฤติกรรมของการสั่นไหวหกแบบที่แตกต่างกันในรูปแบบของ irreducible representation (Γ) โดยโฟนอนที่เกิดจากการกระตุ้นทางแสงที่ตำแหน่ง Γ ของ the Brillouin zone เท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับ first-order Raman scattering

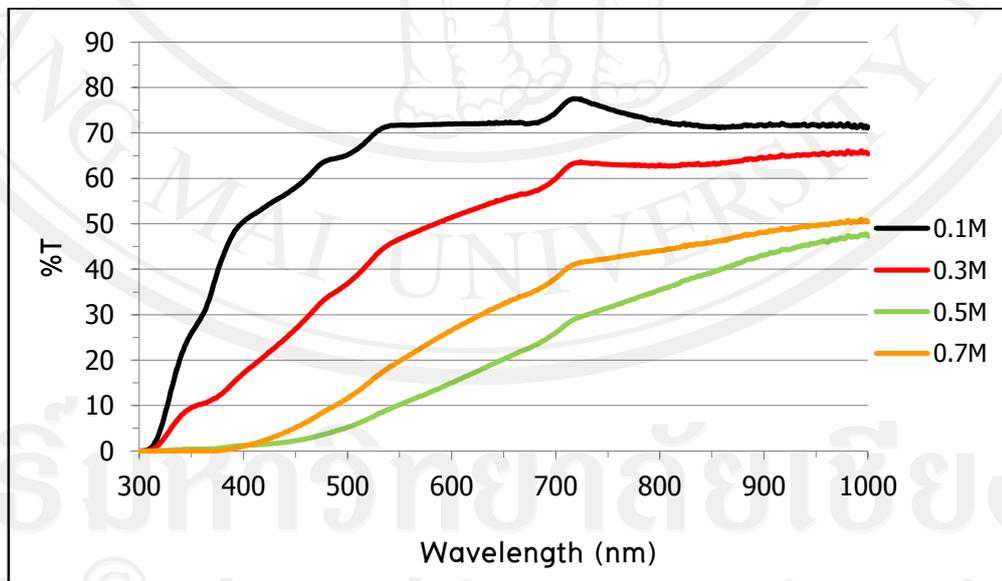
$$\Gamma = A_1 + 2B_1 + E_1 + 2E_2$$

เมื่อโหมดของ A_1, E_1 และ E_2 คือ Raman active โดยกรณีโหมดการสั่นของ A_1 และ E_2 เป็น infrared active และแยกออกเป็นสององค์ประกอบ ได้แก่ transverse optical (TO) และ longitudinal optical (LO) รามานสเปกตรัมของ ZnO ที่มีโครงสร้างระดับนาโนแสดงในรูปที่ 3.10 จากรามานสเปกตรัมพบพีดที่เด่นที่สุดที่ตำแหน่ง 438 cm^{-1} ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากโฟนอนที่ถูกระตุ้นทางแสงโหมด E_2 ยืนยันได้ว่าฟิล์ม ZnO ที่สังเคราะห์นี้มีรูปแบบโครงสร้างเป็น wurtzite hexagonal phase และพบรามานพีดสั้นๆรองลงมาอีกสองพีดที่ตำแหน่ง 331 และ 387 cm^{-1} ซึ่งพีดนี้แสดงถึงมัลติโฟนอน(multiphonon) โหมด the $E_{2H} - E_{1L}$ และ A_{1T} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบรามานพีดเล็กๆที่ 582 cm^{-1} ที่สัมพันธ์กับโหมดการสั่น E_{1L} ที่เกิดจาก Raman scattering เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก เช่น oxygen anion vacancies และ zinc cation interstitials เป็นต้น และพีดที่ 1141 cm^{-1} ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิด multiphonons



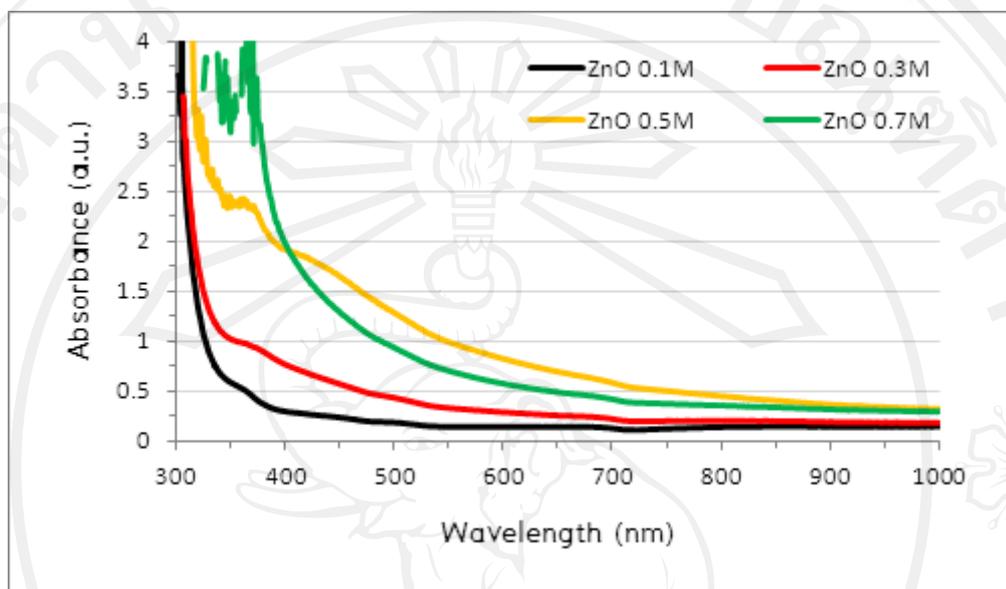
รูปที่ 3.10 Raman spectra ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

๓.๒.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO จากกระบวนการ sol-gel ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer

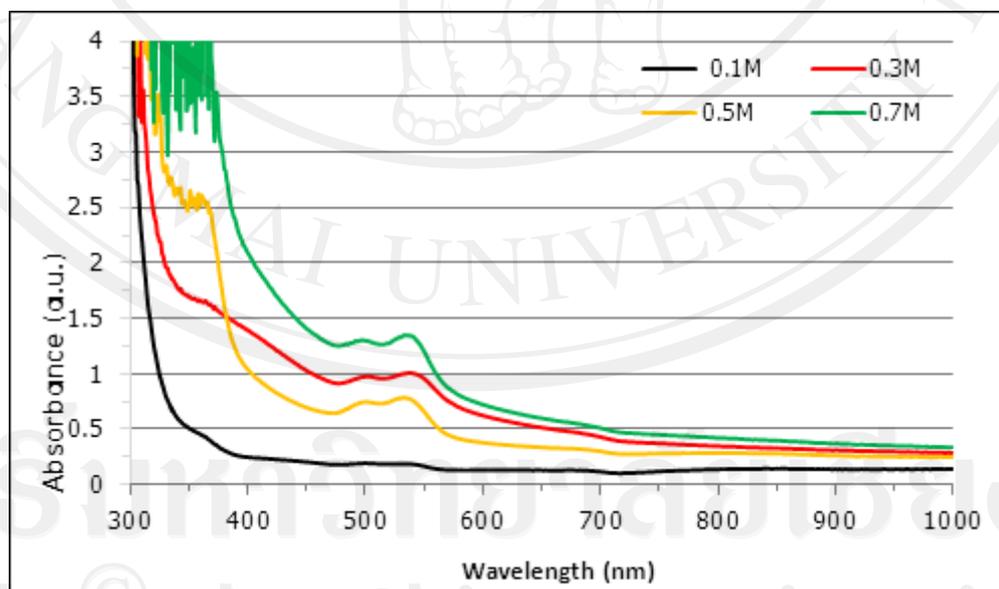


รูปที่ ๓.๑1 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

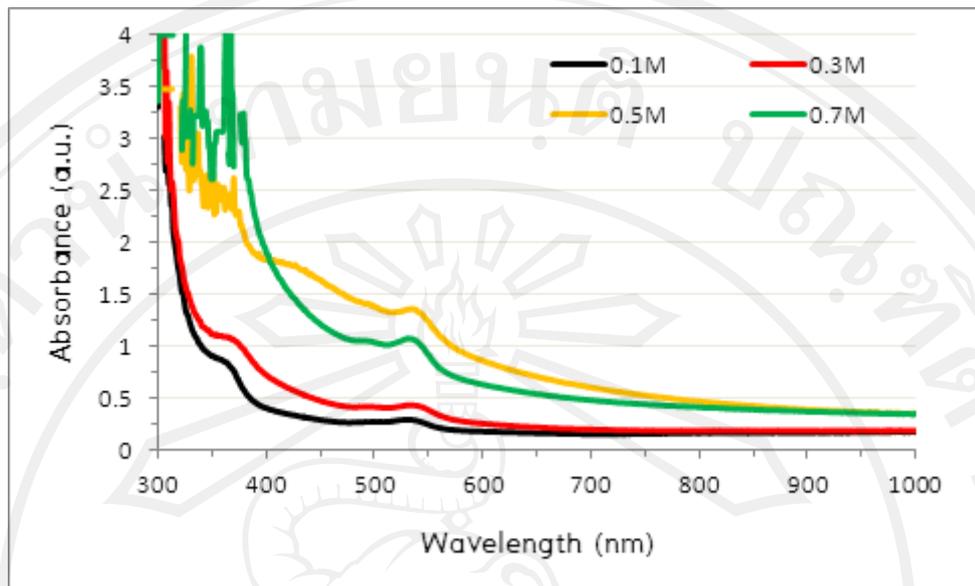
เมื่อวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยเครื่อง UV-Vis spectrometer พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.1 M แสงสามารถส่องผ่านได้ดีที่สุดเนื่องจากฟิล์มมีลักษณะเป็นสีใสโปร่งแสง รองลงมาได้แก่ 0.3 M, 0.7 M และ 0.5 M ตามลำดับ ดังรูปที่ ๓.๑1



