

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	7
บทที่ 2 ทฤษฎี	8
2.1 โครงสร้างนาโน มิติ และผลกระทบทางควอนตัม	8
2.2 คุณสมบัติของสารซิงก์ออกไซด์	10
2.3 กระบวนการเกิดโครงสร้างนาโน	12
2.4 จลนศาสตร์การโตของซิงก์ออกไซด์ (growth mechanism of ZnO)	13
2.5 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	14
2.6 การศึกษาโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)	16
2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	21
2.8 รามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)	23
2.8.1 ทฤษฎีควอนตัมของรามานสเปกโตรสโกปี (Quantum Theory of Raman Effect)	24
2.8.2 โพลาริเซบิลิตีของโมเลกุล (Molecular Polarizability)	26
2.8.3 Second-order Raman effect	28
2.8.4 การใช้เทคนิค รามานสเปกโตรสโกปี ศึกษาสาร ZnO	29

	หน้า
2.9 โฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence Spectroscopy, PL Spectroscopy)	30
2.9.1 ชนิดของการเปล่งแสง	30
2.9.2 หลักการของโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Principles of Photoluminescence)	30
2.10 อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-visible spectroscopy, UV-vis spectroscopy)	33
2.11 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs)	39
2.11.1 ส่วนประกอบเซลล์ที่สำคัญ	39
2.11.2 หลักการทำงานของเซลล์	40
2.11.3 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์	41
2.12 เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS)	42
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	53
3.1 การออกแบบและประดิษฐ์เตาเผาชนิดท่อ	53
3.2 การทำความสะอาดและเคลือบฟิล์มซิงก์บนกระจกนำไฟฟ้า	57
3.3 การออกแบบระบบสำหรับการปลูกเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ศึกษาผลของการปลูกเส้นลวดซิงก์ออกไซด์ ที่เงื่อนไขความหนาของฟิล์มซิงก์และอัตราการไหลของอะซิโตนต่างๆ	62
3.4 การเตรียม counter electrode	65
3.5 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	67
4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาเผาชนิดท่อที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น	67
4.2 ผลการศึกษาเคลือบชั้นฟิล์มซิงก์บนกระจกนำไฟฟ้า	68
4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ZnO nanowires	69
4.3.1 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	69
4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)	75

	หน้า
4.3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)	76
4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ ZnO nanowires	79
4.4.1 การวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)	79
4.4.1 การวิเคราะห์ PL spectroscopy (Photoluminescence spectroscopy)	81
4.4.2 การวิเคราะห์อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทสโคปี (Ultraviolet-Visible Spectroscopy, UV-vis spectroscopy)	81
4.5 การศึกษาความสามารถการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ ZnO nanowires	86
4.6 การศึกษาลักษณะเซลล์เคมีไฟฟ้าของ ZnO nanowires	90
4.6.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า	90
4.6.2 การจำลองเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Z-View	90
บทที่ 5 สรุป วิเคราะห์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	98
5.1 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง	98
5.1.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาเผาชนิดท่อที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น	98
5.1.2 ผลการศึกษาเคลือบชั้นฟิล์มซิงก์บนกระจกนำไฟฟ้า	98
5.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ZnO nanowires	98
5.1.4 ผลการศึกษามสมบัติทางแสงของ ZnO nanowires	99
5.1.5 การศึกษาความสามารถการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ ZnO nanowires	100
5.1.6 การศึกษาลักษณะเซลล์เคมีไฟฟ้าของ ZnO nanowires	100
5.2 ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก	107
การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires	107
ภาคผนวก ข	109
เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้อง TEM	109
ภาคผนวก ค	114
เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD	114

