

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



249735



การสังเคราะห์ฟิล์มแบบใหม่และโครงสร้างนาโนของโลหะออกไซด์ในกลุ่ม ZnO
A NOVEL SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO-BASED
NANOSTRUCTURES

นายจรุส ลาเป็กใหญ่

วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

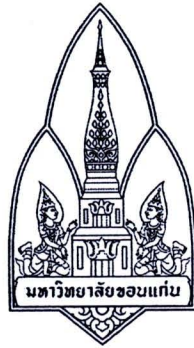
พ.ศ. 2554

600254523

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



249735



การสังเคราะห์วิธีแบบใหม่และศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโนกลุ่ม ZnO
A NOVEL SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO-BASED
NANOSTRUCTURES



นายศราวุธ ลาบัวใหญ่

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2554

การสังเคราะห์วิธีแบบใหม่และศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโนกลุ่ม ZnO

นายศราวุธ ลาบัวใหญ่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2554

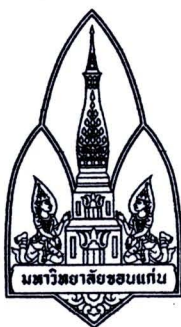
**A NOVEL SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO-BASED
NANOSTRUCTURES**

MR. SARAWUTH LABUAYAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS**

**FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MATERIALS SCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2011



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
หลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี

ชื่อวิทยานิพนธ์: การสังเคราะห์วิธีแบบใหม่และศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโน
กลุ่ม ZnO

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายศราวุธ ลาบัวใหญ่

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. สันติ แม้นศิริ

ประธานกรรมการ

ผศ. ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ขี้ตัง

กรรมการ

ดร. สุปรีย์ พินิจสุนทร

กรรมการ

ดร. นงลักษณ์ มีทอง

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ขี้ตัง)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แม่นมาตย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ แสงอรุณ)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศราวุธ ลาบัวใหญ่. 2554. การสังเคราะห์วิธีแบบใหม่และศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโนกลุ่ม ZnO. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ. ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง

บทคัดย่อ

249735

ในรายงานการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโน ZnO และ $Zn_{1-x}A_xO$ เมื่อ A คือ Mg, Co และ Mn ด้วยการสังเคราะห์วิธีแบบใหม่ โดยแบ่งวิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO ออกเป็น 3 วิธีหลัก ๆ คือ 1) วิธีโซล-เจล โดยใช้สารละลาย 3 ชนิดได้แก่ ไซขาว, วานหางจะเข้ และไบตะไคร้ 2) วิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และ 3) วิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง การเตรียมวัสดุนาโน $Zn_{1-x}A_xO$ ได้เลือกใช้วิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่าในทุกเงื่อนไขการสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO และ $Zn_{1-x}A_xO$ มีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอลแบบเวิร์ตไซด์ อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ในเงื่อนไข $x > 0.2$ พบเฟสปลอมปนเกิดขึ้นในโครงสร้าง จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุตัวอย่างมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสังเคราะห์ของแต่ละวิธี ส่วนการศึกษาสมบัติทางแสงของวัสดุนาโน ZnO โดยเทคนิค UV-Vis และ PL พบว่าวัสดุตัวอย่างที่การสังเคราะห์ได้ในแต่ละวิธีส่วนใหญ่มีการดูดกลืนแสงได้ดีในย่านเหนือม่วง (Ultraviolet : UV) คือที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm (3.10 eV) และมียอดกราฟของการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่น ~288 nm (4.31 eV) โดยมีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง ~2.90-3.25 eV ในการศึกษาการคายพลังงานแสงพบว่าวัสดุตัวอย่างส่วนใหญ่มีการคายพลังงานแสงได้ดีในย่านเหนือม่วง โดยช่วงแถบเหนือม่วงอ่อน (weak UV band), ช่วงแถบสีฟ้า-เขียว (blue-green band) และในช่วงแถบสีเขียว (green band) ผลที่วัดได้เหล่านี้ยืนยันการเกิดตำหนิภายในโครงสร้างของวัสดุ ในการการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก โดยเทคนิค VSM พบว่าวัสดุนาโน ZnO แสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบไดอะ ส่วนวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ และ $Zn_{1-x}Mn_xO$ แสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เนื่องจากไอออนของ Co^{2+} และ Mn^{2+} เข้าไปแทนที่ Zn^{2+} ที่ตำแหน่งเตตระฮีดรอลภายในโครงสร้างของ ZnO อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้เกิดตำหนิภายในโครงสร้างและอันตรกิริยาที่มีผลทำให้เกิดพฤติกรรมแม่เหล็กแบบเฟอร์โร เช่น อันตรกิริยาแบบ double exchange และอันตรกิริยาแบบ F-center exchange

