

การสังเคราะห์วัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F,B) ด้วยกระบวนการ
ตกตะกอนร่วมและกระบวนการคลื่นเสียง

SYNTHESIS OF M-Zn-O (M=F,B) CONDUCTIVE OXIDE NANOMATERIALS BY
CO-PRECIPIATION AND ULTRASOUND-ASSISTED PROCESS



ฐิตารัตน์ ทองประดิษฐ์

TITARAT THONGPRADITH

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF M-Zn-O (M=F,B) CONDUCTIVE OXIDE NANOMATERIALS
BY CO-PRECIPITATION AND ULTRASOUND-ASSISTED PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIALS ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์วัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F,B) ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการคลื่นเสียง

Special Project Title SYNTHESIS OF M-Zn-O (M=F,B) CONDUCTIVE OXIDE NANOMATERIALS BY CO-PRECIPIATION AND ULTRASOUND-ASSISTED PROCESS

นักศึกษา นางสาว ฐิตารัตน์ ทองประดิษฐ์

รหัสประจำตัว 57110013

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต




ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วณิชยา เมฆประสาท

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร. กนกทิพย์	บุญยรัตกลิน	
รศ.ดร. วิษณุ	เพชรภา	
ผศ.ดร. วณิชยา	เมฆประสาท	

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การสังเคราะห์วัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F,B) ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการคลื่นเสียง

นักศึกษา

นางสาว วิฐดารัตน์ ทองประดิษฐ์

เลขประจำตัว

57110013

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วณิชยา เมฆประสาท

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมีและพัฒนาสมบัติอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยการเจือโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นร่วมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีสมบัติเป็นเบสเพื่อให้เกิดเป็นสารละลายคอลลอยด์ จากนั้นวิเคราะห์ความเป็นผลึกและคำนวณหาขนาดของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และสมการเชอร์เรอร์ ตรวจวัดสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงในโหมดการสะท้อนแสงและเทคนิคขั้วไฟฟ้าที่จุด สามารถตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์และองค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิคการวัดองค์ประกอบของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนจากทั้งสองวิธีนั้นให้โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลตามรูปแบบของซิงค์ออกไซด์และไม่มีนัยสำคัญในการเลื่อนของพีคเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นการเจือ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นให้ลักษณะที่เป็นแท่งและมีความยาวที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนความเข้มข้นของการเจือทั้งโบรอนและฟลูออรีนเพิ่มขึ้น ส่วนในกระบวนการโซโนเคมีให้ลักษณะผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์เป็นอนุภาคทรงกลมที่รวมกันเนื่องจากได้รับพลังงานจากโพรบโซโน จากการที่มีรูปร่างที่เป็นแท่งและเกิดการแทนที่แบบแทรกของโบรอนและฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นส่งผลทำให้มีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้น มีการลดลงของแถบพลังงานและความต้านทานทางไฟฟ้าอย่างได้ชัดเจนเมื่อมีการเจือโบรอนและฟลูออรีน ส่วนในกรณีเมื่อเจือโบรอนแล้วมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงเป็นผลจากการรวมตัวของโบรอนเป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

คำสำคัญ ซิงค์ออกไซด์, กระบวนการตกตะกอนร่วม, กระบวนการโซโนเคมี, โบรอน, ฟลูออรีน

Special Project Title	Synthesis of M-Zn-O (M=F,B) Conductive Oxide Nanomaterials by Co-precipitation and Ultrasound-Assisted Process
Student	Miss Titarat Thongpradith
Student ID	57110013
Degree	Bachelors of Engineering
Major	Nanomaterials Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Wanichaya Mekprasart

ABSTRACT

In this work, we focused on the different methods to produce zinc oxide (ZnO) nanoparticles by co-precipitation and sonochemistry method. To improve ZnO nanoparticle properties, boron (B) and fluorine (F) atoms as doping materials were loaded with different concentration ratios in range of 0-9 mol%. Zinc nitrate solution was chosen as Zn precursor and interacted with ammonium hydroxide base-solution to obtain white colloidal solution. Crystallinity and crystallite size of ZnO product were analyzed by X-ray diffraction (XRD) technique and Scherrer's equation. Optical and electrical properties were characterized by UV-Visible spectroscopy and four point probe technique. ZnO morphologies and element chemical composition were monitored by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). XRD patterns of B and F doped in ZnO synthesized by both methods are purities hexagonal structure according to ZnO XRD pattern. Meanwhile, the increase of dopant concentration is insignificant shifted on ZnO peak pattern. ZnO morphology synthesized by co-precipitation method is formed in rod-like structure with increasing rod length by loading B and F dopant. In sonochemistry method, ZnO product is a spherical aggregated nanoparticles due to high energy from sono-probe. The interstitial substitution of B and F ion in ZnO structure leads to increasing crystallite size by the effect of ionic radius. The optimized condition in optical and electrical properties of B and F doping is obtained by co-precipitation method because of rod-like shape. Especially, the decrease of bandgap energy and resistivity is obviously occurred in F doping. In case of B doping, high resistivity is obtained by the effect of the formation of barrier in material due to high B content.

Keywords Zinc oxide, Boron, Fluorine, Co-precipitation, Sonochemistry

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์นั้น ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วณิชยา เมฆประสาท สำหรับคำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงาน ค่อยดูแลเอาใจใส่ รวมทั้งสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ เพชรภา สำหรับคำแนะนำในการทำงาน และอุปการะทุนสนับสนุน ขอขอบพระคุณพี่ๆและอาจารย์ ห้องทดลอง Nanocomposite materials Research Laboratory (NMRL) ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือรวมถึงอำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รัก ที่อุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและกำลังใจที่สำคัญที่สุดแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนแก่ข้าพเจ้า และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี พระจอมเกล้าลาดกระบังทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่กันตลอดมา

ฐิตารัตน์ ทองประดิษฐ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและนำออกอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vii
สารบัญตาราง.....	xi
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 นาโนเทคโนโลยี.....	4
2.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide).....	5
2.3 โบรอน (Boron).....	6
2.4 ฟลูออรีน (Fluorine).....	7
2.5 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน.....	8
2.5.1 กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down Approach).....	8
2.5.2 กระบวนการสังเคราะห์ล่างสู่บน (Bottom-up approach).....	8
2.6 กระบวนการตกตะกอน (Precipitation).....	9
2.7 กระบวนการโซโนเคมี (Sonochemistry).....	10
2.7.1 อะคูสติก คาวิเทชัน (Acoustic Cavitation).....	11
2.7.2 คลื่นเหนือเสียง.....	12
2.8 กระบวนการเจือ.....	14
2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและวิเคราะห์.....	15
2.9.1 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD).....	15
2.9.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสงโหมดตรวจวัดการสะท้อนของแสง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy).....	16
2.9.3 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและก๊อปปี้ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.9.4 เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการวัดองค์ประกอบ ของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDX)	18
2.9.5 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย วิธีขั้วไฟฟ้าสี่จุด (Four point probe)	19
2.10 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	34
3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม	34
3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	36
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาค.....	38
3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	38
3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM).....	38
3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)	39
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติการกระเจิงแสงและการสะท้อนของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy	40
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากการวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4 point probe.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์ผลผลิตลักษณะอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน	41
4.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	41
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	43
4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุในผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีเอ็กซ์	47
4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโหมมดการสะท้อนของแสง	48
4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคขั้วไฟฟ้า 4 จุด.....	52
4.2 การวิเคราะห์ผลผลิตลักษณะอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	53
4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	55
4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุในผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีเอ็กซ์	59
4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโหมมดการสะท้อนของแสง	60
4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคขั้วไฟฟ้า 4 จุด.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา	66
5.3 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ก) ซิงค์เบลนด์ (Zincblend) และ (ข) เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ (Hexagonal Wurtzite)	5
2.2 ลักษณะทางกายภาพของธาตุโบรอน	6
2.3 ลักษณะทางกายภาพของธาตุฟลูออรีน	7
2.4 รูปแบบของกระบวนการสังเคราะห์แบบบนล่างและล่างสู่บน	8
2.5 รูปร่างวัสดุในระดับนาโน 0 มิติ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ	9
2.6 การเกิดและสลายของฟองอากาศควิเตชัน เมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน	10
2.7 รูปแบบของเครื่องโซโนเคมี แบบอัลตราโซนิค ฮอว์น ที่มีการใช้งานแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric).....	11
2.8 ช่วงของคลื่นเหนือเสียง.....	12
2.9 ลักษณะของควิเตชันที่เกิดขึ้นจากใบพัด.....	13
2.10 (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง (ข) ความบกพร่องแบบแทรก (ค) ความบกพร่องแบบแทนที่ ของอะตอมที่แทนที่มีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของอะตอมเดิม (ง) ความบกพร่องแบบแทนที่ของ อะตอมที่แทนที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของอะตอมเดิม (จ) ความบกพร่องแบบเฟรนเกลและ (ฉ) ความบกพร่องแบบซีออตต์.....	14
2.11 รูปแบบการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเมื่อตกกระทบกับแลตทิซ	16
2.12 รูปแบบการสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบพื้นผิวตัวอย่างที่เป็นผ่ง	17
2.13 ระดับของอิเล็กตรอนที่สามารถหลุดได้เมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอ	18
2.14 การหลุดออกของอิเล็กตรอน และมีการตกมาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดไป	19
2.15 แผนภาพของหัววัด 4 จุดของการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า	20
2.16 ลักษณะรูปร่างของซิงค์ออกไซด์ (ก) การเจือและ (ข) เจือฟลูออรีนด้วย TEM	21
2.17 กราฟ XRD ของซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือและเจือฟลูออรีน.....	21
2.18 (ก) กราฟการดูดกลืน (ข) PL spectra (ค) NIR reflectance spectra ของซิงค์ออกไซด์ ที่ไม่มีการเจือและเจือฟลูออรีน.....	21
2.19 XRD ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยคลื่นเหนือเสียงในเวลาที่แตกต่างกัน	22
2.20 (ก) SEM (ข)-(ง) TEM ของ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กลวง	23
2.21 ภาพ SEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยคลื่นเหนือเสียง (ก)-(ข) 3 นาที (ค)-(ง) 10 นาที (จ)-(ฉ) 60 นาที และภาพเล็กใน 2.24(ข) เป็นภาพ TEM.....	23
2.22 กลไกการเกิดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีรูกลวง	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	กราฟแสดงผลของ Diffuse reflectance spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ก) ไม่มีสีย้อม (ข) มีสีย้อม N719 24
2.24	กราฟ XRD ของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือโบรอนและเจือโบรอนที่ 0-5 เปอร์เซ็นต์อะตอม 25
2.25	ภาพตัดขวางที่ได้จาก TEM ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือโบรอน (ก) ไม่เจือและ (ข)-(จ) เจือ 1-5 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ 25
2.26	สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Zn:B (ความเข้มข้นของพาหะ ค่าความคล่องของพาหะและค่าความต้าน) 26
2.27	การทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบางที่ไม่เจือและเจือด้วยโบรอน (ภาพเล็ก) ค่าการดูดกลืนของฟิล์มบาง Zn:B 26
2.28	กราฟ XRD ที่ไม่เจือและเจืออลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ 27
2.29	ภาพ SEM (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์ 28
2.30	กราฟ FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์ 28
2.31	กราฟการดูดกลืนทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์ 29
2.32	กราฟ XRD (ก) พีคทั้งหมด และ (ข) 3 พีคหลักที่เกิดการเลื่อนไปทางพลังงานที่สูง 30
2.33	ภาพ SEM (ก) ไม่มีการเจือ และ (ข)-(ง) 3, 5 และ 11 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ 30
2.34	กราฟการดูดกลืนกับความยาวคลื่น 31
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 33
3.2	แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม 35
3.3	แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี 37
3.4	เครื่อง X-Ray Diffraction ของบริษัท Rigaku รุ่น SMARTLAB 38
3.5	เครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy ของบริษัท Hitachi รุ่น s4700 .. 39
3.6	เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ของบริษัท IXRF systems รุ่น 550i 39
3.7	เครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy ของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950 40
3.8	เครื่อง 4 point probe ของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ ^{www}อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	42
4.2 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k.....	45
4.3 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k.....	46
4.4 ขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการวัดขนาดอนุภาคด้วยรูป SEM ในเงื่อนไขการเจือด้วยโบรอนที่ 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี.....	47
4.5 กราฟแสดงปริมาณธาตุ ซิงค์ ออกซิเจน โบรอนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	48
4.6 แผนภาพช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ (ก) ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยโบรอนและ (ข) เมื่อเจือด้วยโบรอน.....	49
4.7 กราฟการสะท้อนทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจาก (ก) ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี.....	50
4.8 ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจาก (ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	51
4.9 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์	52
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี.....	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k.....	57
4.12 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k.....	58
4.13 ขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการวัดขนาดอนุภาคด้วยรูป SEM ในเงื่อนไขการเจือด้วยฟลูออรีนที่ 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี.....	59
4.14 กราฟแสดงปริมาณธาตุ ซิงค์ ออกซิเจน และฟลูออรีนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี.....	60
4.15 แผนภาพช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ (ก) ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยโบรอนและ (ข) เมื่อเจือด้วยโบรอน.....	61
4.16 กราฟการสะท้อนทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนจาก (ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี.....	62
4.17 ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจาก (ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี.....	63
4.18 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	5
2.2 สมบัติทางกายภาพของโบรอน.....	6
2.3 ไอโซโทปของธาตุโบรอน.....	6
2.4 สมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน	7
4.1 ขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วย กระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี.....	43
4.2 ขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วย กระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันความต้องการของมนุษย์นั้นไม่สิ้นสุดทำให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวันให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามความต้องการของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นวัสดุ อุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้า ทางด้านแสง ทางด้านพลังงานหรือแม้แต่ด้านการบำบัดและรักษาสิ่งแวดล้อมหรือทางการแพทย์ โดยในการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติต่างๆเหล่านี้ของวัสดุมีข้อจำกัดคือต้องใช้ต้นทุนในการผลิตและใช้เวลาในการผลิตที่ต่ำเพื่อให้คุ้มค่าในการพัฒนาและปรับปรุง โดยวัสดุที่สามารถใช้ต้นทุนและเวลาในการผลิตที่ต่ำได้และมีสมบัติที่โดดเด่นทั้งทางด้านไฟฟ้า ทางด้านแสงหรือทางด้านการบำบัดและรักษาสิ่งแวดล้อมก็คือ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ จากการที่อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีสมบัติที่หลากหลายและมีราคาที่ไม่สูงมากไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางด้านไฟฟ้าที่สามารถเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด-n (n-type) มีช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap) ที่กว้าง มีความเสถียรทางความร้อนและทางเคมี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์และสัตว์ สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเพื่อบำบัดมลพิษทางน้ำและมีสมบัติทางแม่เหล็กที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำสามารถเกิดสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกแม่เหล็กได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเพียโซอิเล็กทริกและโฟโรอิเล็กทริกได้ [1,2]