รูปที่ ๓.๑2 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ที่ไม่ได้จุ่มสีย้อม Eoxin Y



รูปที่ ๓.๑3 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ที่จุ่มสีย้อม Eoxin Y



รูปที่ ๓.๑4 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel และ spark 5 รอบ จุ่มสีย้อม Eoxin Y

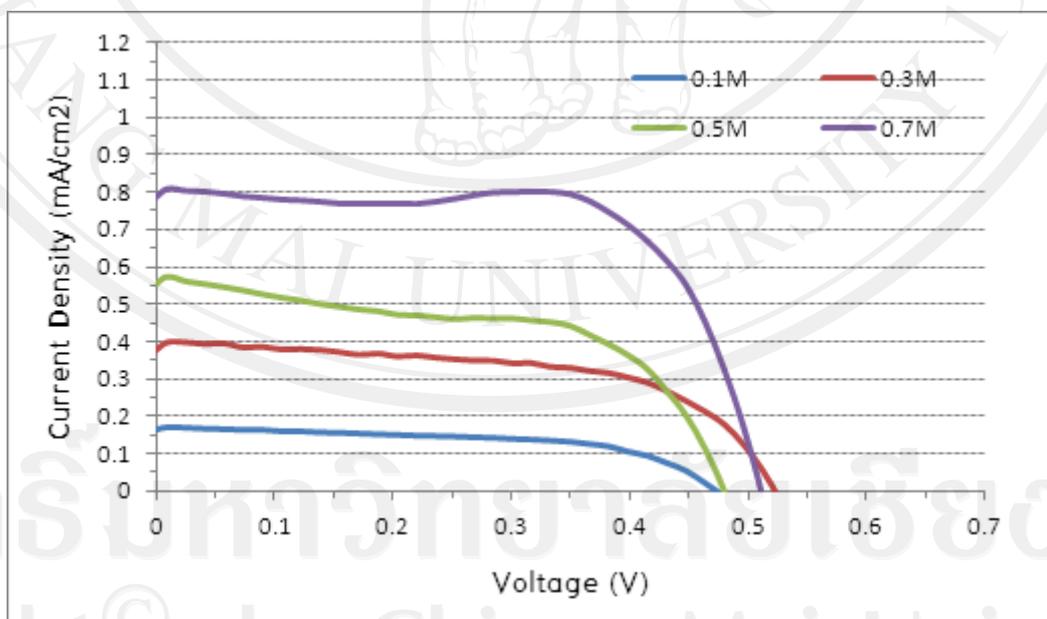
เมื่อเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel จุ่มและไม่ได้จุ่มในสีย้อม Eoxin Y พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม ZnO และจุ่มในสารละลายสีย้อมไวแสง Eoxin Y ความเข้มข้น 0.58mM เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง จะพบการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่มีความยาวคลื่นประมาณ 475-550 nm โดยที่ความเข้มข้น 0.7 M ของ Zinc Acetate จะมีลักษณะการดูดกลืนแสงมากที่สุด รองลงมาได้แก่ความเข้มข้น 0.3 M และ 0.5 M ตามลำดับ ขณะที่ฟิล์ม ZnO ที่ความเข้มข้น 0.1 M พบการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสงน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ ๓.๑2 และ ๓.๑3 และเมื่อสปาร์กสวดซึ่งคือออกไซด์ ลงบนฟิล์มที่เตรียมโดยวิธี sol-gel โดยความสูงของลวดจากชิ้นงานเท่ากับ ๐.๘ เซนติเมตร พบว่า การดูดกลืนแสงของช่วง 475-550 nm ลดลง แสดงว่าการมีจำนวนการแทรกซึมของอนุภาคของ Eoxin Y ลดลง ดังแสดงในรูปที่ ๓.๑4

๓.๒.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO โดยกระบวนการ sol-gel

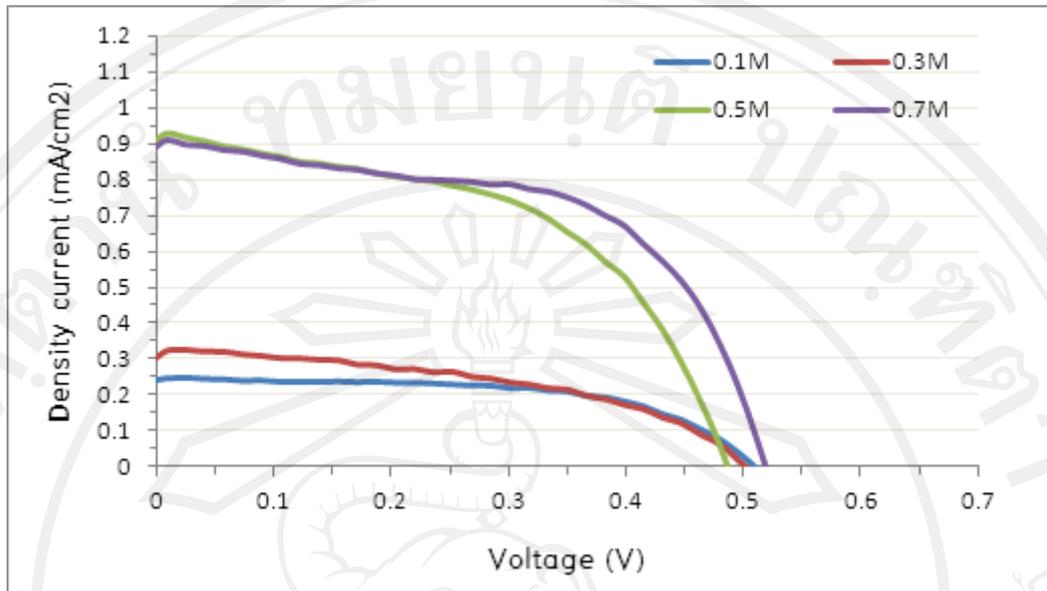
จุ่มฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 1 รอบในสารละลายสีย้อมไวแสง Eoxin Y ความเข้มข้น 0.58mM เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง แล้วนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยผสมสารอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้น 0.3 M ของ LiI กับ 0.03 M ของ I_2 ในอะซิโตนไนด์ท์ ในอะซิโตนไนด์ท์ และแพลตตินัมเป็นขั้วบวก

ตารางที่ ๓.๓ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO ที่ความเข้มข้นสารละลายต่างๆ

เซลล์แสงอาทิตย์	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	%FF	η (%)
ZnO 0.1M	0.47	0.17	59.00	0.05
ZnO 0.3M	0.52	0.38	60.96	0.12
ZnO 0.5M	0.47	0.56	58.68	0.15
ZnO 0.7M	0.50	0.79	71.47	0.29
ZnO 0.1M+spark	0.50	0.24	60.37	0.07
ZnO 0.3M+spark	0.50	0.31	48.45	0.08
ZnO 0.5M+spark	0.49	0.91	51.76	0.23
ZnO 0.7M+spark	0.52	0.90	57.37	0.27



รูปที่ 3.๑5 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 1 รอบ จากการเตรียมโดยกระบวนการ sol-gel



รูปที่ 3.16 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 1 รอบ ที่สปราร์กลดซิงค์บนฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

ตารางที่ ๓.๓ แสดงการวัดตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.7 M ของ Zinc Acetate ในแอทานอล ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.29% โดยมีค่า $V_{oc} = 0.50$ V, $J_{sc} = 0.79$ mA/cm² และค่า %FF = 71.41% และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบฟิล์ม ZnO ชั้นที่สองโดย การสปราร์กลดสังกะสีจำนวน ๕ รอบลงบนฟิล์ม ZnO ที่เตรียมโดยวิธี sol-gel กับไม่ได้เคลือบ พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นเป็น $= 0.52$ V และ $J_{sc} = 0.90$ mA/cm² ส่วนค่า %FF ลดลงเหลือ 51.37%

เมื่อพิจารณา J-V curve ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16 พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารละลาย และเมื่อสปราร์กลดสังกะสีจำนวน ๕ รอบลงบนฟิล์ม ZnO ที่เตรียมโดยวิธี sol-gel พบว่า ความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพกลับลดลง เนื่องจาก %FF ลดลง

๓.๓ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจากการเตรียมฟิล์ม ซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการ sol-gel