ภาคผนวก ง

ผลงานทางวิชาการ

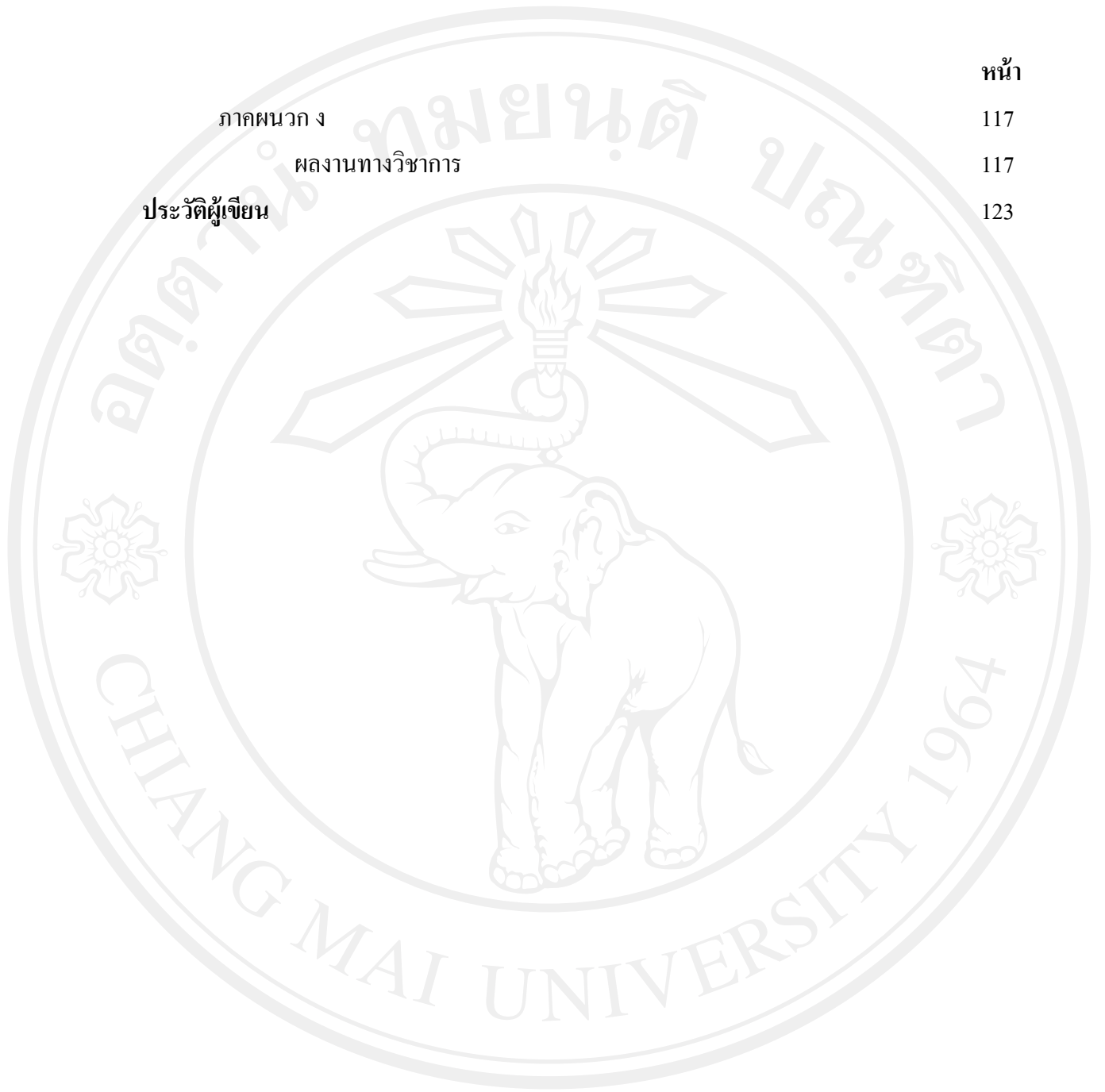
ประวัติผู้เขียน

หน้า

117

117

123



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติกายภาพบางประการของสารซิงก์ออกไซด์	11
2.2 แสดงอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดเฉี่ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุแบบพหุผลึกที่มีโครงสร้างทางจุลภาคแบบ face center cubic และ body center cubic	20
2.3 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า	45
4.3.1 เส้นใยที่ใช้ในการปลูก ZnO nanowires	69
4.3.2 แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires	74
4.3.3 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ ZnO powder และ ZnO nanowires	77
4.4.1 แสดงตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของสาร ZnO nanowires	80
4.4.2 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires	85
4.5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า J_{sc} , V_{oc} , FF และ efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์	88
4.6.1 แสดงผลค่าความต้านทาน (R) ความเก็บประจุ (C) ที่ได้จากโปรแกรม Z-View	95
4.6.2 ตารางสรุปผลการทดลอง	97
5.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาด ZnO nanowires กับงานวิจัยอื่นๆ	99
5.2 ค่า lattice parameter ที่วิเคราะห์ได้	99
5.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์กับนักวิจัยคนอื่นๆ	101
ข-1 ค่าคงที่ของกล้อง TEM	109
ข-2 แสดงค่าเวกเตอร์และค่า d-spacing ที่คำนวณได้	110
ข-3 แสดงตาราง JCPDS ของสารซิงก์ออกไซด์ (36-1451)	110
ข-4 แสดงระนาบที่เป็นไปได้ของแต่ละเวกเตอร์	111
ค-1 ค่ามุมมาตรฐาน ของ XRD ของผลึกซิงก์ออกไซด์	113
ค-2 ค่ามุมที่อ่านได้จากผล XRD ของชิ้นงานที่เงื่อนไขต่างๆ	114
ค-3 แสดงค่าความยาวแลตทิซที่ระนาบต่างๆ	115