อนุภาคซิงค์ออกไซด์นั้นมีสมบัติที่หลากหลายพร้อมทั้งสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน จากการศึกษาจากกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มพบว่า หากขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์อยู่ในระดับนาโนแล้วจะทำให้มีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปต่างจากอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากสมบัติของอนุภาคนาโนนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของลักษณะโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าได้ การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีหลากหลายวิธี ได้แก่ 1) วิธีทางกายภาพ เช่น การบดด้วยเครื่องบดร่วมกับลูกบด (Ball-mill) เป็นวิธีที่ใช้พลังงานสูงที่เกิดจากการชนกันของลูกบอล เป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาต่ำ แต่มีข้อจำกัดคือขนาดของอนุภาคที่ได้นั้นอาจจะไม่อยู่ในระดับนาโน [3] 2) วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารตั้งต้นกลายเป็นลักษณะหยดละอองแล้วไปตกกระทบที่ฐานรองรับที่มีการให้ความร้อน กระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เป็นวิธีการที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแอลคาไลน์ (Alkaline solution) กับเกลือของซิงค์ในสถานะของเหลว ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ ที่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อควบคุมขนาด รูปร่าง และเปลี่ยนเป็นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ กระบวนการการโซลเจล (Sol-Gel) เริ่มจากสถานะโซลซึ่งเป็นขั้นแรกที่สารตั้งต้นจะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำ (Hydrolysis) เกิดเป็นคอลลอยด์หรืออนุภาคนาโนเล็กที่ลอยอยู่ในสารละลาย และเกิดการควบแน่นผ่านปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) จนกลายเป็นสถานะเป็นเจล แล้วผ่านการอบและเผาให้แห้งกลายเป็นอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ส่วนกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และกระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) ทั้งสองวิธีนี้เป็นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในรูปแบบสามมิติ สองมิติ หนึ่งมิติ และศูนย์มิติ ที่ใช้อุณหภูมิและภายใต้ความดันที่สูงภายในระบบปิด ซึ่งทางผู้วิจัยได้นำเสนอการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการเคมีเนื่องจากให้ขนาดของอนุภาคที่อยู่ในระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนและเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการตกตะกอนร่วมที่ได้กล่าวไปข้างต้นและกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemistry) ในการสังเคราะห์ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการให้พลังงานคลื่นเหนือเสียง ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในสารละลาย เมื่อได้รับพลังงานที่มากพอจะทำให้ฟองอากาศเกิดการขยายแล้วมีการชนกันและแตกออกภายในของเหลว เกิดเป็นปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างสารตั้งต้นในของเหลวจากการที่มีพลังงานและอุณหภูมิภายในระบบที่สูงเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าอะคูสติก คาวิตีชัน (Acoustic cavitation) ซึ่งทั้งสองกระบวนการเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยความแตกต่างระหว่างกระบวนการโซโนเคมีไม่ต้องให้อุณหภูมิสูงเหมือนกับกระบวนการตกตะกอนร่วมเพื่อทำให้เกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ ซึ่งอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนนี้จะสามารถนำมาใช้ได้ในงานด้านต่างๆ เช่น ด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เช่น ไดโอดเปล่งแสง ไดโอดเปล่งแสงชนิดเลเซอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และเซนเซอร์ตรวจจับแสง

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อมีการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นที่ต่างกัน โดยสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในอุณหภูมิห้องนั้นจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด-เอน จากการเจืออะตอมของธาตุโบรอนเข้าไปแทรกหรือแทนที่ตำแหน่งอะตอมของธาตุซิงค์ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและการเจือธาตุฟลูออรีนให้เข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของธาตุออกซิเจน คาดว่าเพื่อทำให้สารที่ได้นั้นจะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระที่มากขึ้น โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ง่ายและทำได้อย่างรวดเร็วโดยการเติมเบสเข้าไปเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในสารละลายแต่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง และสำหรับกระบวนการโซโนเคมีเป็นวิธีที่ง่ายเช่นเดียวกันและไม่ใช้อุณหภูมิสูงโดยเป็นการเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศของคลื่นเสียงภายในของเหลวทำให้ช่องว่างหรือฟองอากาศเกิดการบีบอัด ขยายตัวและแตกออกของฟองอากาศเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แล้วเกิดการรวมตัวกันของไอออนของสารตั้งต้นเกิดเป็นตะกอน ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate) และมีตัวทำละลายคือน้ำปลอดประจุ (Deionization water) ผสมกับเอทานอล และมีการใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้สารละลายเกิดเป็นตะกอน โดยมีความเป็นเบสที่ pH 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่ให้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอนุภาคมากที่สุด เพื่อศึกษา ลักษณะของโครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนการเจือที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุประเภทออกไซด์ในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และใช้งานทางด้านตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและโซโนเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในปัจจุบันต่าง ๆ เช่น กระบวนการสังเคราะห์ อัตราส่วนของสารเจือ

1.2.3 เพื่อตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้าง สัณฐานวิทยา และสมบัติทางแสงของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทำการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนด้วยวิธีตกตะกอนร่วมและโซโนเคมี

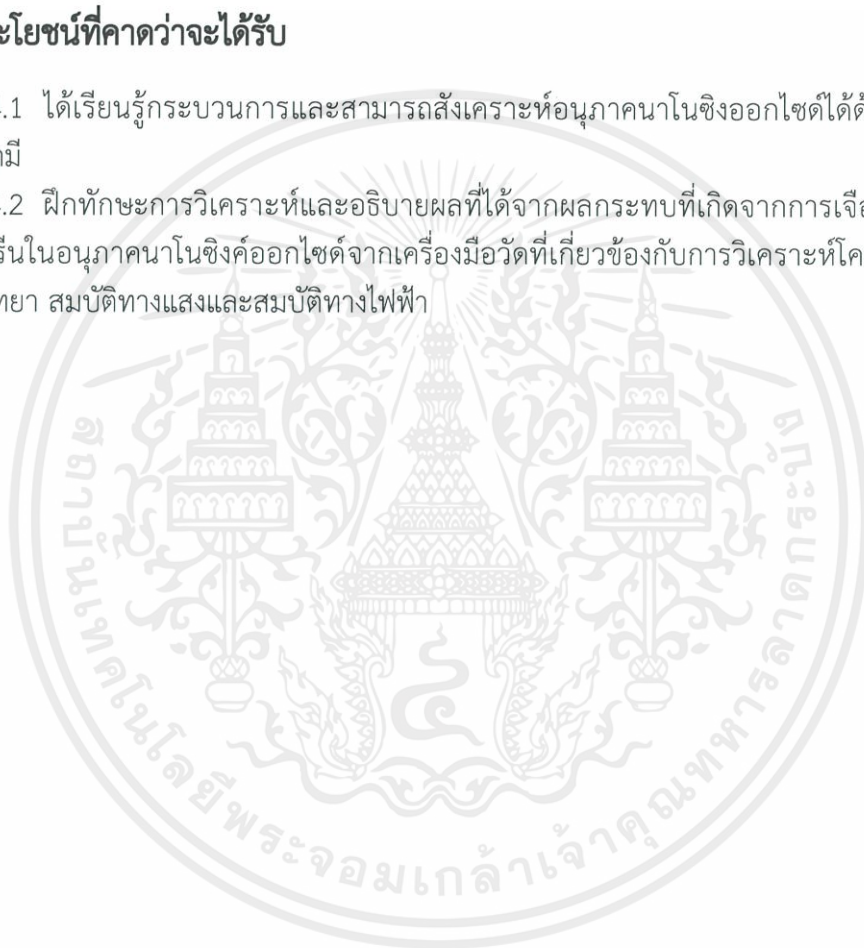
1.3.2 ทราบอัตราส่วนของการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการศึกษาสมบัติต่างๆ

1.3.3 ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เรียนรู้กระบวนการและสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ด้วยกระบวนการทางเคมี

1.4.2 ฝึกทักษะการวิเคราะห์และอธิบายผลที่ได้จากผลกระทบที่เกิดจากการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโน (Nano) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก “Nanos” แปลว่า แคระ เมื่อนำมารวมกับหน่วยวัดทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ จะหมายถึงขนาดเศษหนึ่งในพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ การศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัตถุที่มีขนาดในช่วงนาโนเมตร ประมาณ 1-100 นาโนเมตร

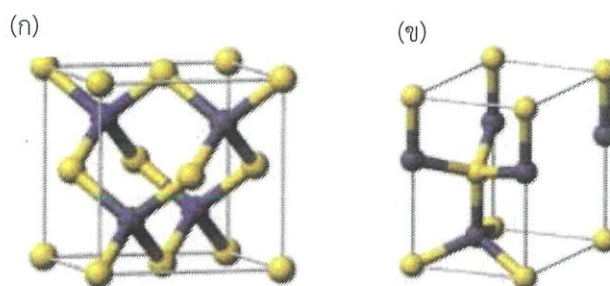
นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวัสดุหรืออุปกรณ์หรือการประยุกต์ใช้สิ่งของที่มีขนาดเล็กในระดับอะตอม โมเลกุลหรือโมเลกุลมหภาพ (Macromolecule) เพื่อให้ได้โครงสร้างหรือสมบัติที่พิเศษขึ้นและสามารถยังใช้ได้ในด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย เช่น ทางด้านเคมี ชีววิทยา ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรม

แนวคิดของนาโนศาสตร์และนาโนเทคโนโลยีเริ่มมาจากการบรรยายในหัวข้อเรื่อง “ยังมีทางขยับขยายอีกมากในระดับจุลภาค (There’s Plenty of Room at the Bottom)” ของนักฟิสิกส์ ริชาร์ด ไฟน์แมน ในงานประชุมที่สหรัฐอเมริกาซึ่งได้กล่าวว่า “สักวันหนึ่ง เราจะสามารถประกอบสิ่งต่างๆ ผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมได้ด้วยความแม่นยำและเท่าที่ข้าพเจ้าไม่รู้ไม่มีกฎทางฟิสิกส์ใดๆ หรือแม้แต่หลักแห่งความไม่แน่นอน (Uncertainty Principle) ที่มาขัดความเป็นได้ได้นี้” ซึ่งหมายความว่าเราสามารถที่จะสร้างสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเพื่อทำให้เกิดสมบัติและปรากฏการณ์ใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นเฉพาะในระดับนาโนเท่านั้น เพื่อนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์

วัสดุนาโน คือ วัสดุประเภทโลหะ เซรามิก พอลิเมอร์และวัสดุผสมต่างๆ ที่สร้างหรือสังเคราะห์ให้มีขนาดในระดับนาโนเมตร การที่วัสดุมีขนาดเล็กลงทำให้วัสดุมีสมบัติที่พิเศษไปจากการที่มีขนาดใหญ่คือมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น หรืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้น เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางแสง หรือสมบัติทางแม่เหล็ก วัสดุนาโนระดับนาโนถูกประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและในท้องตลาด เช่น อนุภาคคาร์บอนแบล็ค (Carbonblack) ที่ใช้ลดความต้านทานของล้อรถยนต์ นาโนไฟเบอร์ (Nanofiber) ถูกใช้สำหรับเป็นฉนวนและวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต เหล็กออกไซด์ถูกสร้างให้มีสมบัติแม่เหล็กสำหรับหัวอ่านแผ่นซีดี แม่เหล็กที่เครื่องอัดเทปหรือคอมพิวเตอร์ฮาร์ดดิสก์ อนุภาคในระดับนาโนอย่างเช่นอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรืออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาผสมในเครื่องสำอางเพื่อป้องกันการถูกทำลายของผิวจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ใช้เคลือบบนกระจกเพื่อลดการสะท้อนของแสงหรือเคลือบบนวัสดุโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งาน เช่น การตัด การฉีก ฉสมในเรคเกตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ใช้รักษาแผลเพื่อการสมานตัวของแผลที่เร็วขึ้นและใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตในผลิตภัณฑ์สีเพื่อความคงทนในการเกาะของเม็ดสี วัสดุนาโนและแผ่นนาโนถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านแสง เช่น เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งการใช้งานด้านนาโนเทคโนโลยีที่เห็นผลชัดที่สุดและมีการเติบโตมากในปัจจุบันคือทางการแพทย์และ/หรือทางชีววิทยาเพื่อให้มีการรักษาหรือตรวจวิเคราะห์ที่ผลอย่างรวดเร็ว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ก) ซิงค์เบลนด์ (Zincblende) และ (ข) เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ (Hexagonal Wurtzite) [7]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