๓.๓.๑ การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์ม ZnO

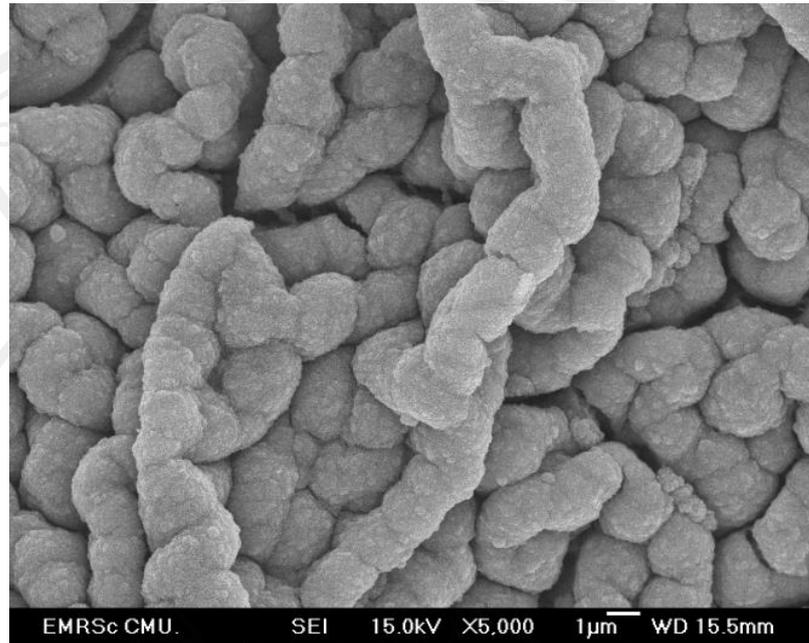
เตรียมสารละลาย ZnO โดยผสมสารตั้งต้น Zinc Acetate ในตัวทำละลายเอทานอลที่
ความเข้มข้น 0.7 M นำสารละลาย ZnO ที่เตรียมนี้ไปเตรียมฟิล์มโดย doctor blade บนกระจก
FTO ควบคุมความหนาของฟิล์มโดยใช้เทป และทำการเคลือบฟิล์ม ZnO ซ้ำจำนวน ๒, ๓, 4
และ 5 รอบตามลำดับ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ ๔๕๐ °C ๖๐ นาที

ความหนาของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้จากวิธี sol-gel จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่ทำการ
screen printing ดังแสดงในตารางที่ ๓.๔

ตารางที่ ๓.๔ แสดงความหนาของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้จากวิธีการ doctor blade

จำนวนรอบการเคลือบ	ความหนาของฟิล์ม ZnO (μm)
1	~2.4-2.8
2	~4.3-4.8
3	~5.6-6.2
4	~9.6-16.5
5	~10.2-19.5

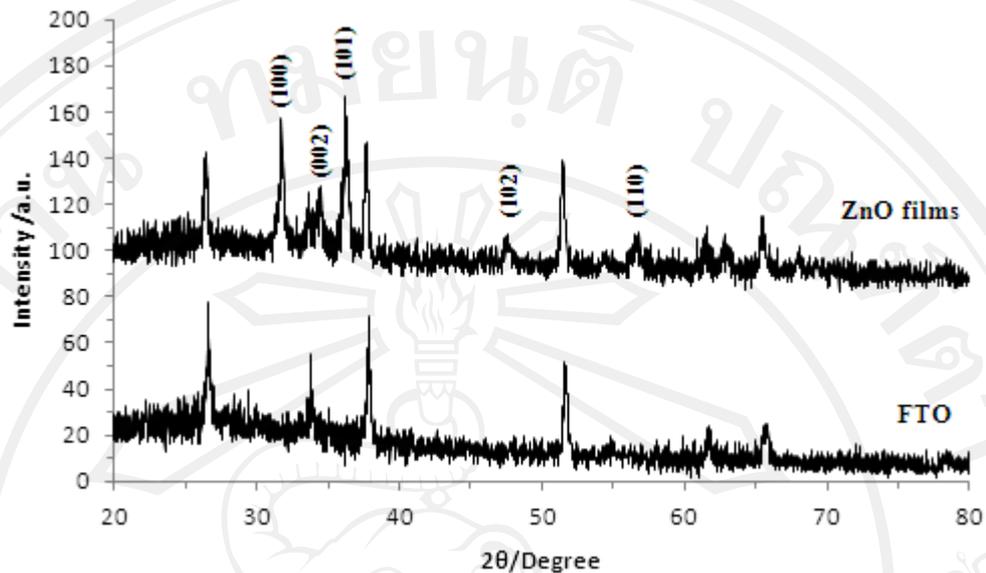
ตารางที่ 3.4 แสดงความหนาของฟิล์ม ZnO ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการเคลือบ
ฟิล์ม โดยการเคลือบฟิล์มที่การเคลือบฟิล์ม 5 รอบ มีความหนาน้อยกว่า 4 รอบ เนื่องจาก
ฟิล์มแน่นเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์ม ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นริ้วคลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้มี
ความแตกต่างของความหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์ม ZnO ที่ผ่านการ
เคลือบฟิล์มจำนวน 5 ชั้น ที่มีลักษณะเป็นริ้วและเริ่มมีรอยแตกของฟิล์ม



รูปที่ 3.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมวิธี sol-gel ที่การเคลือบฟิล์ม 5 รอบ

3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer

รูปที่ 3.18 แสดง XRD patterns และ diffraction peak ของฟิล์ม ZnO ที่เคลือบบนกระจก FTO เหนืออุณหภูมิ 450 °C เวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับ XRD patterns และ diffraction peak ของ FTO เมื่อนำ XRD patterns และ diffraction peak ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Joint Committee Powder Diffraction Standard (JCPDS card number 36-1451) จะพบเฟสหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.500 (100), 34.480(002), 36.250(101), 47.650(102) และ 57.685(110) แสดงถึงฟิล์ม ZnO ที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกสูง และมีการวางตัวแบบ randomly oriented โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ wurtzite hexagonal phase ซึ่ง Salee et al. (2012) ได้กล่าวถึง การวางตัวของ ZnO ที่เป็นแบบ randomly oriented ว่าเกิดจากการเคลือบฟิล์มหลายชั้น โดยหลังจากการเคลือบฟิล์มชั้นแรกและให้ความร้อนแก่ฟิล์มเพื่อกำจัดสายละลายออกไป ระหว่างขบวนการนี้ nuclei จะค่อยๆถูกสร้างขึ้นเป็น crystals เมื่อเคลือบฟิล์มชั้นที่สอง และให้ความร้อนแก่ฟิล์มอีกครั้งผลึกใหม่ของ ZnO ก็จะค่อยๆวางตัวเป็นฟิล์มในทิศทางอื่นโดยมีฟิล์มชั้นที่ 1 เป็นแม่แบบ ดังนั้นจึงพบ diffraction peak ที่เด่นชัดที่ระนาบ (100) (002) และ (101) จากกราฟ XRD patterns สามารถนำมาคำนวณหาขนาด grain size เผลี่ยโดยสมการ Scherrer's equation ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26 nm



รูปที่ 3.18 XRD spectra ของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

๓.๓.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO โดยกระบวนการ sol-gel ที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.7M ของ zinc acetate

จุ่มฟิล์ม ZnO ที่เตรียมจากความเข้มข้นสารละลาย 0.7M ของ zinc acetate ที่ความหนาต่างๆในสีย้อม N719 ความเข้มข้น 0.3 mM เป็นเวลา 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยผสมสารอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้น 0.3 M ของ LiI กับ 0.03 M ของ I₂ ในอะซิโตนไนด์ทรี และ แพลตตินัมเป็นขั้วบวก พบว่า ฟิล์ม ZnO ที่จำนวนรอบในการเคลือบฟิล์ม 3 รอบ ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง N719 เป็นเวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อ $V_{oc} = 0.534$ V, $J_{sc} = 10.29$ mA/cm² และ FF = 38.58% โดยให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 2.14% ดังแสดงในตารางที่ 3.5

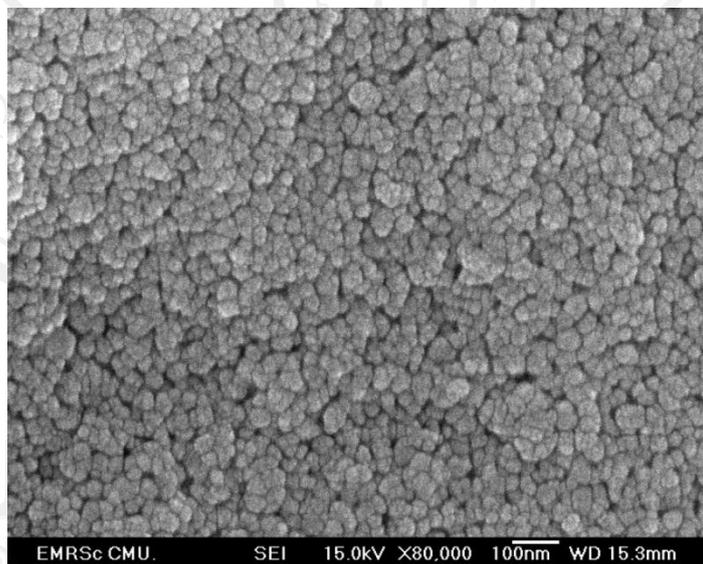
และเมื่อนำเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มและระยะเวลาในการจุ่มฟิล์ม ZnO ที่ดีที่สุดไปปรับปรุงต่อโดยการสปาร์กลดสังกะสีในสารละลาย ZnO พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง โดยมีค่าสูงสุดแค่ 1.64% ที่ความหนาของฟิล์ม 3 ชั้นและระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง N719 เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ ๓.๕ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO ที่ความหนาและเวลาในการจุ่มในสีย้อม N719 ต่างๆ