Sarawuth Labuayai. 2011. *A Novel Synthesis and Characterization of ZnO-Based*

Nanostructure. Master of Science Thesis Materials Science and Nanotechnology,
Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Ekaphan Swatsitang

ABSTRACT

249735

In this study, nanostructure of ZnO and $\text{Zn}_{1-x}\text{A}_x\text{O}$ ($\text{A} = \text{Mg, Co and Mn}$) are prepared by a novel synthesis. The ZnO nanostructures are synthesised by include 1) sol-gel method using egg white (EW), aloe vera (AV) and lemon grass (LG) solution 2) chemical reaction with ultrasonic radiation and 3) direct thermal decomposition route. However the synthesis of $\text{Zn}_{1-x}\text{A}_x\text{O}$ ($\text{A} = \text{Mg, Co and Mn}$) nanostructure is prepared by direct thermal decomposition route. The XRD results show that the obtained ZnO and $\text{Zn}_{1-x}\text{A}_x\text{O}$ ($\text{A} = \text{Mg, Co and Mn}$) are single phase hexagonal wurtzite structure. However, the synthesis of $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($x > 0.2$) nanostructure prepared by direct thermal decomposition route show that second phase of MgO. The morphology of the samples revealed by SEM and TEM are different depend on method of synthesis, causing the formations with different size and shape in the samples. The UV-Vis absorption of the ZnO samples exhibit a strong absorption (UV region) below 400 nm (3.10 eV) with a well defined absorption peak at around 288 nm (4.31 eV) and the band gap energy between ~2.90-3.25 eV. The PL spectra of the ZnO samples consist of four emission bands: a strong UV emission band, a weak blue band, a blue-green band, and a very weak green band. These results are caused by defects inside the ZnO nanostructure due to various method. Finally, the specific magnetization curves are obtained from the VSM measurements. The pure ZnO sample exhibits a diamagnetic behavior, whereas all the $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ and $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$ samples are ferromagnetic. This is possibly due to the presence of the double exchange and F -center exchange mechanical caused by the complete substitution of Co^{2+} and Mn^{2+} in the Zn^{2+} site.

ขอมอบส่วนดีในงานวิทยานิพนธ์นี้แด่

บิดา มารดา ครอบครัว และคณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในครั้งนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สันติ แม้นศิริ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาวิจัย และอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี มีความเพียร ช่วยสร้างกำลังใจที่ส่งผลให้มีความมุ่งมั่นพยายามทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ อีกทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการเป็นนักวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ ดร. นงลักษณ์ มีทอง และดร. สุปรีย์ พินิจสุนทร สำหรับคำแนะนำ และติชมที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งแก่ศิษย์

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเพื่อการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเพื่อการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TG/DTA, FTIR, UV-Vis และVSM