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวโดยปริมาตรรวมยังมีค่าเท่าเดิม	2
1.2 โครงสร้างในระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตร (a) thin films (b) nanobelts (c) nanowires (d) nanoneedles (e) nanotubes (f) nanorods (g) nanocombs และ (h) nanonails	3
1.3 ปลุก ZnO nanowires โดยกระบวนการ CVD ของ C.-L.Xu และคณะ	5
1.4 ลักษณะของเส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว กับ ระยะเวลาในการปลูกของ S. Daothong และคณะ	5
1.5 ZnO nanowires ที่ปลูกบนกระจกที่มีชั้นของฟิล์มบางซิงก์ และสมบัติการส่องผ่านทางแสงของชิ้นงานของ X.H. Wang และคณะ	6
2.1 ลักษณะของสารและกราฟความหนาแน่นสถานะของสารที่เปลี่ยนแปลงตามมิติ	9
2.2 การเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคทองคำเมื่อมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร	10
2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคทองคำเมื่อมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร	10
2.4 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	11
2.5 โครงสร้างสารซิงก์ออกไซด์	12
2.6 แสดงการเกิดเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ตามสมมติฐาน VS mechanism	12
2.7 แสดงการเกิดเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ตามสมมติฐาน VLS mechanism	13
2.8 องค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.9 โพรบอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง	15
2.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบผลึกเดี่ยว (ซ่าย) และ วัสดุแบบพหุผลึก	16
2.11 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด (a) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) และ (b) ภาพขยาย (image)	17
2.12 (a) ภาพโปรตึฟิวด์ และ (b) ภาพคาร์คิฟิวด์ของ PbSe quantum wires ในคาร์บอนนาโนทิวป์แบบมัลติวอลล์ (MWNT)	18
2.13 การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน	19
2.14 การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบพหุผลึกและการวัดระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน ที่ปรากฏบนฟิล์มรับภาพ	20
2.15 แสดงการบันทึกข้อมูลของดิฟแฟรคโตมิเตอร์	21

รูป	หน้า
2.16 แสดงทิศทางการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม 3 ระนาบ ซึ่งให้ความเข้มไม่เป็นศูนย์เนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้างกัน	22
2.17 diffraction pattern ที่ได้จากเครื่อง XRD	23
2.18 เมื่อแสงตกกระทบกับ โมเลกุลแล้วเกิดการกระจัดกระจาย	24
2.19 แสดงปฏิกิริยาและเส้นสเปกตรัมที่ให้ Stokes, Rayleigh และ Anti-Stokes lines	25
2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Polarizability เมื่อ โมเลกุลเกิดการสั่น	27
2.21 แสดง first order ของการกระจัดกระจายแสงแบบรามาน	27
2.22 แสดง second-order ของการกระจัดกระจายแสงแบบรามาน	29
2.23 ระดับพลังงาน Jablonski เกี่ยวกับการดูดกลืนและการแผ่รังสี	32
2.24 แสดงเส้นทางเดินของแสง เมื่อวัดฟิล์มเบรียวและการสะท้อน	36
2.25 การหา R_{\min} และ R_{\max}	37
2.26 การหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ได้จากการลากเส้นสัมผัสตัดแกนพลังงาน $h\nu$	38
2.27 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	40
2.28 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	40
2.29 แสดงการหา J_{\max} , V_{\max} จากความสัมพันธ์ระหว่าง J และ V	41
2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า- ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี	43
2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot)	44
2.32 รูปแบบอิมพีแดนซ์แบบต่างๆที่เกิดขึ้นของระบบทางเคมีไฟฟ้า	48
2.33 วงจรสมมูลของเซลล์เคมีไฟฟ้าและการแยกย่อย Z เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct} และ Z_w	50
2.34 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับ Nyquist Plot รูปแบบต่างๆ	50
3.1.1 การวางเซรามิกไฟเบอร์บอร์ดและขดลวดทำความร้อน	54
3.1.2 แสดงลักษณะของเตาเผาชนิดท่อที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว	55
3.1.3 แผนผังแสดงการออกแบบและประดิษฐ์เตาเผาชนิดท่อ	56
3.2.1 แสดงขนาดของกระจกที่ตัด และการห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์	57
3.2.2 แสดงลักษณะการวางกระจกและระยะห่างจากสารซึ่งกักในการ evaporation	58
3.2.3 เครื่อง evaporator และส่วนประกอบต่างๆ	58
3.2.4 แสดงตำแหน่งของ evaporation valve และ diffusion valve	59
3.2.5 pirani gauge และ penning gauge	59