จำนวนรอบ	ระยะเวลา แช่สีย้อม	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	%FF	η (%)
1	10 min	0.544	4.29	43.06	1.00
	20 min	0.514	5.82	48.14	1.44
	30 min	0.574	4.88	43.39	1.22
	1h	0.544	4.73	45.18	1.16
	24h	0.544	3.33	35.69	0.65
2	10 min	0.454	4.87	44.57	0.99
	20 min	0.514	6.82	44.17	1.55
	30 min	0.494	7.02	42.49	1.47
	1h	0.514	6.48	41.96	1.40
	24h	0.464	3.69	38.43	0.66
3	10 min	0.476	8.96	47.63	1.82
	20 min	0.534	8.99	45.30	2.18
	30 min	0.534	10.29	38.85	2.14
	1h	0.554	8.16	42.47	1.92
	24h	0.464	3.44	35.15	0.56

ตารางที่ ๓.๕ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO ที่ความหนาและเวลาในการจุ่มในสีย้อม N719 ต่างๆ (ต่อ)

จำนวนชั้น	ระยะเวลา แช่สีย้อม	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	%FF	η (%)
4	10 min	0.502	6.34	39.27	1.25
	20 min	0.494	8.29	41.29	1.69
	30 min	0.524	8.60	39.88	1.80
	1h	0.504	10.14	38.79	1.98
	24h	0.393	2.92	30.15	0.30
5	10 min	0.444	5.10	41.06	0.93
	20 min	0.473	7.47	39.49	1.40
	30 min	0.494	9.08	39.86	1.79
	1h	0.504	9.09	39.80	1.82
	24h	0.474	8.18	37.74	1.46



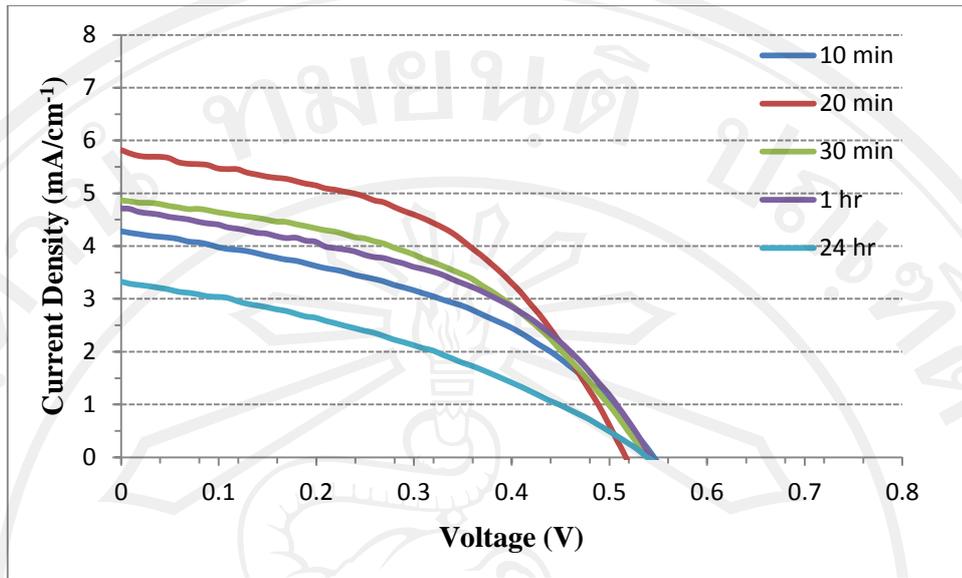
รูปที่ 3.19 ลักษณะอนุภาคของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยการสปาร์กพลาสมาสังกะสีในสารละลาย ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel

ตารางที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า η (%) ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ZnO ที่ความหนาและเวลาในการจุ่มในสีย้อม N719 ต่างๆ

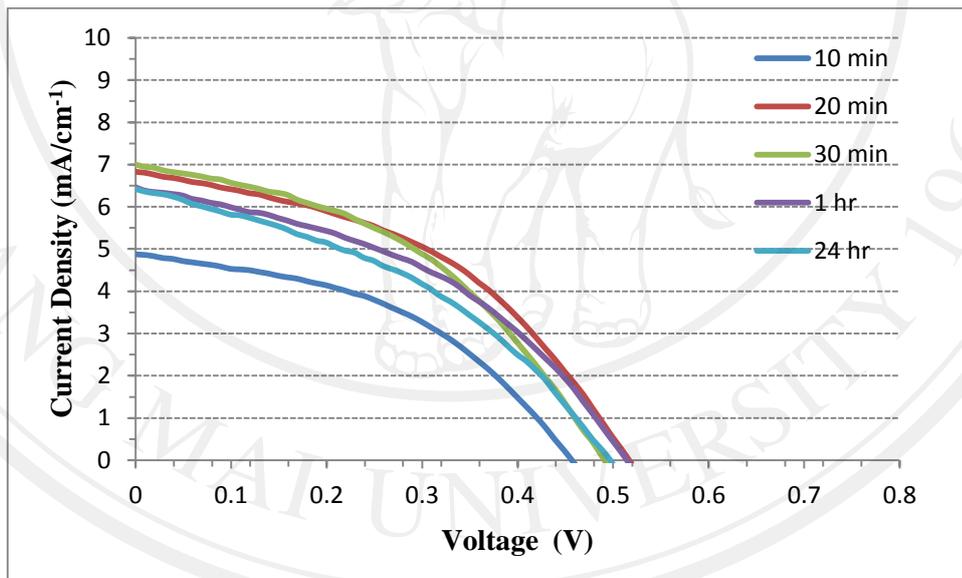
จำนวนรอบ	เวลาในการสปาร์ก (นาที)	ระยะเวลาแช่สีย้อม	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	%FF	η (%)
3	10	30 min	0.494	8.35	38.73	1.60
		1h	0.503	7.02	35.90	1.27
	20	30 min	0.504	7.70	40.02	1.55
		1h	0.514	6.43	36.66	1.21
	30	30 min	0.504	7.35	44.16	1.64
		1h	0.484	8.01	41.48	1.61
4	10	30 min	0.484	8.44	37.06	1.51
		1h	0.474	8.21	40.32	1.57
	20	30 min	0.494	6.85	43.66	1.48
		1h	0.454	7.47	44.54	1.51
	30	30 min	0.474	7.36	38.65	1.35
		1h	0.474	7.75	39.30	1.44

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะอนุภาคของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยวิธี sol-gel กับลักษณะอนุภาคของฟิล์ม ZnO จากการเตรียมโดยการสปาร์กลดสังกะสีในสารละลาย ZnO แล้วนำมาเคลือบบนกระจก พบว่า ความร้อนจากการสปาร์กลดสังกะสีในสารละลาย ZnO จะทำให้อนุภาค ZnO รวมตัวกัน ทำให้ฟิล์มแน่นขึ้น ความพรุนของฟิล์มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

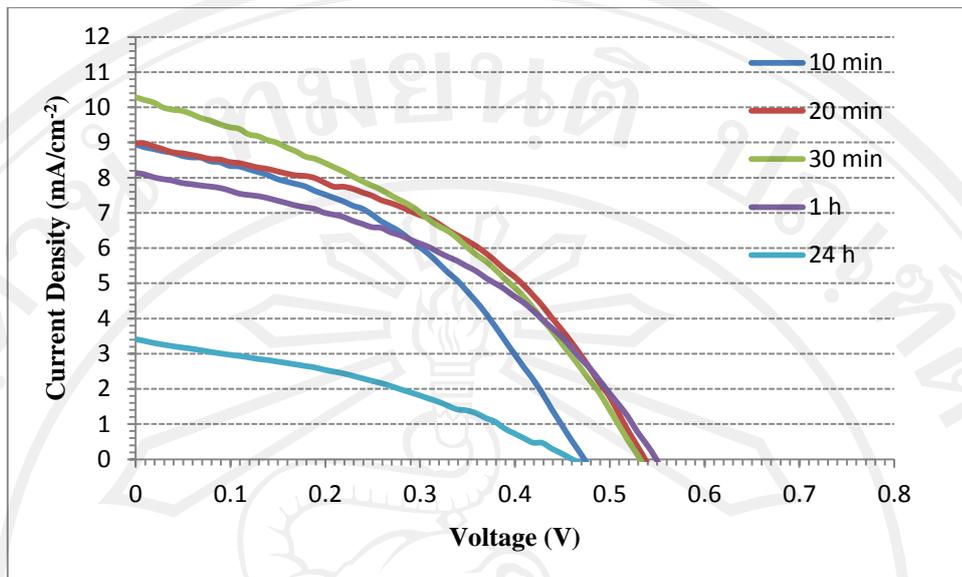
รูปที่ 3.20–3.24 แสดง J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ที่ความหนาต่างๆ ในกรณีที่เตรียมฟิล์ม ZnO โดยกระบวนการ sol-gel และการสปาร์กลดสังกะสีลงในสารละลาย ZnO