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD และPL

ขอขอบคุณสถานบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเพื่อการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประจำหลักสูตรวิชาวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยเฉพาะสมาชิกในกลุ่มวิจัย Small & Strong Materials Group (SSMG) ที่ได้ให้กำลังใจ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชัยยุทธ คุณแม่พิกุล ลาบัวใหญ่ และทุกคนในครอบครัว ญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดีและให้กำลังใจตลอดมา รวมทั้งนางสาวอินธิรา ดำรงกุล ที่คอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ศราวุธ ลาบัวใหญ่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย	3
1.4 สถานที่ทำการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ความรู้ทั่วไปของคุณลักษณะ และโครงสร้าง ZnO	7
2.2 การสังเคราะห์และการศึกษาพฤติกรรมทางแสงของวัสดุนาโน ZnO	9
2.3 ผลของสมบัติทางแสงของการเจือธาตุโลหะ Mg ในโครงสร้าง ZnO	20
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารประกอบออกไซด์เจือแม่เหล็ก	24
2.5 ผลของสมบัติทางแม่เหล็กของการเจือธาตุโลหะแทรนซิชันใน โครงสร้าง ZnO	28
2.6 กลไกที่ใช้อธิบายความเป็นแม่เหล็กของสารประกอบออกไซด์ เจือแม่เหล็ก	36
2.7 เทคนิคการเตรียมวัสดุนาโน	40
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	45
3.1 สมบัติเชิงแสงของวัสดุ	45
3.2 สมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุ	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีการวิจัย	73
4.1 สารเคมีที่ใช้	74
4.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO วิธีโซล-เจล โดยใช้สารละลาย ไข่ขาวเป็นตัวทำละลาย	74
4.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO วิธีโซล-เจล โดยใช้สารละลาย วานหางจะเข้เป็นตัวทำละลาย	75
4.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO วิธีโซล-เจล โดยใช้สารละลายใบ ตะไคร้สกัด	75
4.5 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO โดยวิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมี ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	76
4.6 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อน โดยตรง	76
4.7 การเผาแคลไซน์ (calcination)	83
4.8 เทคนิคและหลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างและ ลักษณะทางกายภาพของ ZnO	84
บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	99
5.1 การสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO โดยการเตรียมในวิธีต่าง ๆ	99
5.2 การเปรียบเทียบถึงข้อดี และข้อด้อยในแต่ละวิธี ของการเตรียม วัสดุนาโน ZnO	180
5.3 การสังเคราะห์วัสดุนาโน $Zn_{1-x}A_xO$ เมื่อ A คือ Mg, Co และ Mn ใช้วิธีการเตรียมด้วยการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง	182
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	221
6.1 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้ สารละลายไข่ขาวเป็นตัวทำละลาย	221
6.2 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้ สารละลายวานหางจะเข้เป็นตัวทำละลาย	222
6.3 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดยใช้ สารละลายใบตะไคร้สกัดเป็นตัวทำละลาย	222

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO โดย วิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	223
6.5 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน ZnO ด้วย วิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง	224
6.6 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อน โดยตรง	225
6.7 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อน โดยตรง	225
6.8 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง	226
6.9 ข้อเสนอแนะและงานที่ทำในอนาคต	227
เอกสารอ้างอิง	229
ภาคผนวก	239
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	241
ประวัติผู้เขียน	243

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 8
ตารางที่ 2.2	รัศมีไอออนของธาตุโลหะทรานซิชัน พร้อมระบุประจุไอออน และรัศมีไอออนของ ธาตุบางชนิดที่ใช้เจือในสารประกอบออกไซด์ 26
ตารางที่ 2.3	การจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น 3d ของโลหะทรานซิชัน 27
ตารางที่ 3.1	แสดงการจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านต่าง ๆ 47
ตารางที่ 3.2	ค่าดัชนีการหักเหของแสงของวัสดุโปร่งแสงบางชนิด 53
ตารางที่ 3.3	การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน 61
ตารางที่ 3.4	การจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น 3d-ออร์บิทัลของธาตุทรานซิชัน 69
ตารางที่ 3.5	การแบ่งชนิดของวัสดุตามสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสาร 72
ตารางที่ 4.1	สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO และ $Zn_{1-x}A_xO$ เมื่อ A คือ Mg, Co และ Mn 74
ตารางที่ 5.1	ขนาดอนุภาค และค่าคงที่แลตทิซของวัสดุนาโน ZnO เมื่อแคลไซน์อุณหภูมิที่ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ คำนวณโดยวิธี X-ray line broadening 103
ตารางที่ 5.2	แสดงข้อมูลอ้างอิงตำแหน่งของเลขคลื่น (wave number) ที่มีการดูดกลืนแสง อินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จากกลุ่มวิจัยอื่น ๆ 109
ตารางที่ 5.3	กรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของโปรตีนโอวัลบูมิน 112
ตารางที่ 5.4	ตารางสรุปสารประกอบในวัฏจักรทางจระเข้ 119
ตารางที่ 5.5	ขนาดอนุภาค และค่าคงที่แลตทิซของวัสดุนาโน ZnO เมื่อแคลไซน์อุณหภูมิที่ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ คำนวณโดยวิธี X-ray line broadening 121
ตารางที่ 5.6	ขนาดอนุภาค และค่าคงที่แลตทิซของวัสดุนาโน ZnO เมื่อแคลไซน์อุณหภูมิที่ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในอากาศ คำนวณโดยวิธี X-ray line broadening 133