มวลโมเลกุล	81.408 g/mol
จุดหลอมเหลว	1975°C
จุดเดือด	2360°C
ความหนาแน่น	5.6 g/cm ³

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น ZnO มีโครงสร้างเฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์และซิงค์เบลนด์ ดังรูปที่ 2.1 มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด-แอน สีของซิงค์ออกไซด์จะมีสีขาวและไม่ละลายน้ำ ในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปของแร่ซินไซต์ (Zincite) ส่วนซิงค์ออกไซด์จะได้มาจากการสังเคราะห์ ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติเป็นตัวนำความร้อน ป้องกันแบคทีเรีย และปกป้องแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ สามารถนำไปเติมแต่งในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ สี อุปกรณ์ทนไฟ เครื่องสำอางที่ปกป้องแสงแดด และอุปกรณ์ทางการแพทย์

ประโยชน์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์

1. ซิงค์ออกไซด์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาง พลาสติกและเซรามิก เพื่อใช้เพิ่มความทนทานและต้านทานต่อความร้อน
2. มักจะถูกผสมในเครื่องสำอางเพื่อปกป้องไม่ให้ผิวเกิดความเสียหาย
3. นำมาเป็นวัสดุใช้ต้านทานแบคทีเรียหรือระงับกลิ่นกาย
4. ถูกผสมในผลิตภัณฑ์สีเพื่อเป็นตัวเคลือบและป้องกันการเกิดแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โบรอน (Boron)



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของธาตุโบรอน [9]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของโบรอน

น้ำหนักอะตอม	10.811 amu
จุดหลอมเหลว	2300°C
จุดเดือด	2550°C
ความหนาแน่น	2.34 g/cm ³
รัศมีไอออน	41 pm
เลขออกซิเดชัน	+3

โบรอนเป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ ที่มีสัญลักษณ์คือ B และมีเลขอะตอมเป็น 5 โดยเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ในตารางธาตุ ซึ่งจัดเป็นธาตุกึ่งโลหะ โบรอนมักพบมากในแร่บอแรกซ์ และมี 2 ไอโซโทป สีของโบรอนแบบสัจฐานจะมีสีน้ำตาลและแบบเมทาทัลลิกจะมีสีดำ เป็นโลหะที่แข็งมากแต่ถ้าอยู่ในรูปของโบรอนบริสุทธิ์จะมีความเปราะมาก โบรอนนั้นจะนำไฟฟ้าไม่ดีในอุณหภูมิห้อง จะไม่พบเป็นธาตุอิสระในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์และสารประกอบเฮไลด์

ตารางที่ 2.3 ไอโซโทปของธาตุโบรอน

Isotope	Atomic mass	Natural abundance (%)
¹⁰ B	10.013	19.9
¹¹ B	11.009	80.1

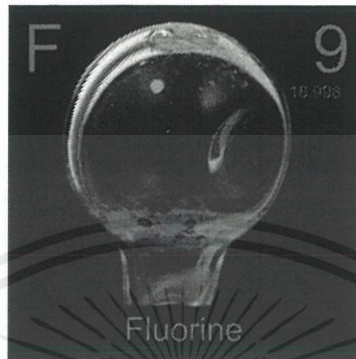
ประโยชน์ของธาตุโบรอน

1. ใช้ทำโลหะเจือสำหรับการใช้งานพิเศษ
2. เป็นตัวควบคุมนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์
3. เส้นใยของโบรอนใช้ผสมกับโลหะ ทำให้โลหะมีความเหนียวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้ผสมในเชื้อเพลิงขั้วจรวด
6. ผสมในโลหะเจือที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง
7. ผลิตเครื่องแก้วทดลองที่เรียกว่า Borocilicated glass

2.4 ฟลูออรีน (Fluorine)



รูปที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของธาตุฟลูออรีน [11]

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน

น้ำหนักอะตอม	18.998 amu
จุดหลอมเหลว	-219.62 °C
จุดเดือด	-188.14 °C
ความหนาแน่น	1.108 g/cm ³
รัศมีไอออน	134 pm
เลขออกซิเดชัน	-1

ฟลูออรีนเป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ ที่มีสัญลักษณ์เป็น F และมีเลขอะตอมเป็น 9 โดยเป็นธาตุในหมู่ 7 มักจะอยู่ในรูปของแก๊ส จัดเป็นอโลหะ เป็นธาตุที่เบาที่สุด และมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ทำให้ไม่พบฟลูออรีนรูปอิสระในธรรมชาติแต่จะพบอยู่ในรูปฟลูออไรด์ที่มีประจุลบ โดยฟลูออไรด์ไอออน (F⁻) ซึ่งมีขนาดไอออนใกล้เคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) จึงมักจะแทนที่กันได้ดีในแร่ธาตุ ฟลูออรีนพบมากบนเปลือกโลกในรูปของเป็นก๊าซเฉื่อย (Halogen) มีสีเหลืองอ่อน เป็นก๊าซที่ไวต่อปฏิกิริยา และไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้เป็นประจุบวกได้ ฟลูออรีนมีความอันตรายสูง จึงไม่ควรสัมผัสโดยตรงต้องใช้ภาชนะที่ปิดมิดชิดป้องกันการรั่วไหล ฟลูออรีนจะพบได้ในร่างกายของเรา เช่น กระดูกและฟัน แต่จะอยู่ในลักษณะของสารผสมที่เรียกว่า ฟลูออไรด์ (Fluoride)

ประโยชน์ของธาตุฟลูออรีน

1. อะตอมฟลูออรีนและโมเลกุลฟลูออรีนถูกใช้สำหรับการทำพลาสมาเอทชิง (Plasma etching) ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์
2. ใช้ในการผลิตพลาสติกที่ทนแรงได้ต่ำ เช่น เทฟลอน
3. ฟลูออไรด์ถูกผสมเข้าไปในยาสีฟัน เพื่อป้องกันฟันผุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน [13]

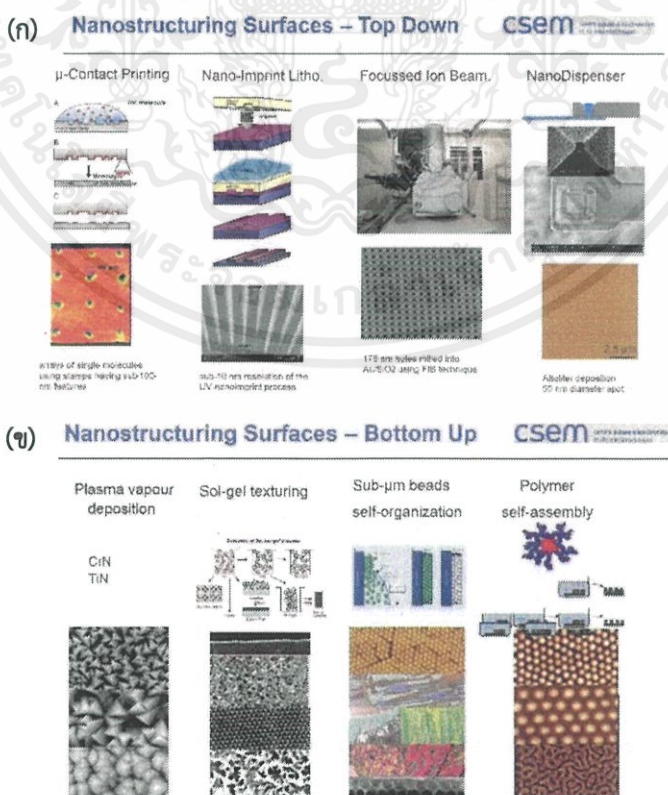
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเป็นการสังเคราะห์จากการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลให้เข้ากันขึ้นมาใหม่อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงทำให้วัสดุประเภทนี้มีโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบและมีประสิทธิภาพสูงสุด แบ่งออกได้ 2 กระบวนการ คือ

2.5.1 กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down Approach)

กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง เป็นกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์เพื่อตัด แบ่ง ย่อย หรือบดวัสดุที่มีขนาดใหญ่ในระดับไมโครเมตรให้มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในโครงสร้างระดับนาโนเมตร แต่ส่วนใหญ่แล้วนั้นจะได้ขนาดของวัสดุไม่ถึงระดับนาโนเมตรด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่ใช้ และเป็นกระบวนการที่มีความเสี่ยงในการที่อนุภาคจะเกิดการรวมตัวกันหลังจากทำการตัด แบ่ง ย่อย หรือบดเนื่องจากจะเกิดความร้อนภายในระบบจากการทำงานของเครื่องมือหรือเครื่องจักร เช่น โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography), การบดด้วยลูกบด (Milling)

2.5.2 กระบวนการสังเคราะห์ล่างสู่บน (Bottom-up approach)

กระบวนการสังเคราะห์ล่างสู่บน เป็นกระบวนการที่นำอะตอมหรือโมเลกุลมารวมกันให้เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ยังคงมีสมบัติเดิม ซึ่งเป็นกระบวนการที่เลียนแบบการสังเคราะห์ของธรรมชาติ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว ในสถานะแก๊สคือการใช้พลังงานทำให้สารในสถานะของแข็งเกิดการระเหยกลายเป็นไอระเหย แล้วอะตอมเกิดการควบแน่นเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขึ้นมาเป็นโครงสร้างตามที่ต้องการในระดับนาโนเมตร และในสถานะของเหลวจะอาศัยการตกตะกอนของอะตอมสารตั้งต้น โดยสามารถควบคุมขนาดหรือรูปร่างของอนุภาคได้ เช่น วิธีโซล-เจล, วิธีไพโรไลซิส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การตีพิมพ์ที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.4 รูปแบบของกระบวนการสังเคราะห์ที่แบบบนลงล่าง และล่างสู่บน [13]
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

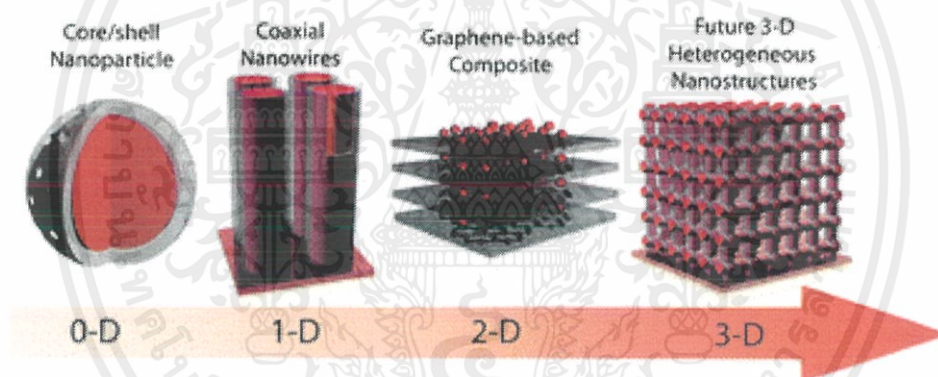
จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนสามารถที่จะแบ่งโครงสร้างลักษณะในระดับนาโนออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1) ศูนย์มิติ (Zero Dimensional) เป็นโครงสร้างที่ถูกจำกัดทั้ง 3 ทิศทาง ทั้งทิศทางในแกน x, y และ z ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอนุภาค เช่น ควอนตัมดอท (Quantum dot) คอร์เชลล์ (Core shell) ฟูลเลอร์รีน (Fullerenes)

2) หนึ่งมิติ (One Dimensional) เป็นโครงสร้างที่ถูกจำกัด 2 ทิศทาง คือทิศทางในแกน x และ y ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร และในแกน z จะมีความยาวอยู่ในระดับอื่นๆ เช่น ไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบเป็นท่อที่กลวงหรือไม่กลวงก็ได้ เช่น ลวดนาโน (Nanowire) แท่งนาโน (Nanorod) ท่อนาโน (Nanotube)

3) สองมิติ (Two Dimensional) เป็นโครงสร้างที่ถูกจำกัด 1 ทิศทาง คือ แกน x ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร และในแกน y และ z จะมีอยู่ในระดับอื่นๆ ได้แก่ ไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร เช่น ฟิล์มบางในระดับนาโน, แผ่นแกรฟีน

4) สามมิติ (Three Dimensional) เป็นโครงสร้างที่ไม่มีทิศทางใดถูกจำกัดให้อยู่ในระดับนาโนเมตร อาจหมายถึงการที่โครงสร้างในรูปแบบ 0 มิติ 1 มิติหรือ 2 มิติ มารวมกันเป็นวัสดุขนาดใหญ่ที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เช่น ผลึกคริสตัล (Polycrystals)



รูปที่ 2.5 รูปร่างวัสดุในระดับนาโน 0 มิติ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ [14]

2.6 กระบวนการตกตะกอน (Precipitation) [15]