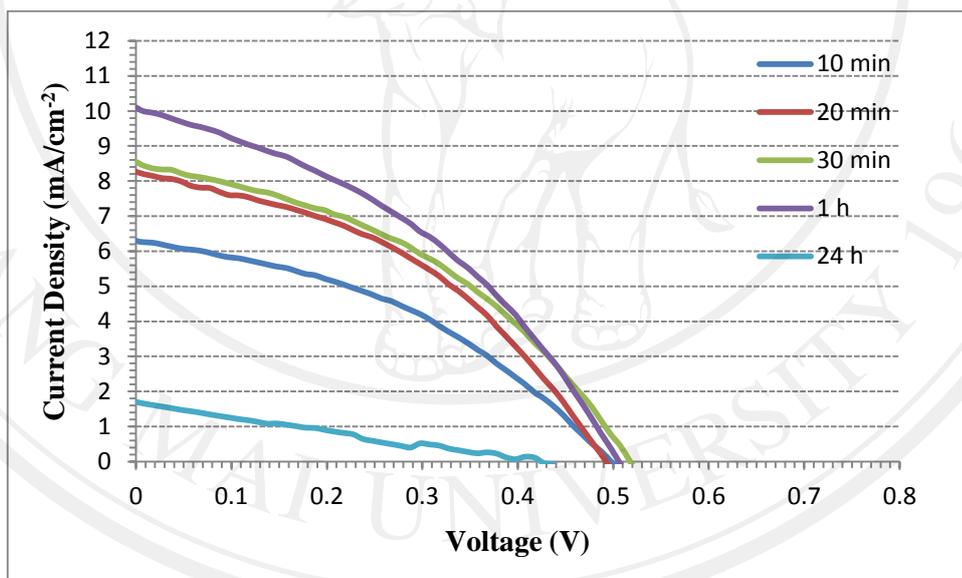
รูปที่ 3.20 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO
เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 1 ชั้น



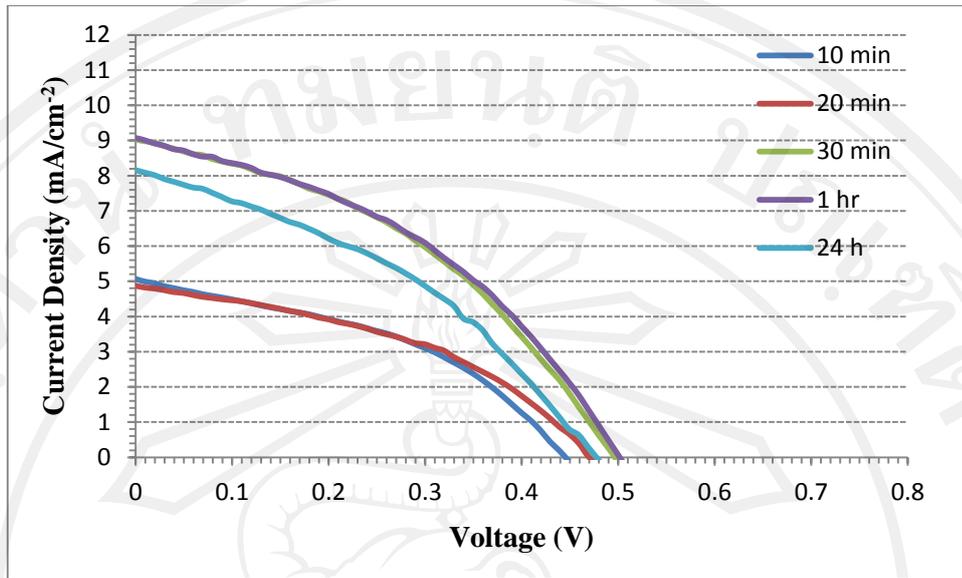
รูปที่ 3.21 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO
เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 2 ชั้น



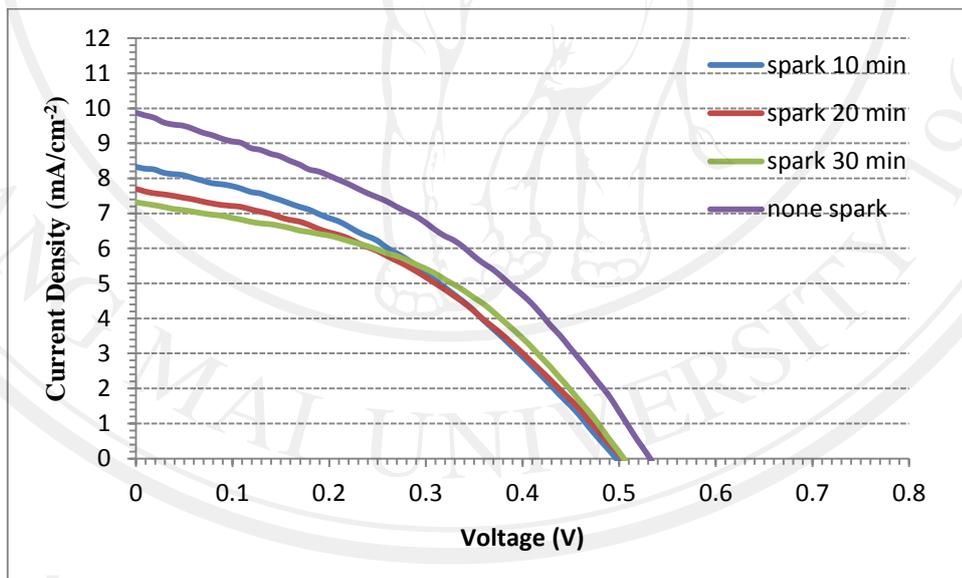
รูปที่ 3.22 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO
เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 3 ชั้น



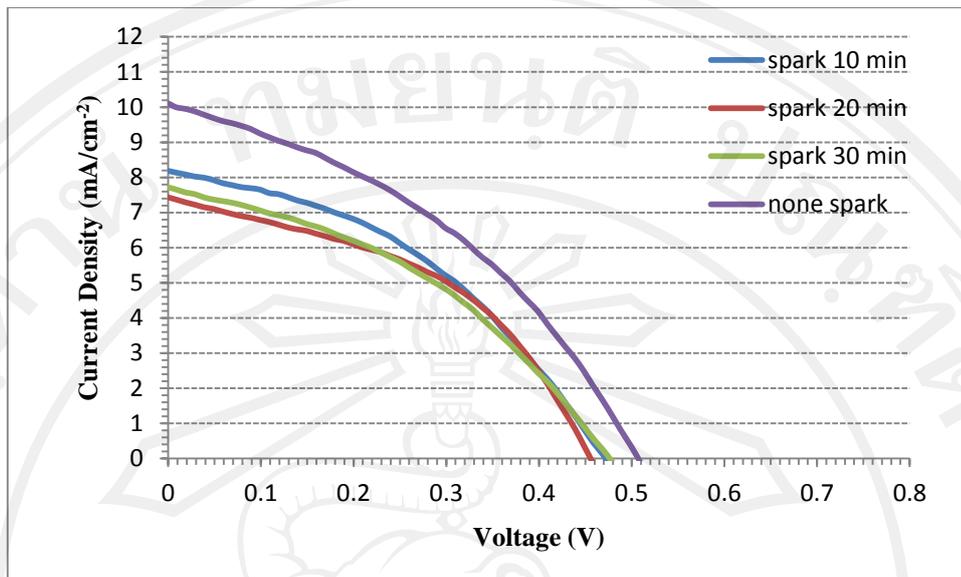
รูปที่ 3.23 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO
เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ZnO ความหนา 4 ชั้น



รูปที่ 3.24 J-V curve เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เตรียมโดยกระบวนการ sol-gel ความหนา 5 ชั้น



รูปที่ 3.25 J-V curve ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กสวดดั่งกะสีลงในสารละลาย ความหนา 3 ชั้น ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง 30 นาที

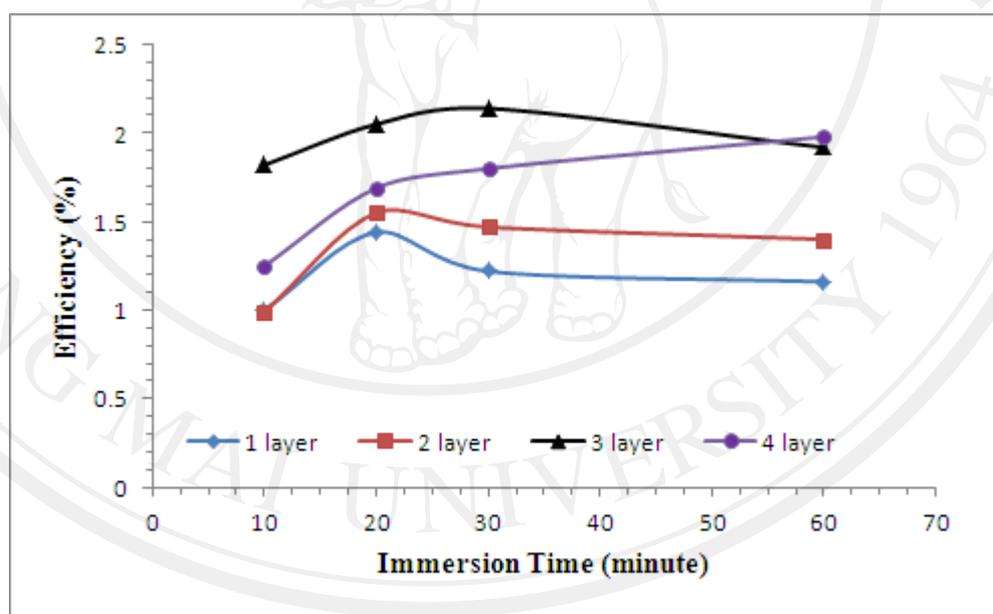


รูปที่ 3.26 J-V curve ของฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กลดสิ่งเกาะในสารละลาย ความหนา 4 ชั้น ระยะเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง 1 ชั่วโมง