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.7	143
ตารางที่ 5.8	150
ตารางที่ 5.9	153
ตารางที่ 5.10	169
ตารางที่ 5.11	181
ตารางที่ 5.11	185
ตารางที่ 5.12	196

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	โครงสร้างแบบ hexagonal wurtzite ของ ZnO 8
ภาพที่ 2.2	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคนาโน ZnO เจือไนให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 5 แอมแปร์ 9
ภาพที่ 2.3	(ก) แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ E_g (ข) สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของอนุภาคนาโน ZnO เจือไนให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 5 แอมแปร์ 10
ภาพที่ 2.4	แผนภาพแสดงการสังเคราะห์วัสดุนาโน ZnO โดยวิธี chemical vapor deposition (CVD) 11
ภาพที่ 2.5	สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO ที่มีลักษณะเป็น อนุภาคนาโน, แผ่นนาโน และเส้นใยนาโน 11
ภาพที่ 2.6	(ก) ภาพถ่าย SEM (ข) ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน ZnO โดยวิธีโซล-เจล 13
ภาพที่ 2.7	สเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO (ภาพแทรกแสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ E_g) 13
ภาพที่ 2.8	แผนภาพแสดงกระบวนการเตรียมวัสดุนาโน ZnO โดยวิธีตกตะกอน 14
ภาพที่ 2.9	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO ที่มีรูปทรงเหมือนถ้วย (cup-like) (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายต่ำ (ข) ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 15
ภาพที่ 2.10	สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence วัสดุนาโน ZnO ที่มีรูปทรงเหมือนถ้วย 15
ภาพที่ 2.11	ภาพแสดงกระบวนการการเกิดซิงค์ออกไซด์ (ก) ระบบที่ไม่มี CTAB (ข) ระบบที่มี CTAB 16

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.12	ภาพแสดงไอออนบวกจาก CTA ⁺ เข้าทำปฏิกิริยากับ Zn(OH) ₄ ²⁻ 17
ภาพที่ 2.13	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO ที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (spheres) (ก) ภาพถ่ายกำลังขยายต่ำ (ข) ภาพถ่ายกำลังขยายสูง 18
ภาพที่ 2.14	สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence วัสดุนาโน ZnO ที่มี 19 รูปทรงเป็นทรงกลม
ภาพที่ 2.15	แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 20 ($\alpha h\nu$) ² และ E_g ของ วัสดุ $Mg_xZn_{1-x}O$ ($x = 0, 0.05, 0.1$, และ 0.15)
ภาพที่ 2.16	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยเทคนิค UV-vis ของวัสดุ 21 นาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ (ข) แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงาน ของวัสดุ นาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$
ภาพที่ 2.17	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุ $Zn_{1-x}Mg_xO$ (ปริมาณ Mg 22 คือ 2-30 %)
ภาพที่ 2.18	แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a และ c ของวัสดุ $Zn_{1-x}Mg_xO$ 22 (ปริมาณ Mg คือ 2-30 %)
ภาพที่ 2.19	แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงาน ของวัสดุ $Mg_xZn_{1-x}O$ ($x = 0, 0.5$, 23 1.0, 1.5, 2.5, 3.0 และ 5.0)
ภาพที่ 2.20	(ก) ภาพถ่าย TEM ของวัสดุ $Mg_{0.23}Zn_{0.77}O$ (ข) สเปกตรัมจาก 24 เทคนิค Photoluminescence วัสดุนาโน ZnO และ $Mg_{0.23}Zn_{0.77}O$
ภาพที่ 2.21	โครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ทั่วไป 25
ภาพที่ 2.22	โมเมนต์แม่เหล็กของฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วย 5 at% ของ โลหะ 28 ทรานซิชัน
ภาพที่ 2.23	การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่ 29 อุณหภูมิห้องของวัสดุ $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.029$ และ 0.056) ใช้ วิธีไฮโดรเทอร์มอล