รูป	หน้า
3.2.6 แผนผังแสดงการทำทำความสะอาดและเคลือบฟิล์มซิงก์บนกระจกนำไฟฟ้า	61
3.3.1 การออกแบบระบบสำหรับการปลูกเส้นลวดซิงก์ออกไซด์ในไอเอสซีโตนด้วยกระบวนการ CVD	62
3.3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูก ZnO nanowires ด้วยกระบวนการ CVD	64
3.4.1 แผนผังอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา counterelectrode	65
3.4.2 Platinum ที่เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า	66
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง temperature และ distance ของท่อเตาเผา	67
4.2.1 (ก-ค) ภาพ FE-SEM แบบ cross-section ของฟิล์มซิงก์ที่เคลือบโดยเทคนิค evaporation บนกระจกนำไฟฟ้าที่ปริมาณสารซิงก์ 0.125, 0.25 และ 0.5 g ตามลำดับ	68
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มซิงก์และปริมาณสารซิงก์	69
4.3.1 (a-c) ลักษณะ ZnO nanowires ที่เงื่อนไข Zn layer 0.125g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ	70
4.3.2(a-c) ลักษณะ ZnO nanowires ที่เงื่อนไข Zn layer 0.25g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ	71
4.3.3(a-c) ลักษณะ ZnO nanowires ที่เงื่อนไข Zn layer 0.5g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ	73
4.3.4 a) SEAD pattern ของ ZnO nanowires b) รูป TEM ของ ZnO nanowires	75
4.3.5 ผล XRD ของ ZnO powder และ ZnO nanowires ที่ปลูกที่เงื่อนไขต่างๆ	76
4.4.1 แสดงรามานสเปกตรัมของเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ของชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม 0.5 g และอัตราการไหลของอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm	79
4.4.2 photoluminescence ของชิ้นงานที่เงื่อนไขความหนาชั้นฟิล์มซิงก์ 0.5 g และอัตราการไหลของอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm	81
4.4.3 การดูคลื่นสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.125g	82
4.4.4 การดูคลื่นสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.25g	82
4.4.5 การดูคลื่นสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.5g	83
4.4.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงก์ 0.125g	84
4.4.7 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงก์ 0.25g	84
4.4.8 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงก์ 0.5g	85

รูป	หน้า
4.5.1 แสดงการเปรียบเทียบ I-V Characteristic Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO powder และ ZnO nanowires ที่ปลูกที่เงื่อนไขต่างๆ	86
4.5.2 แสดงการเปรียบเทียบ I-V Characteristic Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงก์ 0.125g	87
4.5.3 แสดงการเปรียบเทียบ I-V Characteristic Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงก์ 0.25g	87
4.5.4 แสดงการเปรียบเทียบ I-V Characteristic Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงก์ 0.5g	88
4.6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง (Z) กับส่วนจินตภาพ (Z') ของอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของ ZnO powder เทียบกับ ZnO nanowires	90
4.6.2 เซลล์ไฟฟ้าเคมีจำลองใน Equivalent Circuits Mode	91
4.7.3 แสดงระหว่างข้อมูลจริงกับการจำลองข้อมูลในโปรแกรม Z-View	91
4.7.4 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ ZnO powder และ ZnO nanowires ที่เงื่อนไขต่างๆ	96
ก-1 โปรแกรม Image Analyst ที่ใช้ในการวิเคราะห์	106
ข-1 แสดงการจำลองคลื่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ยิงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการแทรกสอดที่ฉาก	108
ข-2 แสดงตัวอย่างการกำหนดเวกเตอร์ R1, R2, R3 และ R4 ในการวิเคราะห์ระนาบผลึก	109
ข-3 แสดงระนาบที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์แฟร็กชัน	111