การตกตะกอนประกอบด้วยของแข็งที่เป็นอนุภาคในสารละลายที่เกิดปฏิกิริยาเคมี อนุภาคของแข็งนี้จะตกลงด้านล่างตามความหนาแน่นของตัวมันทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างสารละลายและของแข็งที่เป็นอนุภาค เช่น สารละลายคอลลอยด์ ขนาดอนุภาคของตะกอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวถูกผสมในสารละลาย ตะกอนเกิดขึ้นจากกระบวนการนิวคลีเอชัน (Nucleation) ของไอออน อะตอมหรือโมเลกุลมารวมกัน เกิดเป็นนิวคลีไอ (Nuclei) และเมื่อนิวคลีไอโตจะกลายเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) และรวมกันเป็นอนุภาคที่เป็นการตกตะกอนขึ้น การตกตะกอนนำไปสู่วิธีการสังเคราะห์อนุภาคที่เรียกว่า การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

การตกตะกอนร่วมเป็นกระบวนการที่เกิดจากสารประกอบอื่นที่มากกว่าหนึ่งชนิดเกิดการแตกตัวของสารประกอบแล้วเกิดการรวมตัวกันได้เป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่มีเฟสใดเฟสหนึ่งที่

เกิดเป็นของแข็งและอีกเฟสเป็นของเหลว ดังเช่นในสมการที่ 2.2 จะเห็นว่ามีสารประกอบที่

ไม่ว่องไวใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าหนึ่งชนิดเข้าด้วยกัน คือ เลท(II) ไนเตรต ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) และโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) เมื่อเกิดการแตกตัวและรวมตัวกันของไอออนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนของแข็งก็คือ เลท(II) ไอโอไดด์ (PbI_2) และโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ที่เป็นสารละลาย จากกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะสามารถปรับปรุงสมบัติของสารได้โดยการทำให้เกิดตำหนิในโครงสร้างหลักโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลักด้วยกระบวนการเจือ ซึ่งไอออนที่มากจากการเจือนั้นจะสามารถเข้าไปแทรกหรือแทนที่ตำแหน่งแลตทิตในโครงสร้างหลักได้จากกระบวนการเกิดเป็นนิวคลีโอและมีการรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่เป็นของแข็งคือตะกอน โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเจือโบรอนและฟลูออรีนเพื่อให้เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของซิงค์และออกซิเจนในซิงค์ออกไซด์แลตทิต

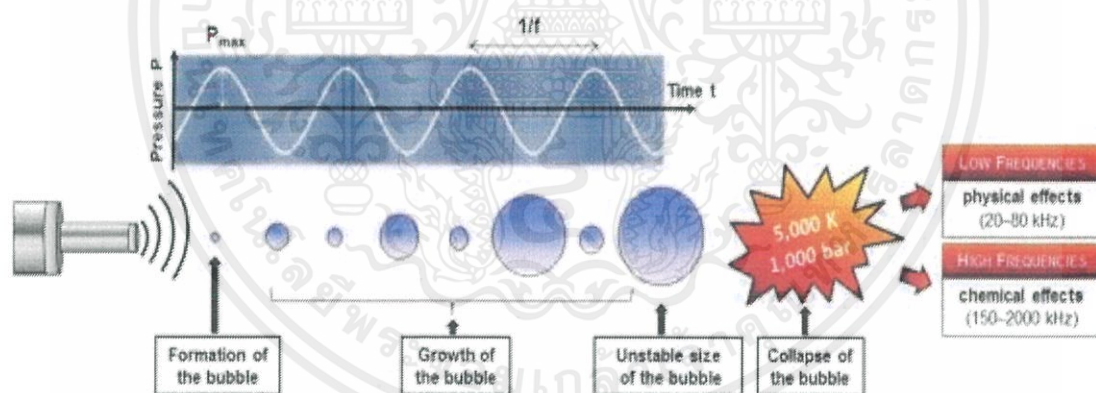
สมการแสดงการเกิดการตกตะกอนร่วม



เช่น การตกตะกอนของสารละลายตะกั่ว



2.7 กระบวนการโซโนเคมี (Sonochemistry)

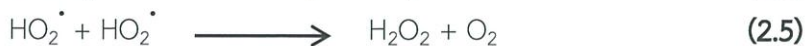
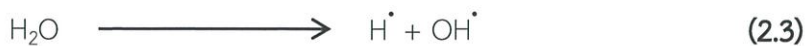


รูปที่ 2.6 การเกิดและสลายของฟองอากาศควิเดชั่น เมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน [16]

กระบวนการโซโนเคมี คือ กระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางกลจากการให้พลังงานคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) แก่ระบบ ทำให้สารละลายถูกกระตุ้นอย่างเฉพาะที่เกิดเป็นช่องว่างฟองอากาศภายในสารละลาย แล้วเมื่อการบีบอัดและคลายตัวของคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของเหลวที่มีฟองอากาศอยู่เกิดเป็นพลังงานขึ้นภายในช่องว่างของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเกิดการขยายตัวจากแรงดันและเกิดพลังงานที่สูงจนมีการแตกออกเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อะคูสติค ควิเดชั่น (Acoustic Cavitation) โดยกระบวนการโซโนเคมีเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมความเป็นผลึกได้ในการสังเคราะห์โครงสร้างอสัณฐานของโลหะและโลหะอัลลอยด์ การใช้กระบวนการโซโนเคมีเป็นวิธีที่มีราคาต่ำและรวดเร็ว [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

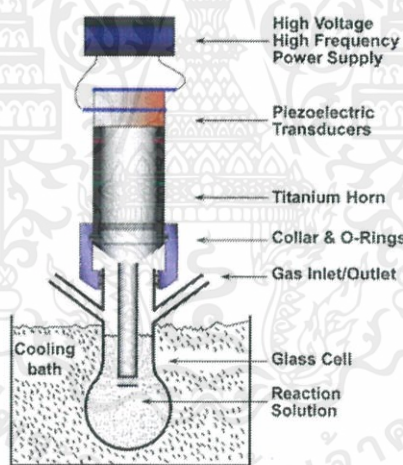
สมการแสดงการเกิดโซโนเคมี



กระบวนการโซโนเคมีใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า อัลตราโซนิก ฮอร์น (Ultrasonic horn) มีลักษณะเป็นอ่างและมีหัวโพรบ (Probe) ที่ให้พลังงานสูงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณคลื่นโดยใช้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducers) และทำให้เกิดพลังงานอะคูสติก (Acoustic energy) ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว มีอยู่ 2 แบบ [18] คือ

1. คอนเวนชันนอล ฮอร์น (Conventional horn) เป็นรูปแบบที่ใช้ทดลองในระดับสเกลห้องทดลอง ให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่สูงและให้พลังงานที่ไม่สูงมากจากการที่ปลายฮอร์นมีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการจำกัดบริเวณของการเกิดควิเตชัน

2. บาร์เบลล์ ฮอร์น (Barbell horn) เป็นรูปแบบที่มีขนาดของปลายฮอร์นใหญ่กว่าแบบคอนเวนชันนอล ฮอร์น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่สูงและให้พลังงานที่สูง



รูปที่ 2.7 รูปแบบของเครื่องโซโนเคมี แบบอัลตราโซนิก ฮอร์น ที่มีการใช้งานแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [19]

2.7.1 อะคูสติก ควิเตชัน (Acoustic Cavitation) [20]

คลื่นอะคูสติก (Acoustic waves) ในของเหลวทำให้เกิดควิเตชันหรือช่องว่างในฟองอากาศ โดยฟองอากาศควิเตชันนั้นจะมีการโตและสลายไปซ้ำๆ เมื่อมีการตอบสนองกับคลื่นอะคูสติก เป็นกระบวนการที่พลังงานคลื่นเหนือเสียงทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางกล โดยฟองอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือชนกันภายในตัวกลางที่เป็นของเหลวเกิดเป็นไมโครเจ็ต (Microjet) ทำให้มีการเกิดการบีบตัวแล้วขยายตัวของฟองอากาศจากการถูกกระตุ้นทางกลเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลแล้วเกิดการสลายตัวหรือแตกออกของฟองอากาศ การแพร่ออกไปของคลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานที่สูงกว่าพลังงานของโมเลกุลของเหลวจะทำให้เกิดการขยายและการบีบอัดตามความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่น การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

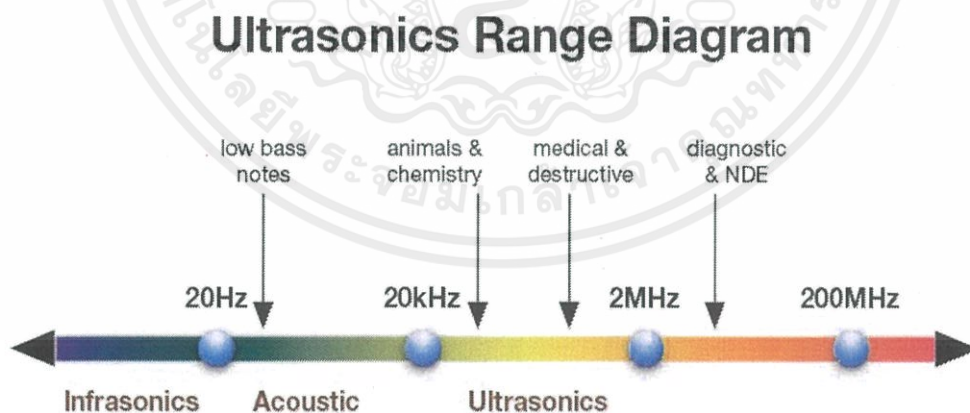
ในตัวกลางที่เป็นของเหลวเกิดการสลายตัวหรือแตกออกของฟองอากาศจากการชนกันอย่างรุนแรงภายในของเหลว การสลายตัวหรือแตกออกของฟองอากาศเป็นปรากฏการณ์ที่มีการกระตุ้นผ่านของเหลวด้วยพลังงานของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต โดยมีการสลายตัวจะเกิดเป็นฮอตสปอต (Hotspot) ภายในฟองอากาศจากการสะสมพลังงานและเกิดความร้อนประมาณ 5000 องศาเซลวิน ความดันประมาณ 2000 บรรยากาศ ชนิดของปฏิกิริยาของฟองอากาศควิชั่นจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงตัวกลางของของเหลว ได้แก่

1. ปฏิกิริยาของเฟสของเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยภายในของเหลวจะเกิดฟองอากาศอยู่รอบๆที่มีการแตกตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเป็นแรงเฉือนซึ่งแรงเฉือนนี้จะทำให้เกิดผลทางเชิงกลและภายในฟองอากาศตัวมันเองจะมีอุณหภูมิและความดันที่สูงจนทำให้ตัวมันเองสามารถแตกออกจนเกิดเป็นผลทางเคมีได้

2. ปฏิกิริยาที่เกิดใกล้กับพื้นผิวของของแข็ง เป็นการแตกของฟองอากาศในของเหลวโดยการแตกออกของฟองอากาศจะอยู่บริเวณใกล้กับพื้นผิวของของแข็ง ความแตกต่างของความต้านทานระหว่างในของเหลวและที่พื้นผิวของแข็งทำให้เกิดการไหลของของเหลวเกิดเป็นไมโครเจ็ทชนกับพื้นผิวของของแข็ง ทำให้เกิดการเพิ่มของการถ่ายโอนมวลหรือพลังงาน (Mass or heat transfer) ที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งนำไปสู่การนำเอาคลื่นเหนือเสียงมาทำความสะอาดอุปกรณ์และการกัดกร่อน

3. ปฏิกิริยาของเฟสของแข็ง-ของเหลวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการเกิดอะคูสติก ควิเตชันของของแข็งในของเหลว ที่พื้นผิวของอนุภาคสามารถที่จะทำตัวเหมือนนิวเคลียสที่กลายเป็นฟองอากาศทำให้เกิดช็อคเวฟ (Shock wave) ที่สามารถแบ่งอนุภาคหรือแย่งอนุภาคออกจากกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการกร่อนที่บริเวณพื้นผิวหรือเป็นการลดขนาดของอนุภาคได้

2.7.2 คลื่นเหนือเสียง



รูปที่ 2.8 ช่วงของคลื่นเหนือเสียง [21]

คลื่นเหนือเสียง เป็นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ต เรียกว่า เสียงอัลตราโซนิก หรืออัลตราซาวด์ (Ultrasound) มีปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การเลี้ยวเบน ทำให้เกิดพลังงานเคมีและมีการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านงานอุตสาหกรรมและทางการแพทย์ เช่น ทางด้านอุตสาหกรรมในการเชื่อมพลาสติกจะใช้การส่งความถี่สูงเข้าไปในบริเวณผิวสัมผัสที่มีการสัมผัสกัน ความดันและความถี่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดพลังงานความร้อนจากการเสียดทานทำให้พื้นผิวทั้งสองนั้นเชื่อมกันและมีความแข็งแรง ในทางการแพทย์จะนำการเกิดคลื่นเหนือเสียงมาใช้ประโยชน์ในเรื่องของการทำความสะอาดอุปกรณ์ และใช้ในการวินิจฉัยโรคซึ่งดีกว่ารังสีเอกซ์ เช่น ตรวจการทำงานของลิ้นหัวใจ ตรวจมดลูก ตรวจเนื้อ งอก ตับ ม้าม และมันสมอง ที่เรียกว่า วิอีโคเอนเซฟากราฟี (Echoencephagraphy) นอกจากนี้ยัง มีการส่งสัญญาณอัลตราโซนิก ดูการหักเห การสะท้อนของคลื่นได้ เช่น โซนาร์ ซึ่งการที่เราใช้คลื่น เหนือเสียงเพราะมีความยาวคลื่นที่มีขนาดสั้น สามารถตรวจหาวัสดุขนาดเล็กๆ ได้ดีกว่าคลื่นชนิดอื่นๆ การเกิดคลื่นเหนือเสียงในของเหลวนั้นจะทำให้เกิดสิ่งสำคัญ คือ ฟองอากาศ (Bubble) ตัวฟองอากาศ จะถูกสร้างขึ้นด้วยการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือน้ำเกิดเป็น ช่องว่างหรือควิเตชัน(Cavitation) ในของเหลว ควิเตชันที่เห็นได้ในชีวิตประจำวันคือ การหมุนของ ใบพัดเรือในน้ำ [22]