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของวัสดุ $Zn_{1-x}Mn_xO$ ($x = 0.03, 0.05$ และ 0.07) วิธี rheological	30
ภาพที่ 2.25 โมเมนต์แม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องของ 0.2 at% Mn เจือใน ZnO และ 3.5 at% Co เจือใน ZnO (ก) และ (ข) คือฟิล์มบางของ 0.2 at% Mn เจือใน ZnO ที่เจือร่วม และไม่เจือร่วมด้วยไนโตรเจนตามลำดับ (ค) และ (ง) คือฟิล์มบางของ 3.5 at% Co เจือใน ZnO ที่เจือร่วมและไม่เจือร่วมด้วยไนโตรเจน	31
ภาพที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของวัสดุ $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$ โดยวิธีโซล-เจล ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 873–1073 K	32
ภาพที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของ ฟิล์มบาง $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.15$ และ 0.20) โดยใช้วิธี sol-gel coating route	33
ภาพที่ 2.28 (ก) ภาพถ่าย Field-emission SEM (ข) ภาพถ่าย TEM และ (ค) รูปแบบการ เลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของฟิล์มบางของฟิล์มบาง $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.15$)	34
ภาพที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง $Zn_{0.96}Er_{0.04}O$ ที่มีการให้ก๊าซออกซิเจนที่ 20 และ 30 sccm	35
ภาพที่ 2.30 สเปกตรัมจากเทคนิค Raman ของฟิล์มบาง $Zn_{1-x}Er_xO$ ($x = 0, 0.04, 0.05$ และ 0.17) โดยใช้วิธี rf magnetron sputtering	35
ภาพที่ 2.31 กลไกการเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ ของสารประกอบออกไซด์ (ก) กลไกการเกิด superexchange (ข) กลไกการเกิด double exchange	37
ภาพที่ 2.32 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาแบบ F-center	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.33 การเกิดอันตรกิริยาแบบ Bound Magnetic Polaron (BMP) โดย $\uparrow$ แทนสปินของโลหะทรานซิชัน, $\bigcirc$ แทนตำแหน่งของโลหะทรานซิชัน และ $\square$ แทนช่องว่างของออกซิเจน	39
ภาพที่ 2.34 แสดงขั้นตอนของกระบวนการเตรียมวัสดุสารด้วยเทคนิคโซล-เจล	41
ภาพที่ 2.35 การแตกตัวของฟองอากาศในของเหลว	43
ภาพที่ 2.36 แสดงระบบในการทดลองการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	43
ภาพที่ 2.37 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุสาร ZnO ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง	44
ภาพที่ 3.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงองค์ประกอบของ สนามไฟฟ้า (Electric field) สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) และทิศทางการเคลื่อนที่	46
ภาพที่ 3.2 แสดงสเปกตรัมของแทปพลังงาน	46
ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง	48
ภาพที่ 3.4 ภาพถ่ายแสดงการส่องผ่านแสงในชิ้นงาน อะลูมินา 3 ชั้น โดยชิ้นงานทางซ้ายเป็นผลึกเดี่ยว (แซฟไฟร์) ซึ่งโปร่งใส ชิ้นกลางแบบหลายผลึกและไม่มีรูพรุนซึ่ง โปร่งแสง และชิ้นขวาเป็นแบบหลายผลึกที่มีความพรุนประมาณ 15% มีความทึบแสง	49
ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงการดูดซับโฟตอนโดยการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับชั้น พลังงานหนึ่งไป ยังอีกระดับชั้นพลังงานหนึ่งในอะตอมเดี่ยวพลังงานของ โฟตอน $h\nu_{42}$ ต้องเท่ากับความแตกต่างของพลังงาน 2 ระดับชั้น ($E_4 - E_2$)	50
ภาพที่ 3.6 (ก) ภาพแสดงกลไกการดูดซับโฟตอนของวัสดุโลหะ (ข) การปล่อยโฟตอนของแสง โดยการเลื่อนชั้นของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงมายังชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า	51
ภาพที่ 3.7 (ก) ภาพแสดงกลไกการดูดซับโฟตอนของวัสดุโลหะ (ข) การคายพลังงานในรูป ของแสงโดยอิเล็กตรอนเลื่อนระดับพลังงานข้ามแถบต้องห้าม	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.8 (ก) แสดงการดูดซับโฟตอนโดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ สำหรับวัสดุที่มีระดับชั้นพลังงานของสารเจือปน (ข) แสดงการเกิด โฟตอน 2 ตัวสำหรับวัสดุที่มีระดับชั้นพลังงานของสารเจือปน	57
ภาพที่ 3.9 ภาพแสดงการส่องผ่านของแสงในตัวกลางที่โปร่งใสเกิดการสะท้อนและดูดซับภายในตัวกลาง	58
ภาพที่ 3.10 แผนภาพพลังงานของสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืนและแบบเปล่งออก	59
ภาพที่ 3.11 โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจร (Orbiting) และ (ข) การสปินรอบตัวเองของอิเล็กตรอน	62
ภาพที่ 3.12 แสดงสนามแม่เหล็กรอบ ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงกับแท่งแม่เหล็ก	64
ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแลกเปลี่ยนกับค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของอะตอมและเส้นผ่านศูนย์กลางของ 3d-ออร์บิทัล (a/d) ของธาตุทรานซิชันบางชนิด	70
ภาพที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO โดยใช้สารละลายโซ่ขาว	78
ภาพที่ 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO โดยใช้สารละลายวุ้นทางจระเข้	79
ภาพที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO โดยใช้สารละลายไบตะไคร้สกัด	80
ภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO โดยวิธีการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	81
ภาพที่ 4.5 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร ZnO โดยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง	82