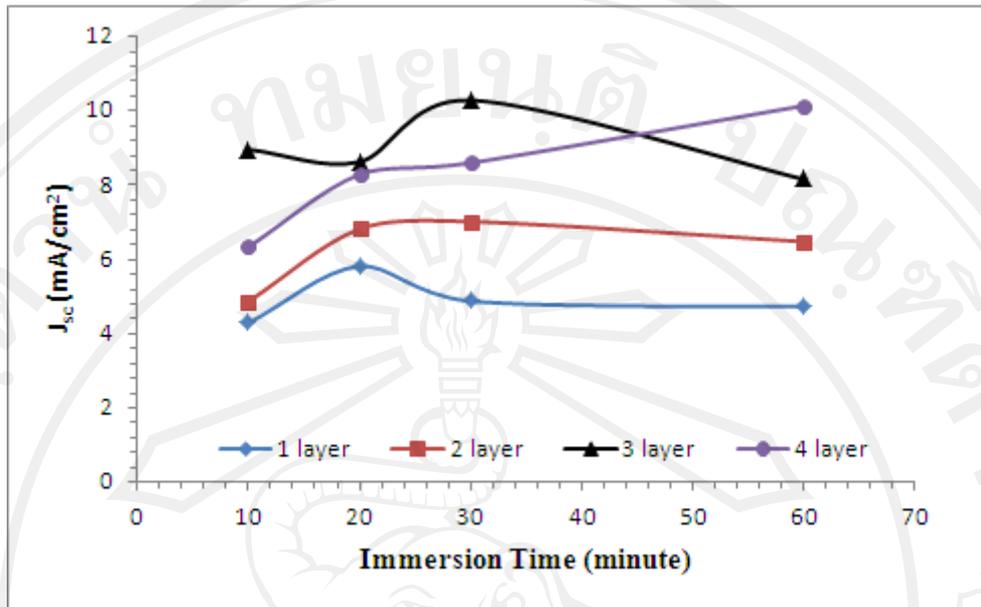
รูปที่ 3.27 แสดงแนวโน้มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนความหนาฟิล์ม ZnO และระยะเวลาในการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง N719 เวลา 10, 20, 30, 60 นาที และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ที่จำนวนรอบการเคลือบฟิล์ม 1-2 รอบ ความหนาฟิล์ม ~2.4-4.7 μm ประสิทธิภาพสูงสุดที่เวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสงเท่ากับ 20 นาที ,จำนวนรอบการเคลือบฟิล์ม 3 รอบ ความหนา ~5.6-6.2 μm ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสงเท่ากับ 30 นาที และที่ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น ~9.6-16.5 μm ตามจำนวนรอบการเคลือบฟิล์ม 4 รอบ พบว่า ประสิทธิภาพจะมีค่าสูงที่สุดที่เวลาการจุ่มสีย้อมไวแสง 1 ชั่วโมง หากยังเพิ่มเวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสงมากขึ้นประสิทธิภาพจะลดลง เนื่องจากการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง N719 จะส่งผลให้คุณภาพของฟิล์ม ZnO มีค่าลดลงตามระยะเวลาการจุ่มสีย้อมไวแสงที่มากขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาค ZnO ที่หน้าผิวของฟิล์มกลายเป็น complete layer โดยสาเหตุของการสลายตัวของอะตอมของ ZnO ที่ผิวนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของฟิล์มกับตัวทำละลายของสีย้อมไวแสง และ acidic carboxylic groups ของสีย้อมไวแสง N719 นอกจากนี้เมื่อจุ่มฟิล์ม ZnO จนอิ่มตัวไปด้วยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงแล้ว หากยังคงจุ่ม ZnO ในสีย้อมไวแสงอย่างต่อเนื่องโมเลกุลของสีย้อมอื่นๆ จะเกาะไป

บนชั้นของสีย้อมด้วยแรง Van der Waals เกิดการซ้อนทับของชั้นโมเลกุล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า molecular stacking ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าส่วนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสีย้อม เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกกระตุ้นโดยแสงของสีย้อมไม่สามารถถ่ายโอนไปสู่ ZnO ได้และมีแนวโน้มเกิดการรวมตัวของประจุบวกและลบ (charge recombination) ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นเวลาในการจุ่ม ZnO ในสีย้อมไวแสง จะต้องคำนึงถึงความหนาของฟิล์มและระยะเวลาในการจุ่มที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มมีอิทธิพลต่อปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว และปรากฏการณ์การซ้อนทับของโมเลกุลสีย้อมส่งผลต่อ J_{sc} ดังแสดงในรูปที่ 3.28 สอดคล้องกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แนวโน้มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง N719

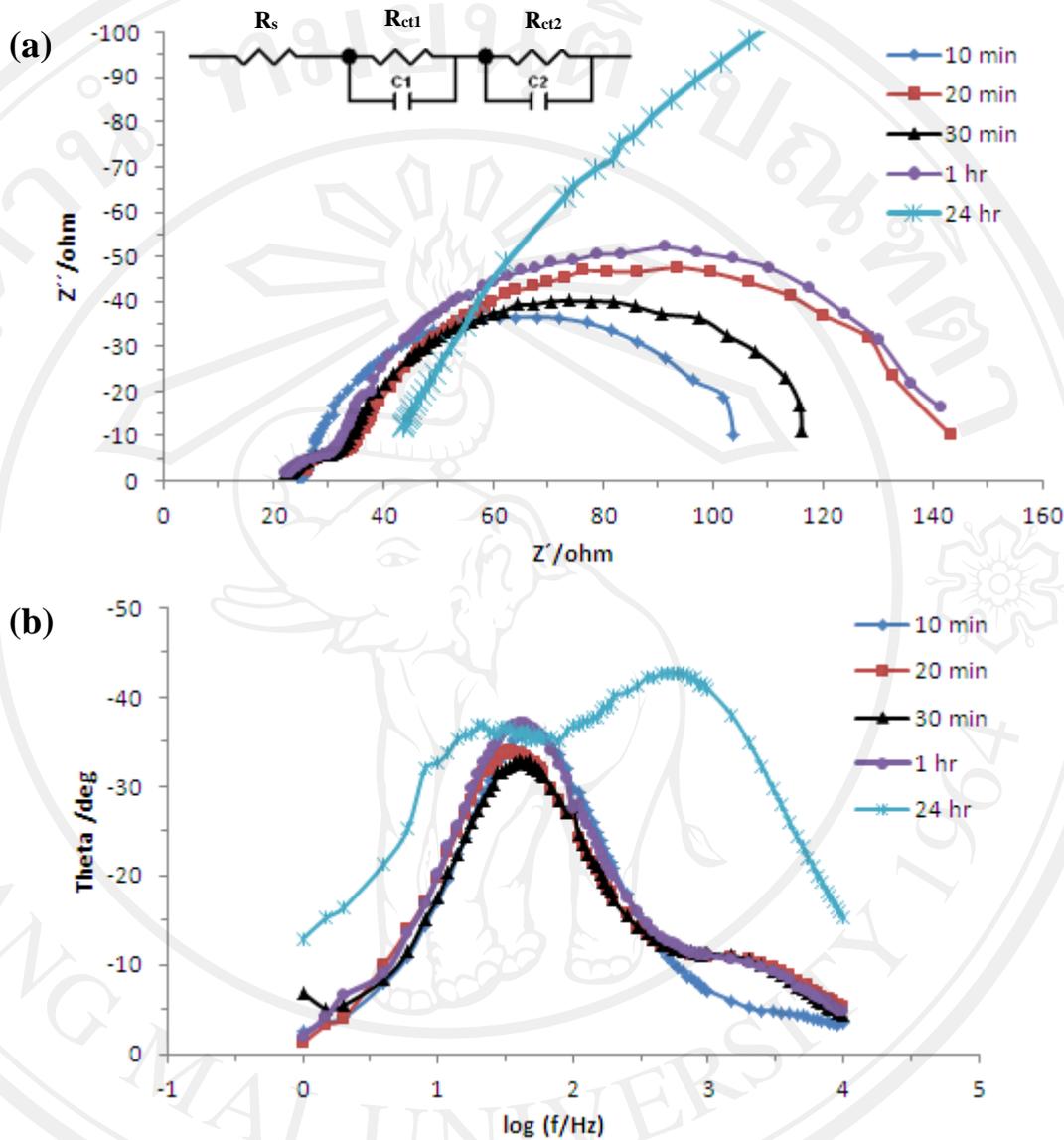


รูปที่ 3.28 แนวโน้ม J_{sc} เซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการจุ่ม फिल्म ZnO ในสีย้อมไวแสง N719

๓.๓.3 การวิเคราะห์ electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมของฟิล์ม ZnO โดนครบวง sol-gel

การวิเคราะห์ EIS ใช้สำหรับการศึกษา electron transport property and the light-to-electric conversion efficiency ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง รูปที่ 3.29 (a) แสดง The Nyquist plots และ equivalent circuit diagram และ (b) Bode plots of impedance spectra ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบฟิล์ม ZnO จำนวน 3 รอบ

ซึ่งในงานวิจัยนี้ตรวจพบครึ่งวงกลมแค่ 2 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.29(a) ซึ่งสัมพันธ์กับ R_{ct1} และ R_{ct2} โดย R_{ct1} คือ ความต้านทานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างแพลตตินั่มอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์, R_{ct2} คือ ความต้านทานของการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ/สีย้อมไวแสง/อิเล็กโทรไลต์ การวิเคราะห์หา R_{ct1} และ R_{ct2} วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Z-view



รูปที่ 3.29 EIS spectra ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (a) Nyquist plots and (b) Bode phase plots at V_{oc} under one-sun illumination