รูปที่ 2.9 ลักษณะของควิเตชันที่เกิดขึ้นจากใบพัด [22]

วิธีการใช้อัลตราโซนิก เรียกว่า อัลตราโซโนกราฟี (Ultrasonography) คือ การเปลี่ยนพลังงาน ไฟฟ้าหรือพลังงานกลให้เป็นพลังงานคลื่นเหนือเสียงโดยใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) คลื่นเหนือ เสียงเมื่อผ่านเข้าสู่เนื้อสารแล้วเกิดการสะท้อนของพื้นผิวที่อยู่ชิดกันแต่มีความหนาแน่นต่างกัน คลื่น สะท้อนถูกจับด้วยทรานสดิวเซอร์และถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปของความต่างศักย์ที่มี ความถี่สูงเพื่อถูกขยายขึ้นแสดงออกทางจอออสซิลโลสโคป (Oscillator Scope)

ทรานสดิวเซอร์ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ

1. แก๊สไดร์ฟเวน ทรานสดิวเซอร์ (Gas-Driven Transducers) เป็นรูปแบบการทำงานคล้าย กับนกหวีดที่ให้ความถี่สูง โดยอากาศจะถูกพ่นผ่านช่องว่างที่มีการสั่นทำให้มีความถี่ออกมา ถ้าช่องว่าง ที่มีการสั่นมีขนาดที่เปลี่ยนไปก็จะทำให้ความถี่เปลี่ยนไป อุปกรณ์ที่ทำงานในลักษณะนี้คือเครื่องฉีด ของเหลว โดยอากาศจะถูกดันเข้าไปประกบกับของเหลวในช่องว่าง ทำให้เกิดควิเตชันได้หยดน้ำ ออกมาเป็นที่มีแรงดันสูง

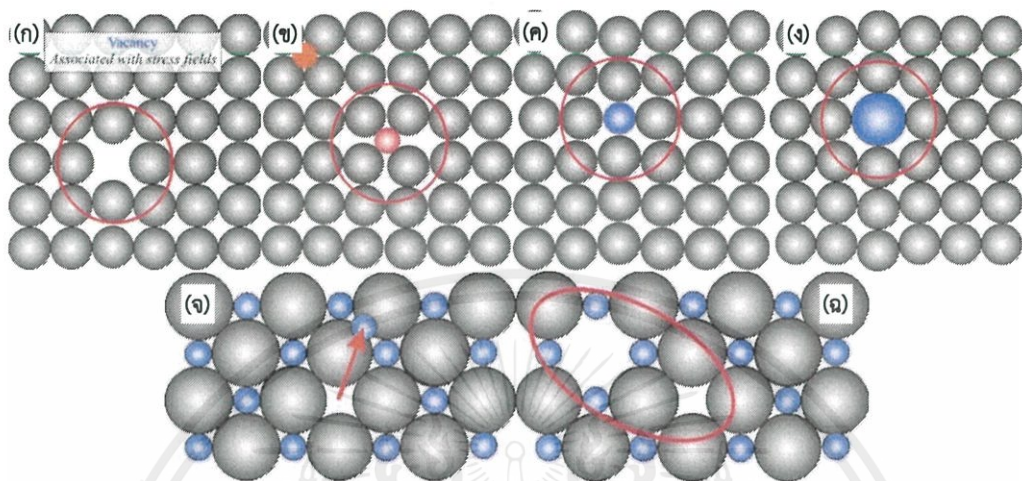
2. ลิปควิซไดร์ฟเวน ทรานสดิวเตอร์ (Liquid-Driven Transducers) เป็นการทำให้เกิดควิ เตชัน ด้วยของเหลวที่มีความเร็วสูงและผ่านใบพัด เกิดเป็นอะคูสติค ควิเตชันแบบไฮโมจีนัส

3. อิเล็กโตรแมคคานิคอล ทรานสดิวเซอร์ (Electromechanical Transducers) แบ่งออกได้ เป็น 2 ประเภท

- 3.1 แมกนีโตเรสตีคทีฟ ทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducers) เป็นรูปแบบที่ เอกสารนี้เป็นเอ ใช้สนามแม่เหล็กให้เกิดพลังงานคลื่นเหนือเสียงที่สุ่ม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เปียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เป็นการใช้เซรามิก เพื่อให้เกิดการสั้นโดยการให้กระแสไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะใช้ในวิธีโซโนเคมี

2.8 กระบวนการเจือ



รูปที่ 2.10 (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง (ข) ความบกพร่องแบบแทรก

(ค) ความบกพร่องแบบแทนที่ของอะตอมที่แทนที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของอะตอมเดิม

(ง) ความบกพร่องแบบแทนที่ของอะตอมที่แทนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอะตอมเดิม

(จ) ความบกพร่องแบบเฟรนเกลและ (ฉ) ความบกพร่องแบบช็อคตัด [25]

การเจือ (Doping) คือ กระบวนการเพิ่มหรือเติมอะตอมชนิดอื่นเข้าไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์นั้นๆ ทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ การเจือเพียงเล็กน้อยจะเป็นการทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารนั้นๆ เช่น แถบพลังงานที่ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงเปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้ได้มีการเจืออะตอมชนิดอื่นเข้าไปเพื่อแทรกหรือแทนที่ตำแหน่งอะตอมของสารเดิมทำให้เกิดเป็นความบกพร่องในลักษณะจุด (Point defect)

ความบกพร่องในลักษณะจุด สามารถเกิดจากสาเหตุ ดังนี้

1. ช่องว่าง (Vacancy atom) เป็นความบกพร่องที่ตำแหน่งของแลตทิต ซึ่งมีอะตอมที่แลตทิตนั้นหายไปคือไม่มีอะตอมใดๆอยู่ที่บริเวณนั้น ซึ่งทำให้เกิดความเครียด อะตอมข้างเคียงสามารถเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่เพื่อให้เกิดสมดุลเพื่อทำให้แลตทิตมีการบิดเบี้ยวไปดังรูปที่ 2.6(ก)

2. การแทรก (Interstitial atom) เป็นความบกพร่องที่มีอะตอมชนิดอื่นหรือตัวมันเองเข้ามาอยู่ที่บริเวณช่องว่าง (Void) ระหว่างแลตทิต ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทรกมีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าอะตอมเจ้าบ้านได้ ทำให้เกิดแรงบีบและแรงเฉือนที่แลตทิตรอบๆเกิดการบิดเบี้ยวไปดังรูปที่ 2.6(ข)

3. การแทนที่ (Substitutional atom) เป็นความบกพร่องที่มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมเดิม ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทนที่นั้นมีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าอะตอมเจ้าบ้านได้ ทำให้เกิดแรงบีบและแรงเฉือนที่แลตทิตรอบๆเกิดการบิดเบี้ยวไปดังรูปที่ 2.6(ค)-(ง)

4. ตำแหน่งแบบเฟรนเกล (Frenkel defect) เป็นความบกพร่องของอะตอมที่มีประจุที่เรียกว่าไอออน (Ion) เมื่อไอออนเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งเดิมไปอยู่ที่ช่องว่างระหว่างแลตทิตทำให้เกิด

เป็นช่องว่างที่บริเวณตำแหน่งไอออนเดิม ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแลตทิต แต่ประจุภายในยังคงสม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดุลของไอออนอยู่ดังรูปที่ 2.6(จ)

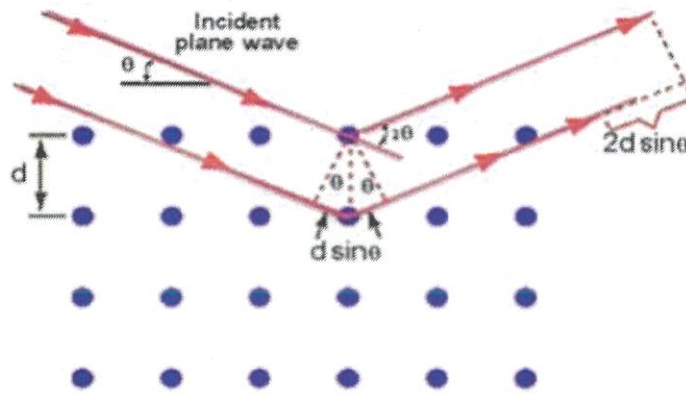
5. ตำหนิแบบช็อตต์กี้ (Schottky defect) เป็นความบกพร่องของประจุไอออนเช่นเดียวกับตำหนิแบบเฟรนเกล แต่ไอออนนั้นมีการเคลื่อนออกไปทั้งไอออนที่เป็นประจุลบและไอออนที่เป็นประจุบวกทำให้เกิดเป็นช่องว่างของแลตทิซ 2 บริเวณ และยังคงสมดุลของไอออนอยู่ดังรูปที่ 2.6(ฉ)

อนุภาคซิงค์ออกไซด์มีความเป็นสารกึ่งตัวนำในตัวเป็นชนิด-เออน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเจือสารที่ทำให้สารมีพาหะข้างมากที่เพิ่มขึ้น โดยสารที่เจือนั้นมีขนาดของไอออนที่เล็กกว่าไอออนของซิงค์และใหญ่กว่าไอออนของออกซิเจน ทำให้ไอออนจะไปแทนที่ไอออนของซิงค์และไอออนของออกซิเจนได้

2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและวิเคราะห์

2.9.1 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีรวดเร็วโดยใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเฟสที่เป็นผลึกและวิเคราะห์วัสดุที่มีพื้นเรียบ เนื้อเดียวกันและเป็นของแข็ง สามารถใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกและช่องว่างของอะตอม จากการค้นพบว่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับช่องว่างระหว่างแลตทิซของผลึกแลตทิซ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานโดยมุมของการสแกนจะเป็น 2θ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันจากช่องว่าง (d-spacing) ของแลตทิซที่เป็นค่าเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดตามรูปแบบดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากค่าของการเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสาร ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารได้ถึงแม้ว่าสารนั้นจะสุทธเคมีเดียวกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้ออกมาจะสามารถนำมาวิเคราะห์หาความเป็นผลึกของสาร วัดความบริสุทธิ์ของสาร ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกและความเค้นของสารประกอบ ใช้หาทิศทางของเกรนในหลายๆผลึก (Polycrystalline) อีกทั้งยังหาความหนาของฟิล์มได้ด้วยรังสีจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือหาองค์ประกอบที่เป็นผลึกอสัณฐาน (Amorphous) ได้ เนื่องจากสารประเภทนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจสามารถคำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็นผลึกอสัณฐานในตัวอย่างได้ว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ โดยการเปรียบเทียบปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน เป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากในการเตรียมและใช้ปริมาณของสารที่น้อยรวมถึงให้ข้อมูลที่รวดเร็ว [27]



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเมื่อตกกระทบกับแลตทิซ [28]

สามารถหาความกว้างของช่องว่างระหว่างแลตทิซได้จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg 's Law คือ

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.6)$$

โดยที่ λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

n แทน ลำดับการสะท้อน

d_{hkl} แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

และสามารถหาขนาดของผลึกในโมเลกุลในระดับนาโนเมตรได้จากสมการของ Scherrer equation

$$D = \frac{k\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (2.7)$$

โดยที่ D = ขนาดของผลึก

λ = ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ในที่นี้เป็นธาตุคอปเปอร์ = 0.154 นาโนเมตร

β = Full Width Half Maximum ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค

θ = Bragg 's angle [29]

2.9.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสงโหมตตรวจวัดการสะท้อนของแสง (UV-Visible Diffuse Reflectance spectroscopy)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับหาขอบการดูดกลืนหรือการทะลุผ่านของสารในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร ของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบลงบนพื้นผิวของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงหรือฟิล์มด้วยความที่พื้นผิวของสารตัวอย่างมีอนุภาคหลากหลายรูปทรง ทำให้แสงบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับไปยังตัวรับแสงหรือสะท้อนเข้าพื้นผิวของอนุภาคแล้วเกิดการหักเหกลับไปยังตัวรับแสงดังรูปที่ 2.15 จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นจะสามารถนำมาหาขอบการดูดกลืนหรือช่องว่างของแถบพลังงานได้จากความสัมพันธ์ที่เรียกว่า ฟังก์ชัน K-M ($f(R_\infty)$) ที่ได้จากสมการ Kubelka-Munk