ภาพที่ 4.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร $Zn_{1-x}Mg_xO$ โดยวิธีการสลายตัวทาง ความร้อนโดยตรง	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.7	แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุสาร $Zn_{1-x}Co_xO$ และ $Zn_{1-x}Mn_xO$ วิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง
ภาพที่ 4.8	อัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิแคลไซน์
ภาพที่ 4.9	ส่วนประกอบของเครื่อง TG-DTA
ภาพที่ 4.10	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากความสัมพันธ์ตามกฎของแบรกก์
ภาพที่ 4.11	แผนภาพแสดงการตรวจสอบสารตัวอย่างโดยเทคนิค XRD
ภาพที่ 4.12	แผนภาพการแสดงระดับพลังงานของกระบวนการเกิด Raman scattering
ภาพที่ 4.13	แผนภาพแสดงระดับพลังงานของการเกิด PL
ภาพที่ 4.14	แสดงส่วนประกอบของเครื่อง PL
ภาพที่ 4.15	แผนภาพโครงสร้างของ SEM
ภาพที่ 4.16	แผนภาพโครงสร้างของ TEM
ภาพที่ 4.17	แผนภาพโครงสร้างหลักของ VSM
ภาพที่ 5.1	(ก) แสดงโครงสร้างของกรดอะมิโน (ข) แสดงการต่อกันของกรดอะมิโนด้วย พันธะเปปไทด์เป็นสายโซ่ยาว (polypeptide)
ภาพที่ 5.2	โครงสร้างกรดอะมิโนประเภทต่าง ๆ
ภาพที่ 5.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุนาโน ZnO โดยเทคนิค XRD แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ภาพที่ 5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ภาพที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ภาพที่ 5.6	สเปกตรัมจากเทคนิค Raman ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ภาพที่ 5.7	สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.8 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500 และ (ค) 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	111
ภาพที่ 5.9 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ช่องว่างแถบพลังงาน	115
ภาพที่ 5.10 แสดงค่าแถบพลังงานของวัสดุ ZnO ที่แสดงระดับพลังงานของชั้นโดเนอร์ (donor level) เมื่อมีตำหนิในโครงสร้าง	116
ภาพที่ 5.11 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็น เวลา 2 ชั่วโมง	117
ภาพที่ 5.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	121
ภาพที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	122
ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	122
ภาพที่ 5.15 สเปกตรัมจากเทคนิค Raman ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	124
ภาพที่ 5.16 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500 และ (ค) 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	126
ภาพที่ 5.17 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ช่องว่างแถบพลังงาน	128
ภาพที่ 5.18 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็น เวลา 2 ชั่วโมง	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	133
ภาพที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	134
ภาพที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	134
ภาพที่ 5.22 สเปกตรัมจากเทคนิค Raman ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	136
ภาพที่ 5.23 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500 และ (ค) 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	138
ภาพที่ 5.24 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ช่องว่างแถบพลังงาน	140
ภาพที่ 5.25 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็น เวลา 2 ชั่วโมง	142
ภาพที่ 5.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ NaOH โดยที่ใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน	149
ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ NaOH โดยที่ใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน	150
ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ NaOH โดยที่ใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน	151
ภาพที่ 5.29 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ KOH โดยใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของ วัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ KOH โดยใช้สารตั้งต้น ของซิงค์ต่างกัน	153
ภาพที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับสารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ KOH โดยใช้สารตั้ง ต้นของซิงค์ต่างกัน	154
ภาพที่ 5.32 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ NaOH โดยใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน (ก) ZnO_NT_KOH (ข) ZnO_AT_KOH (ค) ZnO_CR_KOH (ง) ZnO_SF_KOH	155
ภาพที่ 5.33 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO เมื่อใช้สารละลายเบสของ KOH โดยใช้สารตั้งต้นของซิงค์ต่างกัน (ก) ZnO_NT_KOH (ข) ZnO_AT_KOH (ค) ZnO_CR_KOH (ง) ZnO_SF_KOH	157
ภาพที่ 5.34 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO_NaOH (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ช่องว่าง แถบพลังงาน	159
ภาพที่ 5.35 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO_KOH (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ช่องว่าง แถบพลังงาน	161
ภาพที่ 5.36 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO กรณีใช้สารละลาย เบสของ NaOH เมื่อใช้สารตั้งต้นของซิงค์ ต่างกัน	163
ภาพที่ 5.37 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO กรณีใช้สารละลาย เบสของ KOH เมื่อใช้สารตั้งต้นของซิงค์ ต่างกัน	165
ภาพที่ 5.38 การสลายตัวทางความร้อนของสารตั้งต้นซิงค์อะซิเทรตโดยเทคนิค TG/DTA	167
ภาพที่ 5.39 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	169