ตารางที่ 3.7 แสดงความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 3 รอบ

เวลาในการจุ่มสีย้อม	R_s (Ω)	R_{ct1} (Ω)	R_{ct2} (Ω)	τ (ms)
10 min	24.16	4.07	86.69	10.42
20 min	24.93	11.08	97.99	14.71
30 min	23.4	10.17	82.45	10.42
1 h	23.05	9.54	105.10	12.50
24 h	-	2,144.00	811.10	10.00

ตารางที่ 3.7 แสดงความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO เคลือบฟิล์ม 3 รอบที่เวลาในการจุ่มในสีย้อมไวแสงต่างๆ เมื่อพิจารณาความต้านทาน R_s พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาความต้านทาน R_{ct1} พบว่า การจุ่มชิ้นงานในสีย้อม เท่ากับ 10 นาที มีความต้านทานต่ำที่สุดเท่ากับ 4.07 Ω แสดงว่า การถ่ายโอนประจุบริเวณแพลตตินั่มอิเล็กโทรด และ/หรือ electrical contact ระหว่างอนุภาค ZnO เป็นไปได้ดีที่สุด ไม่มีการออกของประจุที่ขั้วทำให้เกิดความต้านทาน รองลงมาได้แก่เวลาในการจุ่มเท่ากับ 1 ชั่วโมง, 30 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ และการจุ่มชิ้นงานในสีย้อม 30 นาที R_{ct2} ต่ำที่สุดเท่ากับ 82.45 Ω แสดงถึง อิเล็กตรอนของสีย้อมที่ถูกกระตุ้นทางแสงสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปยัง ZnO electrode ได้ดี ขณะเดียวกันก็มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนจาก อิเล็กโทรไลต์คืนสู่สีย้อมได้ดีที่สุดเช่นกัน หรือแสดงว่าอัตราการเกิดการรวมตัวของประจุกับการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างผู้ให้และผู้รับมีค่าต่ำนั่นเอง

electron lifetime ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงสามารถคำนวณได้จากสมการ $\tau = 1/2f_{max}$ เมื่อ f_{max} คือ the maximum frequency of the low-frequency peak ดังแสดงในรูปที่ 3.29(b) โดยปกติ electron lifetime ควรจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม ZnO ถ้าในกรณีที่ความหนาของฟิล์มน้อยระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในฟิล์ม ZnO จะสั้น อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโทรดในเวลาอันรวดเร็วจึงเป็นการยากที่จะตรวจสอบการเกิดการรวมตัวของประจุจาก electron lifetime ได้ ดังนั้นการจะพิจารณาการรวมตัวของประจุจาก electron lifetime ควรที่จะทำเมื่อความหนาของฟิล์ม 10–15 μm เนื่องจากความหนาของฟิล์ม

ZnO ในงานวิจัยนี้มีค่า $\sim 5.6-6.2 \mu\text{m}$ ดังนั้นการพิจารณาการรวมตัวของประจุภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้ จึงต้องพิจารณาคงค่าไปกับค่า R_{ct} จากตารางที่ 3.9 ถ้าจุ่ม ZnO films ในสีย้อมไวแสงนาน 20 นาที จะมี electron lifetime มากที่สุดเท่ากับ 14.71 วินาที แต่ค่า R_{ct} เท่ากับ 86.69 Ω ในขณะที่จุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสง 30 นาที จะมี electron lifetime เท่ากับ 10.42 วินาที แต่ R_{ct} เท่ากับ 82.45 Ω กลับมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแสดงว่า ที่เวลาในการจุ่มสีย้อมไวแสง 30 นาที อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นทางแสงจากโมเลกุลของสีย้อมไวแสง สามารถเคลื่อนที่ไปสู่ ZnO photoelectrode ต่อไปยัง FTO จากนั้นเคลื่อนที่สู่ขั้วแพลตตินัมเพื่อส่งต่อประจุแก่อิเล็กโทรไลต์และคืนอิเล็กตรอนสู่สีย้อมไวแสงอีกครั้งได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีที่สุด

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการวิจัย พบว่า การเซลล์แสงอาทิตย์สียอมไวแสงโดยใช้ฟิล์ม ZnO ที่เตรียมจากกระบวนการสปาร์กและเผาในเตาอบที่ความดันอากาศ อุณหภูมิ 350–550 °C เพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง เนื่องจากฟิล์ม ZnO มีการหลุดลอกระหว่างกระบวนการประกอบเซลล์ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.053% เมื่อสปาร์กสวดสังกระสีบนกระจก FTO เวลา 6 ชั่วโมง ความหนาฟิล์ม ~9 μm เผาที่อุณหภูมิ 450 °C

และเมื่อนำฟิล์ม ZnO ที่เตรียมสารละลายโดยกระบวนการ sol-gel และเคลือบฟิล์มบนกระจก FTO โดยวิธี doctor blade เพื่อศึกษาผลของความหนาของฟิล์มต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า พบว่า ความหนาของฟิล์มมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยความหนาและเวลาในการจุ่มสียอมไวแสงที่เหมาะสมจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสียอมไวแสงที่เวลาต่างๆ พบว่า ระยะเวลาในการจุ่มสียอมไวแสงผลต่อปริมาณของ dye loading และประสิทธิภาพของเซลล์ โดยฟิล์มการเคลือบฟิล์ม ZnO จำนวน 3 รอบความหนา ~5.6–6.2 μm จุ่มในสียอมไวแสง N719 นาน 30 นาทีจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่ากับ 2.14% ถ้าระยะเวลาในการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสียอมไวแสงน้อยหรือมากเกินไปประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจาก ผลของ dye loading และ เสถียรภาพของฟิล์ม ZnO ถ้าระยะเวลาในการจุ่มสียอมไวแสงน้อยเกินไปจะทำให้ฟิล์ม ZnO ยังไม่อึดตัวไปด้วยโมเลกุลของสียอมไวแสง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่จะส่งผ่านไปยัง ZnO electrode มีปริมาณน้อย แต่ถ้าเวลาในการจุ่มสียอมไวแสงมากเกินไปก็จะส่งผลให้ปริมาณโมเลกุลของสียอมในฟิล์ม ZnO มากเกินไปด้วย ทำให้เกิดการซ้อนทับของโมเลกุลสียอมไวแสงทำให้มีแนวโน้มทำให้เกิดการรวมตัวของประจุขึ้น ขณะเดียวกันการจุ่มฟิล์ม ZnO ในสารละลายสียอมไวแสงจะส่งผลให้คุณภาพของฟิล์ม ZnO มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการจุ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาค ZnO ที่หน้าผิวของฟิล์มกลายเป็น complete layer โดยสาเหตุของการสลายตัวของอะตอมของ ZnO ที่ผิวนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของฟิล์มกับตัวทำละลายของสียอมไวแสงและ acidic carboxylic groups ของสียอม N719 และเมื่อวิเคราะห์ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงด้วยเครื่อง EIS พบว่า R_{ct2} ต่ำ แสดงถึงอิเล็กตรอนของสียอมที่ถูกกระตุ้นทางแสงสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปยัง ZnO electrode ได้ดีทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรมีค่ามากขึ้น

ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุดจึงต้องพิจารณาความหนาของฟิล์มเพื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับไวแสงซึ่งมีผลต่อการเกิดอิเล็กตรอนอิสระที่จะเคลื่อนที่จากโมเลกุลของสีย้อมไวแสงไปยัง ZnO electrode การจุ่มฟิล์ม ZnO ในสีย้อมไวแสงที่เหมาะสมกับความหนาของฟิล์ม และคำนึงถึงการเสื่อมสภาพของอนุภาค ZnO เนื่องจากการจุ่มฟิล์มในสีย้อมไวแสงด้วยเช่นกัน

ความเห็นและข้อเสนอแนะ

- 1) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลต่อลักษณะของฟิล์ม ZnO ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำระหว่างการเตรียมสารละลายและการเตรียมฟิล์ม ฟิล์มที่เตรียมได้จะแน่นมีความพรุนน้อยทำให้การดูดซับโมเลกุลสีย้อมแสงไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำ ดังนั้นควรจะมีการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในขณะที่ทำการเตรียมสารละลายและการเตรียมฟิล์มด้วย
- 2) สารอิเล็กโทรไลต์ในงานวิจัยนี้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์พื้นฐานที่มีลักษณะเป็นของเหลวมีความหนืดน้อย ผสมจาก LiI กับ I_2 ในอะซิโตนไทดัทท์เท่านั้น ทำให้เกิดการระเหยได้ง่ายส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสั้นและประสิทธิภาพต่ำ หากต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์ให้ดีขึ้นควรมีเติมสารที่ทำให้ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้น เช่น จากงานวิจัยของ Jae-Yup Kim และคณะ ได้เติมสาร 4-tert-Butylpyridine ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือ เปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวเป็นโพลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์แทน เช่น งานวิจัยของ M.A.K.L. Dissanayake และคณะ ฯลฯ
- 3) การเตรียมฟิล์ม ZnO จากกระบวนการสปาร์กและเผาในเตาอบภายใต้ความดันอากาศ ฟิล์มจะมีความพรุนสูงแต่การยึดเกาะและการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของ ZnO น้อยทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกระหว่างการประกอบเซลล์ ดังนั้นควรปรับปรุงฟิล์ม ZnO ให้มีการยึดเกาะและเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจากการเผาในเตาอบมาใช้เลเซอร์ในการเผาฟิล์มแทน ข้อดีของการใช้เลเซอร์คือใช้เวลาในการเผาฟิล์มน้อยกว่าการเผาในเตา
- 4) การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขั้นตอนต่อไป อาจทำได้โดยการเตรียมฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กและ sol-gel รวมกัน โดยฟิล์มชั้นที่ 1 เตรียมโดยการสปาร์ก และชั้นต่อไปเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มที่ผสมสารละลาย ZnO โดยกระบวนการ sol-gel ทับบนฟิล์ม ZnO จากการสปาร์กอีกครั้ง