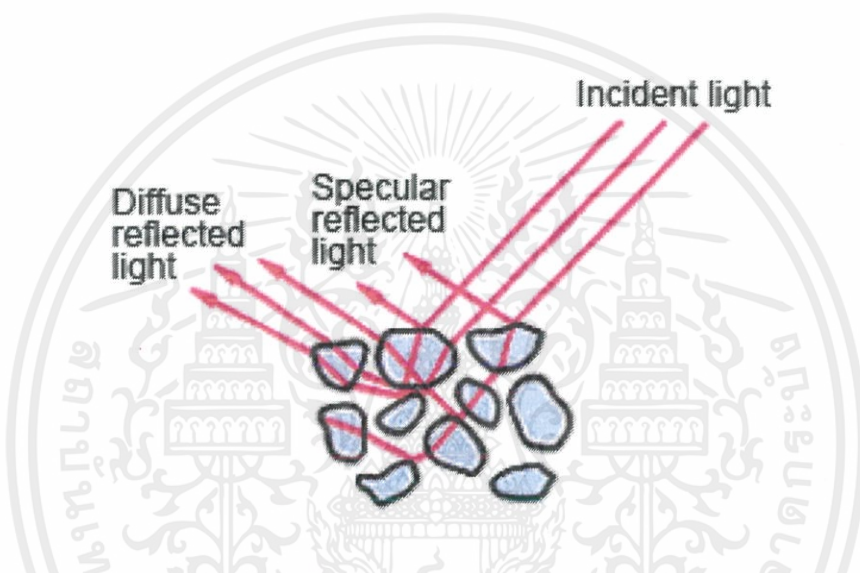
สมการความสัมพันธ์ของ Kubelka-Munk

$$f(R_\infty)^2 = \frac{(1-R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{k}{s} \quad (2.8)$$

เมื่อ R = ค่าการสะท้อนของแสง

k = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

S = สัมประสิทธิ์การกระเจิง



รูปที่ 2.12 รูปแบบการสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบพื้นผิวตัวอย่างที่เป็นผง [30]

2.9.3 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมากโดยใช้กำลังขยายที่สูง โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงทำให้ได้ภาพที่มีกำลังขยายสูง เกิดเป็นความสามารถในการแยกที่ชัดเจนเนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีความสามารถในการแยกวัตถุได้มาก 100,000 เท่า ลำอิเล็กตรอนลงไปได้ลึกถึง 100 เท่าของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร

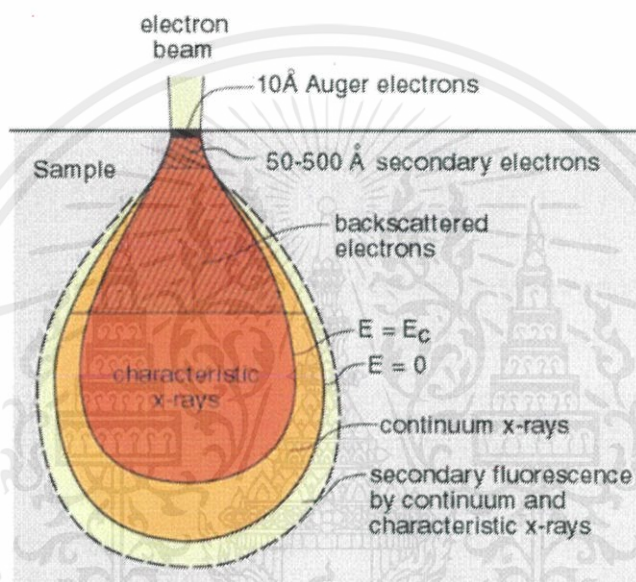
ข้อมูลที่ได้จะเกิดจากอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยอิเล็กตรอนจะเกิดจากขดลวดทังสเตนที่ได้รับพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิหลุดออกจากขดลวด แล้วถูกควบคุมทิศทางด้วยสนามแม่เหล็ก ทำให้วิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงาน เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน [31] แบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้พื้นผิว ไม่ต้องใช้พลังงานสูงก็สามารถที่จะหลุดออกได้ บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาชั้นปริญญาตรีที่ขอใช้ห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาการเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ภายนอกได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากภาควิชาการเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อิเล็กตรอนโวลต์ การสร้างภาพด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมินั้น จำนวนของอิเล็กตรอนที่ไปกระทบกับตัวตรวจจับจะมีผลต่อความคมชัดของภาพ ความละเอียดที่ได้ประมาณ 3.5 นาโนเมตร

- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิชนกับชิ้นงาน แล้วเกิดการกระเจิงกลับ ค่าพลังงานที่ได้จะมาจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ โดยค่าพลังงานจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น การตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุ (Energy Dispersive Spectrometry : EDS)

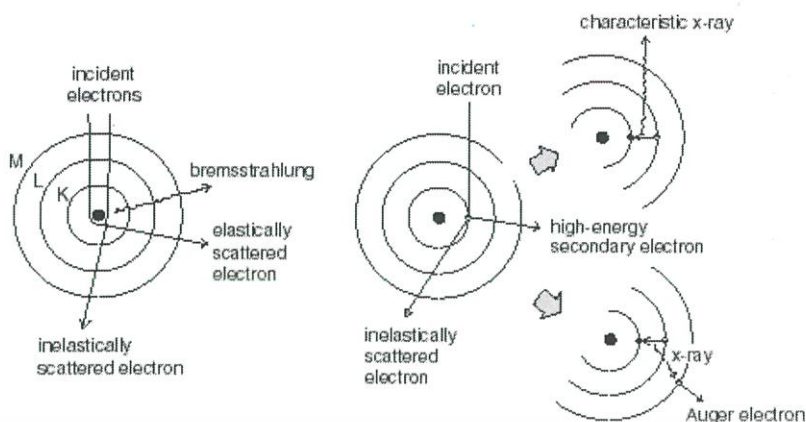


รูปที่ 2.13 ระดับของอิเล็กตรอนที่สามารถหลุดได้เมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอ [32]

2.9.4 เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการวัดองค์ประกอบของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDX)

เป็นเครื่องมือใช้วิเคราะห์ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยจะรับข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มาสร้างเป็นแผนภาพหรือกราฟ คือ รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงานสูงวิ่งชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นในสุด (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่แล้วมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



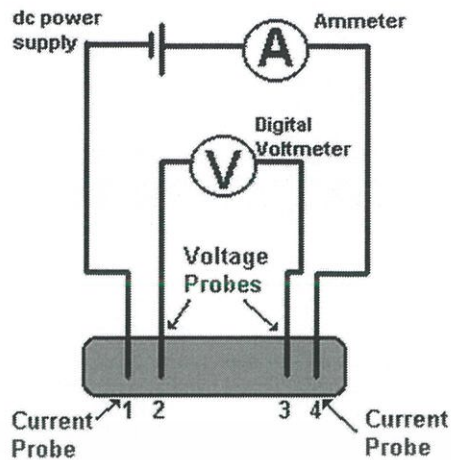
รูปที่ 2.14 การหลุดออกของอิเล็กตรอน และมีการตกมาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดไป [33]

2.9.5 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วไฟฟ้าสี่จุด (Four point probe)

เป็นการตรวจวัดความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุชนิดสารกึ่งตัวนำ โดยจะมีเข็มทั้งหมด 4 เข็ม ซึ่งเข็ม 1 คู่ที่จะจ่ายกระแสให้กับชิ้นงาน และอีก 1 คู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงาน เป็นวิธีการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าที่แพร่หลายจากการที่ไม่ต้องสร้างรอยต่อโอห์มมิกให้กับชิ้นงานและไม่จำกัดรูปร่างหรือขนาดของชิ้นงาน เข็มทั้ง 4 จะจุดด้วยระยะห่างที่เท่ากัน โดยเข็มที่ 1 จะปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปผ่านตัวชิ้นงานไปยังเข็มที่ 4 ทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมเข็มที่ 2 และ 3 ดังรูปที่ 2.15 สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้จากสูตร

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (2.9)$$

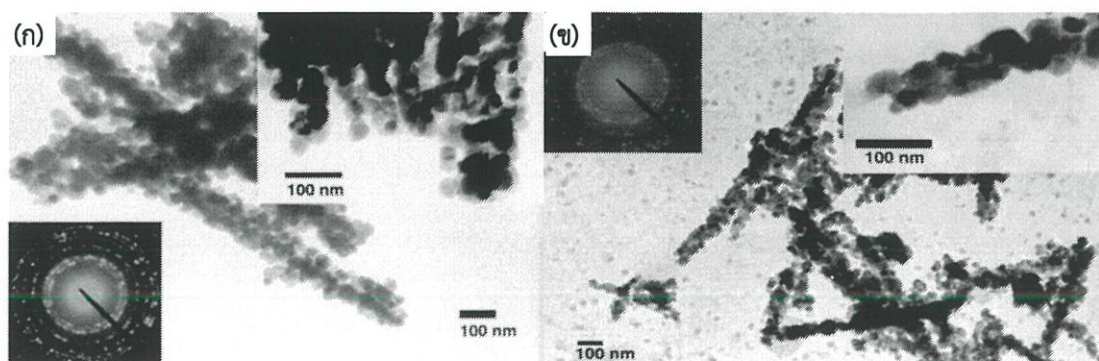
โดยที่ ρ = ความต้านทานทางไฟฟ้า
 S = ระยะห่างระหว่างหัวโพรบ
 V = ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหัวโพรบ
 I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าหัวโพรบ



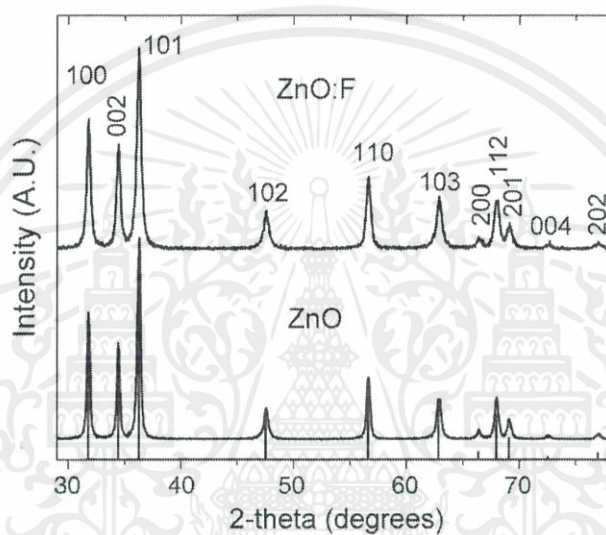
รูปที่ 2.15 แผนภาพของหัววัด 4 จุดของการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า [34]

2.10 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

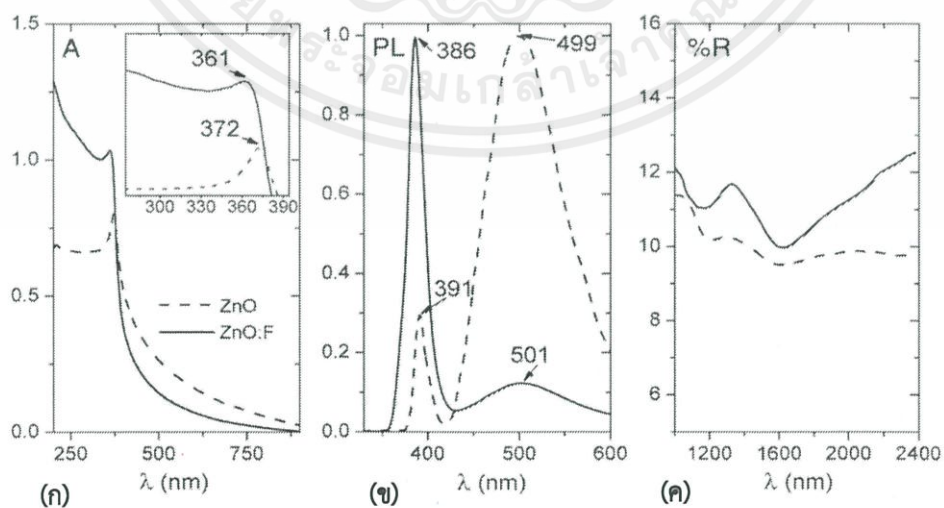
ในปี ค.ศ. 2010 R. Gonzalez-Hernandez และคณะ [35] ได้ศึกษาสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือฟลูออรีน 5 เปอร์เซ็นต์อะตอมและไม่เจือ ด้วยวิธีการตกตะกอน จากรูป 2.16 TEM พบว่าการใช้โหมด Selected area electron diffraction จะบอกโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบ Hexagonal (Wurtzite) โดยจากภาพ TEM โหมดสว่าง จะเห็นว่าซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือฟลูออรีนเข้าไปทำให้มีขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ประมาณ 25 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD จะเป็นการยืนยันว่าซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบ Hexagonal ดังรูปที่ 2.17 เช่นเดียวกัน และสามารถคำนวณขนาดของอนุภาคเมื่อมีการเจือฟลูออรีนเข้าไปมีขนาดที่เล็กกว่าไม่มีการเจือประมาณ 22 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่างการวิเคราะห์ด้วย TEM และ XRD การวิเคราะห์การดูดกลืน จากรูปที่ 2.18(ก) เมื่อมีการเจือฟลูออรีนเข้าไปทำให้เกิดการเลื่อนของพีคการดูดกลืนไปฝั่งที่มีพลังงานเพิ่มขึ้น (Blue shift) จากการวิเคราะห์อัตรลักษณ์ของธาตุด้วย Photoluminescence spectra จากรูปที่ 2.18(ข) มีการปลดปล่อยพลังงานช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อมีการเจือฟลูออรีนเข้าไปทำให้มีการเลื่อนของพีคไปฝั่งที่มีพลังงานสูงขึ้น จากการที่มีการปลดปล่อยใกล้กับขอบการดูดกลืนแสดงว่ามีการรวมกันของอิเล็กตรอนอิสระของซิงค์ออกไซด์ที่เจือและไม่เจือฟลูออรีน จากพีคที่กว้างและสูงของซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือนั้นเกิดจากความเข้มข้นของช่องว่างของออกซิเจนอะตอมที่มากและในซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือฟลูออรีนมีพีคที่ต่ำกว่าจากการที่อะตอมของฟลูออรีนเข้าไปแทนที่ จากรูปที่ 2.18(ค) การวัดการสะท้อนในช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR reflectance spectra) มีค่าการสะท้อนในช่วงใกล้อินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือฟลูออรีน เนื่องจากการเจือฟลูออรีนทำให้เกิดเป็นพาหะที่เพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการแทนที่ของอะตอมฟลูออรีนในตำแหน่งของออกซิเจน