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอุณหภูมิแคลไซน์ของวัสดุ นาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	170
ภาพที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอุณหภูมิแคลไซน์ของ วัสดุนาโน ZnO ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C เป็น เวลา 4 ชั่วโมง	170
ภาพที่ 5.42 สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C เป็น เวลา 4 ชั่วโมง	172
ภาพที่ 5.43 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500 (ค) 600 และ (ง) 700 °C เป็น เวลา 4 ชั่วโมง	173
ภาพที่ 5.44 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600 และ (ง) 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	175
ภาพที่ 5.44 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600 และ (ง) 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ต่อ)	176
ภาพที่ 5.45 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และช่องว่างแถบพลังงาน (ภาพ แทรก) จากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600 และ (ง) 700 °C เป็น เวลา 4 ชั่วโมง	178
ภาพที่ 5.46 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C เป็น เวลา 4 ชั่วโมง	180
ภาพที่ 5.47 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเทคนิค XRD ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4) แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	184
ภาพที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณการเจือ Mg ของ วัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4)	185

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับปริมาณการเจือ Mg ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4)	186
ภาพที่ 5.50 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ เมื่อ (ก) $x = 0$, (ข) $x = 0.1$, (ค) $x = 0.2$, (ง) $x = 0.3$ และ (จ) $x = 0.4$ (ต่อ)	187
ภาพที่ 5.51 สมบัติการดูดกลืนแสงจากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน ZnO (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานกับปริมาณการเจือ Mg	190
ภาพที่ 5.52 สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Mg_xO$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4)	192
ภาพที่ 5.53 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง (ก) $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0, 0.025, 0.05, 0.075$) แคลไซน์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 6 ชั่วโมง (ข) ZnO แคลไซน์ที่ 300 และ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 6 ชั่วโมง	195
ภาพที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณการเจือ Co ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.025, 0.05$ และ 0.075)	196
ภาพที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับปริมาณการเจือ Co ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.025, 0.05$ และ 0.075)	197
ภาพที่ 5.56 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ เมื่อ (ก) $x = 0$ ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), (ข) $x = 0.025$, (ค) $x = 0.05$ และ (ง) $x = 0.075$ แคลไซน์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	198
ภาพที่ 5.57 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ เมื่อ (ก) $x = 0$ ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), (ข) $x = 0.025$, (ค) $x = 0.05$ และ (ง) $x = 0.075$ แคลไซน์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	200
ภาพที่ 5.57 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ เมื่อ (ก) $x = 0$ ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), (ข) $x = 0.025$, (ค) $x = 0.05$ และ (ง) $x = 0.075$ แคลไซน์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ต่อ)	201
ภาพที่ 5.58 ภาพถ่าย HRTEM ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Co_{0.075}O$ แคลไซน์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	202