บรรณานุกรม

- [1] ระบบออนไลน์ ที่มา: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencys.png , 6 พฤศจิกายน 2557
- [2] อธิป เพ็งพัด, “โฟโตอิเล็กโทรด ZnO/Mg_xZn_{1-x}O สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง”, การค้นคว้าอิสระวิทยาศาสตรบัณฑิต วท.บ. พิสิษฐ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [3] A. B. Kashyout, M. Soliman, M. E. Gamal and M. Fathy, Preparation and characterization of nanoparticles ZnO films for dye-sensitized solar cells, Mater. Chem. Phys. 90 (2005), p. 230.
- [4] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide and L. Han, Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%, Japanese Journal Applied Physics 45(2006), p. L638–L640.
- [5] T. P. Chou, Q.F. Zhang, G. E. Fryxell, and G.Z. Cao, Hierarchically Structured ZnO Film for Dye-Sensitized Solar Cells with Enhanced Energy Conversion Efficiency, Adv. Mater. 19(2007), p. 2588–2592.
- [6] M. McCune, W. Zhang, and Y. Deng, High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells Based on Three-Dimensional Multilayered ZnO Nanowire Arrays with “Caterpillarlike” Structure, Nano lett. 12(2012) 3656-3662.
- [7] K. Keis, E. Magnusson, H. Lindström, S.E. Lindquist, and A. Hagfeldt, A 5% efficient photoelectrochemical solar cell based on nanostructured ZnO electrodes, Sol. Energ. Mat. Sol. 73(2002), p. 51-58.
- [8] H. Rensmo, K. Keis, H. Lindström, S. Solbergren, A. Solbrand, A. Hagfeldt, and S.-E. Lindquist, High Light-to-Energy Conversion Efficiencies for Solar Cells Based on Nanostructured ZnO Electrodes, J. Phys. Chem. B 101(1997), p. 2598-2601.
- [9] K. Park, J. Xi, Q.F. Zhang, and G.Z. Cao, Charge Transport Properties of ZnO Nanorod Aggregate Photoelectrodes for DSCs, J. Phys. Chem. C 115(2011), 20992–20999.
- [10] K. Park, Q.F. Zhang, B. B. Garcia, X. Zhou, Y.-H. Jeong, and G.Z. Cao, Effect of an Ultrathin TiO₂ Layer Coated on Submicrometer-Sized ZnO Nanocrystallite Aggregates by Atomic Layer Deposition on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells, Adv. Mater. 22(2010), 2329–2332
- [11] E. Hosono, Y. Mitsui, and H. Zhou, Metal-free organic dye sensitized solar cell based on perpendicular zinc oxide nanosheet thick films with high conversion efficiency, Dalton Trans. 40(2008), 5439-5441.
- [12] D. Gültekin, M. Alaf, and H. Akbulut , Nanostructured ZnO photoelectrode synthesis for dye sensitized solar cells, ACTA Physicica Polonica A, 125(2014), 301-303.

[13] X. Tang, Y. Wang. and G.Z. Cao, Effect of the added concentration of dye on charge recombination in dye sensitized solar cells, *J. Electroanalytical Chemistry*, 694(2013), 6-11.

[14] ระบบออนไลน์ ที่มา: <http://www.gamry.com/application-notes/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/> , 5 กุมภาพันธ์ 2558

[15] J. Hu, L. Zhao, Y. Yang, H. Liao, S. Wang, X. Sun, J. Cheng, and B. Dong, TiO₂ Nanotube Arrays Composite Film as Photoanode for High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell, *International Journal of Photoenergy*, 2014, 1-8.

[16] Y. -Z. Zheng , H. Ding , Y. Liu , X. Tao, G.Z. Cao and J. -F. Chen, In situ hydrothermal growth of hierarchical ZnO nanourchin for high-efficiency dye-sensitized solar cells, *Journal of Power Sources*, 254 (2014), 153-160.

[17] L. Da, S. F. Liu, L. P. You, J. C. Zhang and G. G. Qin, Effects of In surfactant on the crystalline and photoluminescence properties of GaN nanowires, *J. Phys.: Condens. Matter* 17, 43 (2005), 445-449.

[18] J-Y. Kim, J. Y. Kim, D.-K. Lee, B. Kim, H. Kim, and M. J. Ko, Importance of 4-tert-Butylpyridine in Electrolyte for Dye-Sensitized Solar Cells Employing SnO₂ Electrode, *J. Phys. Chem. C*, 116 (2012), 22759–22766.

[19] M.A.K.L. Dissanayake, C.A. Thotawatthage, G.K.R. Senadeera, T.M.W.J. Bandara, W.J.M.J.S.R. Jayasundera, B.-E. Mellander, Efficiency enhancement by mixed cation effect in dye-sensitized solar cells with PAN based gel polymer electrolyte, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 246 (2012), 29– 35.

ภาคผนวก

1. รายงานแสดงกิจกรรมที่ดำเนินการแล้วเปรียบเทียบกับกิจกรรมที่วางแผนว่าจะดำเนินการ

วัตถุประสงค์	แผนงานวิจัย	กิจกรรมที่ดำเนินการจริง
1. เพื่อสังเคราะห์ฟิล์ม ซิงค์ออกไซด์(Zinc Oxide, ZnO)ด้วยกระบวนการสปาร์ก	<p>1.1 เตรียมฟิล์ม ZnO โดยวิธี สปาร์ก ที่ความหนาต่างๆ</p> <p>1.2 วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์ม ZnO</p>	<p>1.1 เตรียมฟิล์ม ZnO โดยวิธีสปาร์กที่ความหนาต่างๆโดยเปลี่ยนระยะเวลาในการสปาร์ก และเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 350-550 °C</p> <p>1.2 เตรียมฟิล์ม ZnO โดยกระบวนการ sol-gel ความหนาต่างๆ โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการเคลือบฟิล์ม 1-5 รอบและเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 450 °C</p> <p>1.3 เตรียมฟิล์ม ZnO โดยสปาร์กสอดสังกะสีบนฟิล์ม ZnO ที่เคลือบบนกระจกจาก FTO แล้วจากการเตรียมโดยกระบวนการ sol-gel</p> <p>1.4 เตรียมฟิล์ม ZnO โดยสปาร์กสอดสังกะสีในสารละลาย ZnO ที่เตรียมไว้จากกระบวนการ sol-gel</p> <p>1.5 วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้</p> <ul style="list-style-type: none"> - วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) - วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer - วิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่อง RAMAN spectroscopy - วิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

<p>2. เพื่อนำฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม</p>	<p>2.1 สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมต้นแบบโดยใช้ฟิล์ม ZnO</p> <p>2.2 วัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์</p> <p>2.3 เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์</p>	<p>2.1 สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมต้นแบบโดยใช้ฟิล์ม ZnO เป็น photoelectrode ที่เตรียมไว้ในข้อที่ 1.1 และ 1.3 ไปจุ่มในสารละลายสีย้อมไวแสง Eosin Y ความเข้มข้น 0.58mM เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคของฟิล์มดูดซับอนุภาคของสีย้อมไว้ จากนั้นจึงหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยผสม ลงบนชิ้นงาน และนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ</p> <p>2.2 ปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นี้โดยเลือกเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม ZnO ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดจากข้อ 2.1 มาศึกษาต่อโดยทำการปรับเปลี่ยน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ความหนาของฟิล์ม - สีย้อมไวแสงเป็น N719 ความเข้มข้น 0.3mM - ระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงานในสีย้อมไวแสงเป็น ๑๐ นาที, ๒๐ นาที, ๓๐ นาที, ๖๐ นาที และ ๒๔ ชั่วโมงตามลำดับ <p>2.3 เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์</p>
--	--	--

2. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 2.1 ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของฟิล์ม ZnO
- 2.2 ผลงานในงานวิจัยนี้ นักวิจัยสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้

3. ปัญหาและอุปสรรค

3.1 เนื่องจากการเตรียมฟิล์ม ZnO ในการทำวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการสปาร์กเป็นเวลานานทำให้หัวสปาร์กและสารไฟเกิดความร้อนและไหม้บ่อยครั้ง และเมื่อนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากฟิล์มไม่ติดกับกระจกทำให้เกิดการหลุดลอกระหว่างกระบวนการประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 การเตรียมฟิล์มแพลทินัมค่อนข้างทำยากเนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้ไม่สม่ำเสมอทำให้สูญเสียกระจก FTO ไปเป็นจำนวนมากและสารที่ใช้เตรียมมีราคาแพง

3.3 การวิจัยนี้ไม่ได้ควบคุมสิ่งแวดล้อมขณะเตรียมฟิล์ม ซึ่งไอน้ำในอากาศมีผลอย่างมากต่อลักษณะของฟิล์ม ZnO ดังนั้นเมื่อฤดูกาลเปลี่ยนจึงมีผลให้ฟิล์ม ZnO มีความพรุนลดลง