รูปที่ 2.16 ลักษณะรูปร่างของซิงค์ออกไซด์ (ก) การเจือและ (ข) เจือฟลูออรีนด้วย TEM



รูปที่ 2.17 กราฟ XRD ของซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือและเจือฟลูออรีน

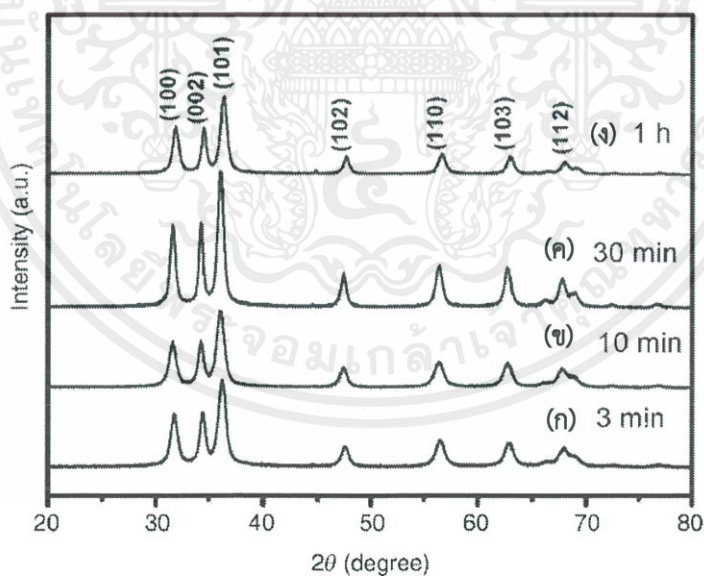


รูปที่ 2.18 (ก) กราฟการดูดกลืน (ข) PL spectra (ค) NIR reflectance spectra

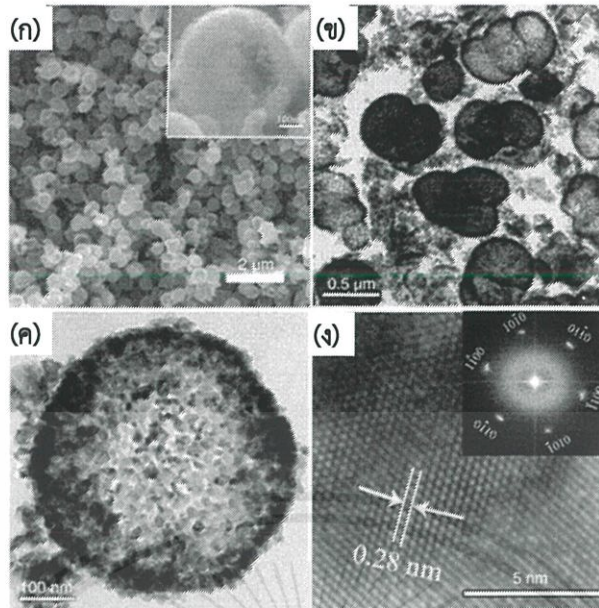
ของซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือและเจือฟลูออรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

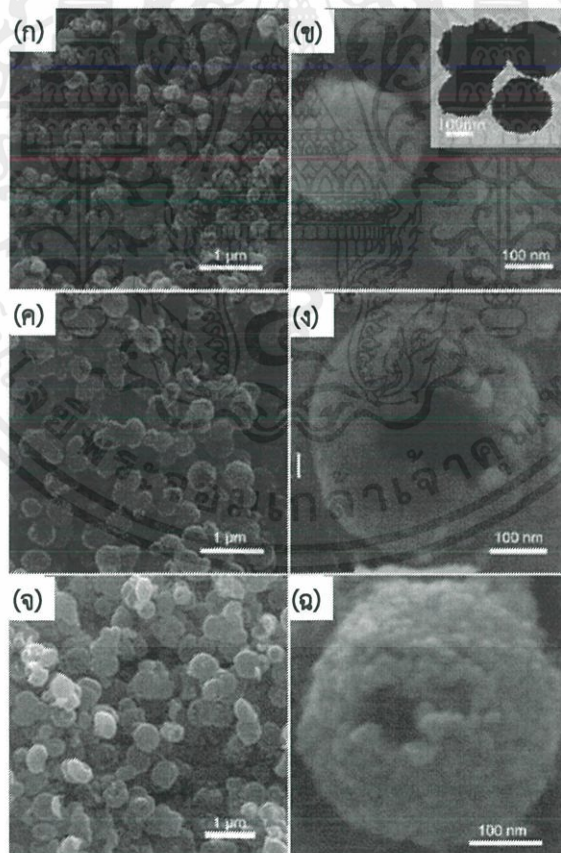
ในปีค.ศ. 2010 Chun-Xiu He และคณะ [36] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ชั้นซิงค์ออกไซด์รูกลวงด้วยวิธีโซโนเคมีเมื่อให้เวลาในการสังเคราะห์เป็น 3, 10, 30 และ 60 นาที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อม (Dye-Sensitized Solar Cells : DSSCs) ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD เมื่อให้เวลาในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน ได้โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบ Hexagonal (Wurtzite) ในทุกช่วงเวลา ดังรูปที่ 2.19 ภาพ SEM ดังรูปที่ 2.20(ก) แสดงให้เห็นถึงอนุภาคซิงค์ออกไซด์รูกลวง และรูปที่ 2.20(ข) ภาพ TEM ที่ยืนยันว่ารูกลวงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีขนาดประมาณ 15 นาโนเมตร รูปที่ 2.21 แสดงขนาดของกลุ่มซิงค์ออกไซด์ที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ที่เวลา 10 นาทีจะทำให้เกิดรูกลวงขึ้นและให้อนุภาคมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.22 แสดงการเกิดเป็นรูกลวงบนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ความหนาของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกลงบนขั้วแอโนดมีความหนาเพิ่มขึ้นจะช่วยทำให้ความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นจาก 6.90 mAcm^{-2} เป็น 9.56 mAcm^{-2} เมื่อมีความหนาเพิ่มจาก 4.4 เป็น 9.1 ไมโครเมตร และมีค่าลดลงเมื่อมีความหนาเป็น 18.1 ไมโครเมตร เนื่องจากเกิดความพร่องจำนวนมากและมีการรวมตัวพาหะได้ง่าย ฟิล์มที่มีความหนา 11.4 ไมโครเมตร จะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด จากการที่มีรูกลวงทำให้มีการดูดซับสีย้อมได้ง่ายกว่า การวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการสะท้อนแสง รูปที่ 2.23(ก) ยังไม่ทำการย้อมด้วยสีย้อม อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์รูกลวงจะให้การสะท้อนที่สูงกว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และรูปที่ 2.23(ข) ทำการย้อมด้วยสีย้อมมีการดูดกลืนแสงของสีย้อมด้วยและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์รูกลวงจะให้การสะท้อนที่สูงกว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.19 XRD ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยคลื่นเหนือเสียงในเวลาที่ต่างกัน

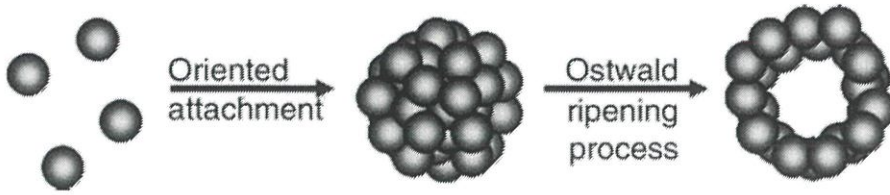


รูปที่ 2.20 (ก) SEM (ข)-(ง) TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กลวง

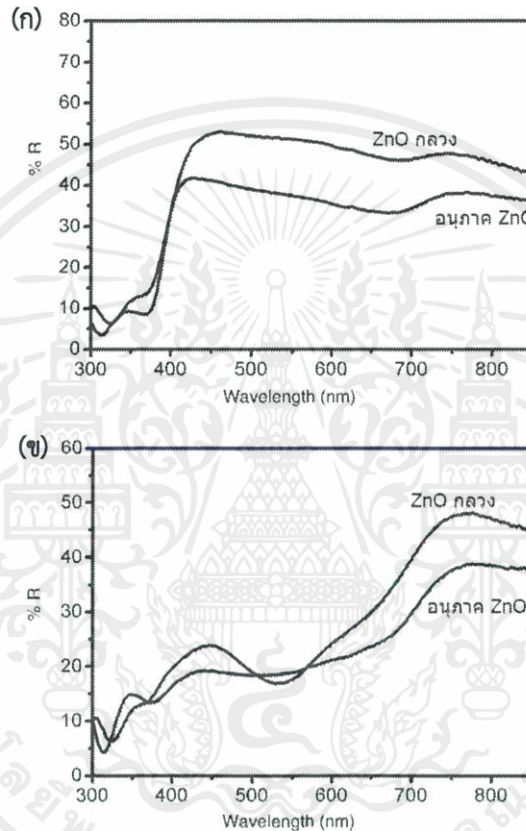


รูปที่ 2.21 ภาพ SEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยคลื่นเหนือเสียง (ก)-(ข) 3 นาที (ค)-(ง) 10 นาที (จ)-(ฉ) 60 นาที และภาพเล็กใน 2.24(ข) เป็นภาพ TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 กลไกการเกิดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีรูกลวง

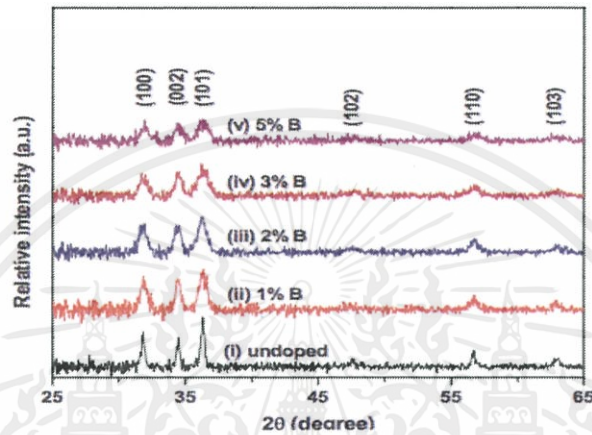


รูปที่ 2.23 กราฟแสดงผลของ Diffuse reflectance spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กลวงกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ก) ไม่มีสีย้อม (ข) มีสีย้อม N719

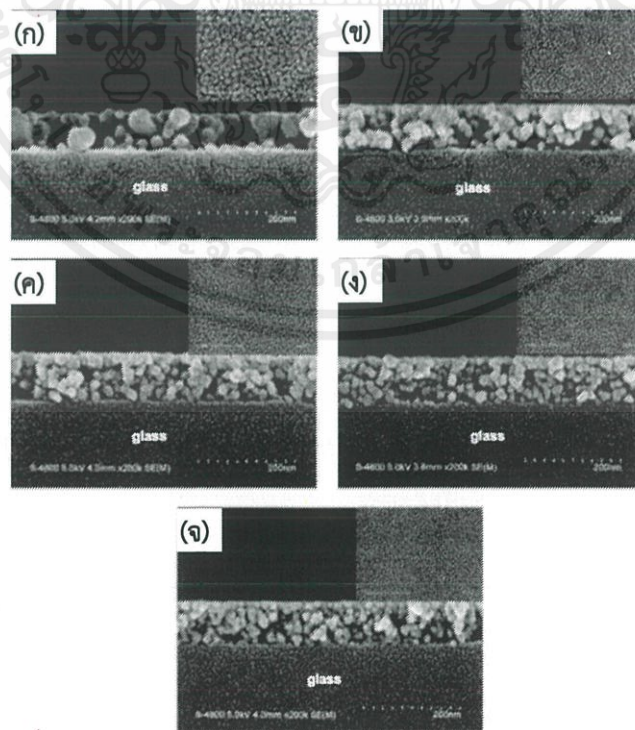
ในปี ค.ศ.2013 Chien-Yie Tsay และ Wei-Tse Hsu [37] ได้รายงานวิธีการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ทำการเจือโบรอนและทำการเจือโบรอนที่ 0-5 เปอร์เซ็นต์อะตอม สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ด้วยวิธีโซล-เจล และส핀 เพื่อศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์และนำไปเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD พบว่ามีโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบ Hexagonal (Wurtzite) และพบว่าเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปในโครงสร้างทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแลตทิซ ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคที่เล็กลง เมื่อมีการเจือโบรอนที่มากขึ้นเนื่องจากขนาดของอะตอมโบรอนมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของซิงค์ ดังรูปที่ 2.24 ภาพตัดขวางของ FE-SEM แสดงให้เห็นว่ามีความหนาของฟิล์มอยู่ที่ประมาณ 80-95 นาโนเมตร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความหนืดและพารามิเตอร์ของเครื่องส핀และเป็นการยืนยันข้อมูลจาก XRD จากรูปที่ 2.25 ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยนี้ซึ่งมีลิขสิทธิ์โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอนุภาคมีขนาดที่เล็กลง และมีขนาดของรูพรุนที่เล็กลงด้วยเช่นกัน การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัด ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จากรูปที่ 2.26 พบว่า ที่การเจือโบรอน 1 เปอร์เซ็นต์อะตอม ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด คือ มีคล่องตัวของพาหะเป็น $17.9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ความต้านทานการนำไฟฟ้าเป็น $2.2 \times 10^2 \text{ } \Omega\text{cm}$ และความเข้มข้นของพาหะเป็น $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ แต่ถ้ามีการเจือที่มากเกินไปจะทำให้เกิดเป็นกำแพงศักย์ (Potential barrier) แทนที่จะเกิดเป็นพาหะ การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยสมบัติการทะลุผ่านและการดูดกลืนในช่วงแ่งที่ตามองเห็น จากรูปที่ 2.27 อัตราการทะลุผ่านของแสงและค่าแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเจือโบรอนเพิ่มมากขึ้น