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.59	สเปกตรัมการดูดกลืนแสง จากเทคนิค UV-vis ของวัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ 203
ภาพที่ 5.60	ความเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการวัดโดยเทคนิค VSM (ก) วัสดุนาโน ZnO แคลไซน์ที่ 300 และ 400 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) วัสดุนาโน $Zn_{1-x}Co_xO$ ($x = 0.025, 0.05, 0.075$) แคลไซน์ที่ 300 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 206
ภาพที่ 5.61	แบบจำลองการเกิดอันตรกิริยาแบบต่างๆ เมื่อมีการเจือ Co ในโครงสร้างของ ZnO 207
ภาพที่ 5.62	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ด้วยวิธีการสลายตัวทางความร้อนโดยตรง (ก) $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ แคลไซน์ที่ 300 °C เวลา 6 ชั่วโมง (ข) ZnO แคลไซน์ที่ 400 °C เวลา 6 ชั่วโมง (ค) ZnO แคลไซน์ที่ 300 °C เวลา 6 ชั่วโมง 210
ภาพที่ 5.63	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ แคลไซน์ที่ 300 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 211
ภาพที่ 5.64	ภาพถ่าย TEM ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ แคลไซน์ที่ 300 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 212
ภาพที่ 5.65	ภาพถ่าย HRTEM ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ แคลไซน์ที่ 300 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 213
ภาพที่ 5.66	สเปกตรัมจากเทคนิค Photoluminescence ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ 215
ภาพที่ 5.67	ความเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการวัดโดยเทคนิค VSM ของวัสดุนาโน $Zn_{0.925}Mn_{0.075}O$ ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ที่ 300 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 218
ภาพที่ 5.67	แบบจำลองการเกิดอันตรกิริยาแบบต่างๆเมื่อมีการเจือ Mn ในโครงสร้างของ ZnO 219