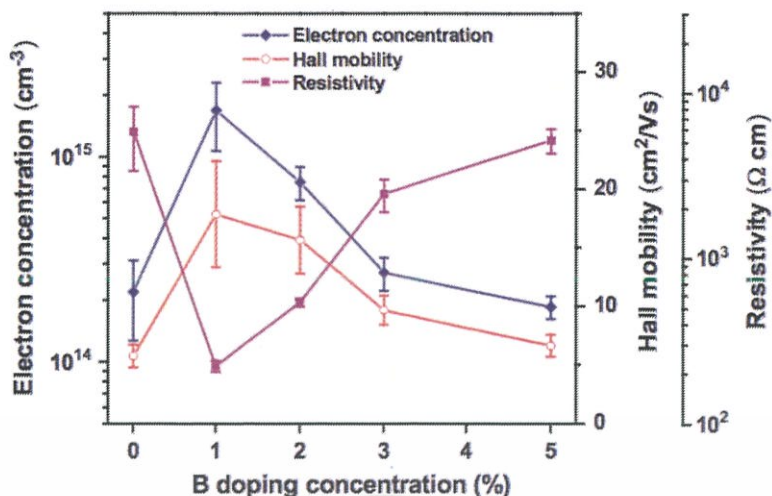


รูปที่ 2.24 กราฟ XRD ของการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือโบรอนและเจือโบรอนที่ 0-5เปอร์เซ็นต์อะตอม

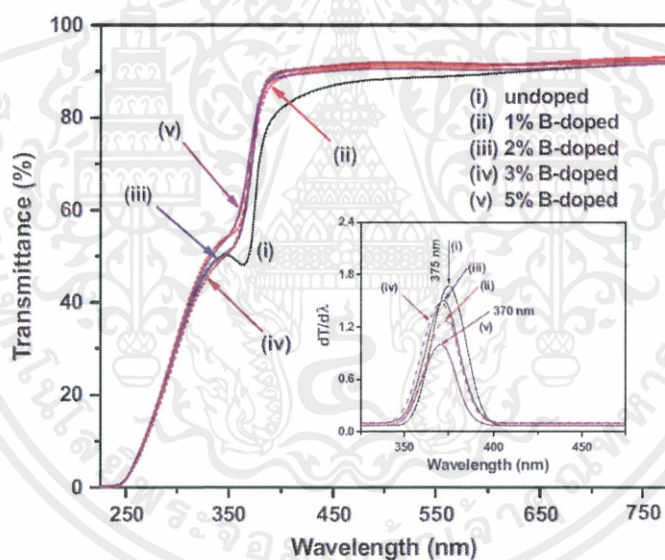


รูปที่ 2.25 ภาพตัดขวางที่ได้จาก TEM ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ก) ไม่เจือ และ (ข)-(จ) เจือ 1-5 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



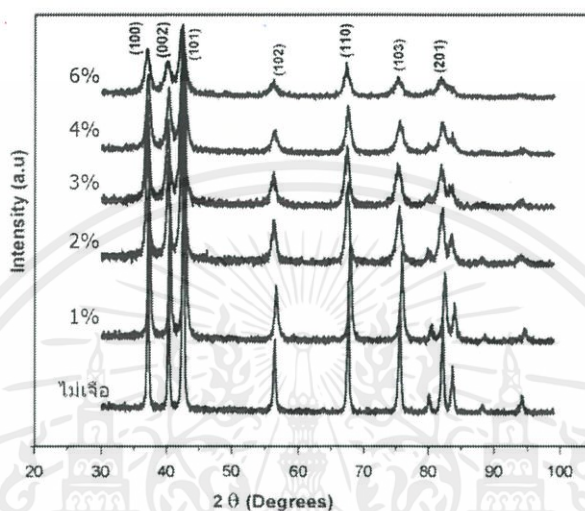
รูปที่ 2.26 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Zn:B
(ความเข้มข้นของพาหะ ค่าความคล่องของพาหะและค่าความต้าน)



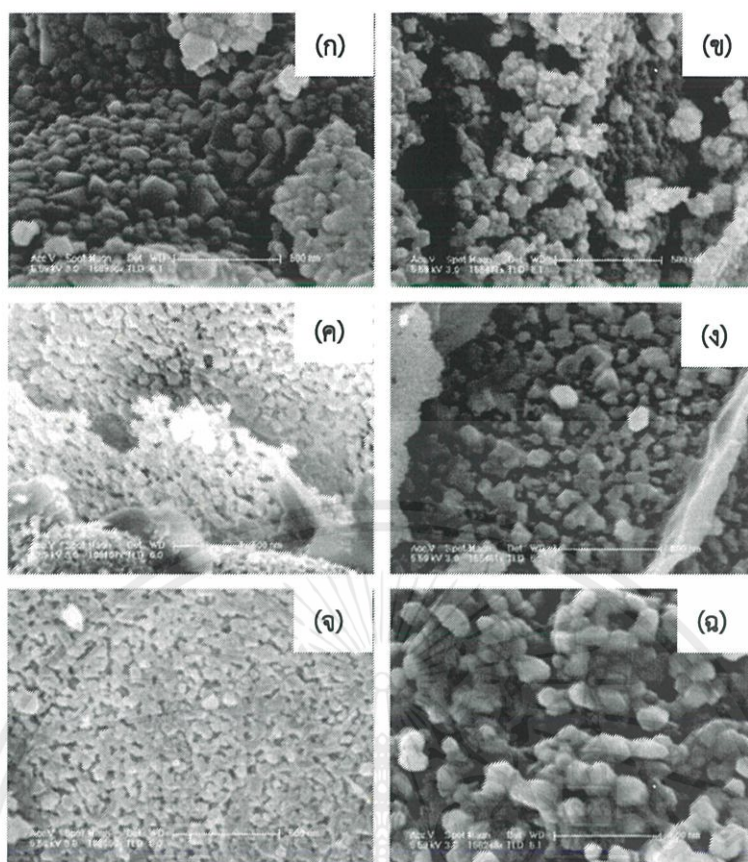
รูปที่ 2.27 การทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบางที่ไม่เจือและเจือด้วยโบรอน
(ภาพเล็ก) ค่าการดูดกลืนของฟิล์มบาง Zn:B

ในปี ค.ศ. 2014 A.N. Mallikan และคณะ [38] ได้ศึกษาผลกระทบทางโครงสร้างและสมบัติทางแสงเมื่อมีการเจือด้วยธาตุอลูมิเนียมเข้าไปในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล ด้วยอัตราส่วนการเจือที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1-6 เปอร์เซ็นต์ต่ออะตอม ผลจาก XRD ในรูปที่ 2.28 ยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้นั้นมีโครงสร้างแบบ Hexagonal (Wurtzite) มีขนาดของผลึกที่ลดลงและมีพีคที่เลื่อนไปทางด้านที่มุม 2θ เพิ่มขึ้น จากการเข้าไปของอะตอมอลูมิเนียมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างดังภาพ SEM ในรูปที่ 2.29 บอกถึงขนาดของเกรนทั้งเจือและไม่เจืออลูมิเนียมประมาณ 100 นาโนเมตร การวิเคราะห์การสั่นของพันธะเคมีด้วย FTIR จากรูปที่ 2.30 พบว่าจะพบพีคของ O-H การสั่นแบบ stretching ที่ประมาณ 3412 ถึง 3456 cm^{-1} จากกัมพลักษณ์ของการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

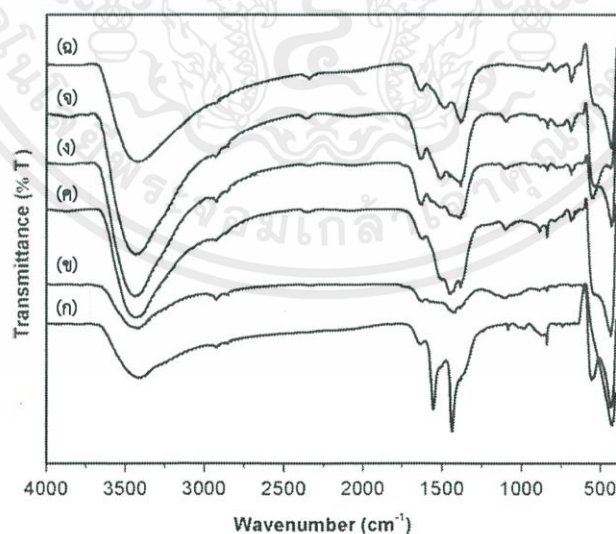
น้ำในแลตทิซ ZnO พีกที่ 2848 และ 2933 cm^{-1} เป็นพันธะของ O-H แบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามลำดับ พีกย่านนิ้วมือที่ 683 cm^{-1} เป็นของ Al-O และพีกที่ 437-550 cm^{-1} เป็นพันธะของ ZnO การวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการดูดกลืน จากรูปที่ 2.31 พบว่ามีการเลื่อนของพีกไปทางด้านพลังงานสูงขึ้นเมื่อมีการเจืออลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการที่ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ได้ (Fermi level) ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคที่เล็กลงเมื่อมีการเจือที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์จะดีขึ้นเมื่อมีการเจืออลูมิเนียมเข้าไป



รูปที่ 2.28 กราฟ XRD ที่ไม่เจือและเจืออลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

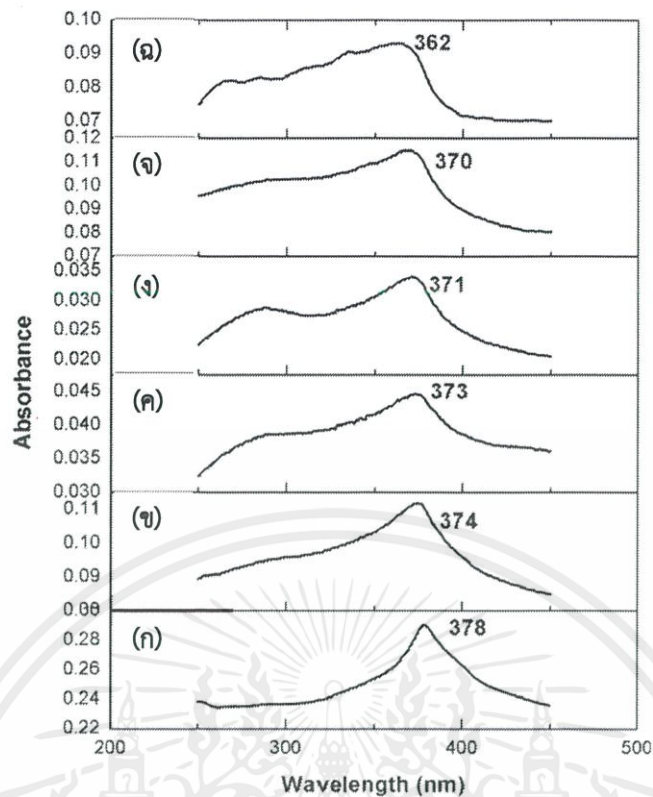


รูปที่ 2.29 ภาพ SEM (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์



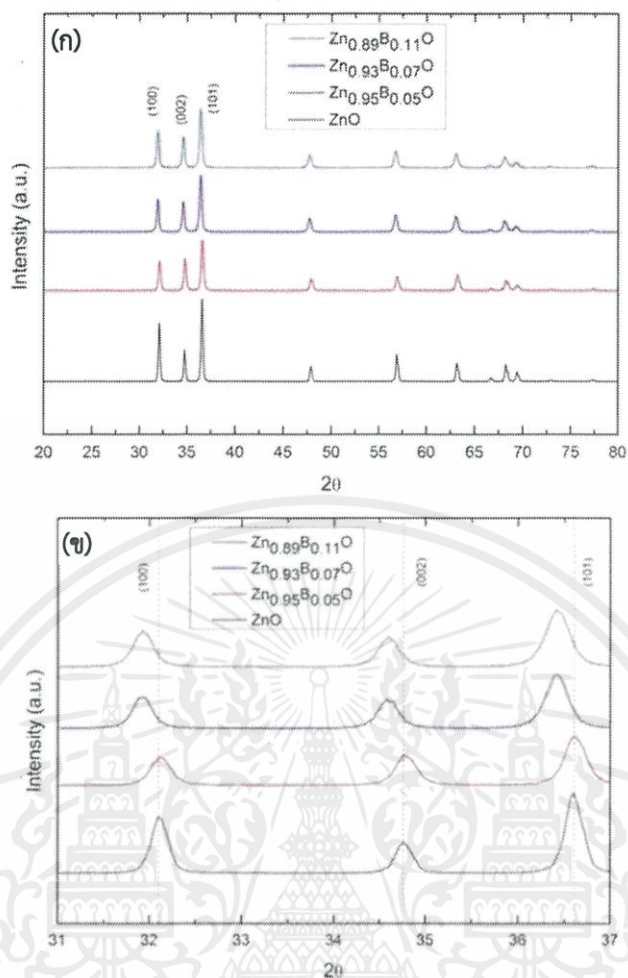
รูปที่ 2.30 กราฟ FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

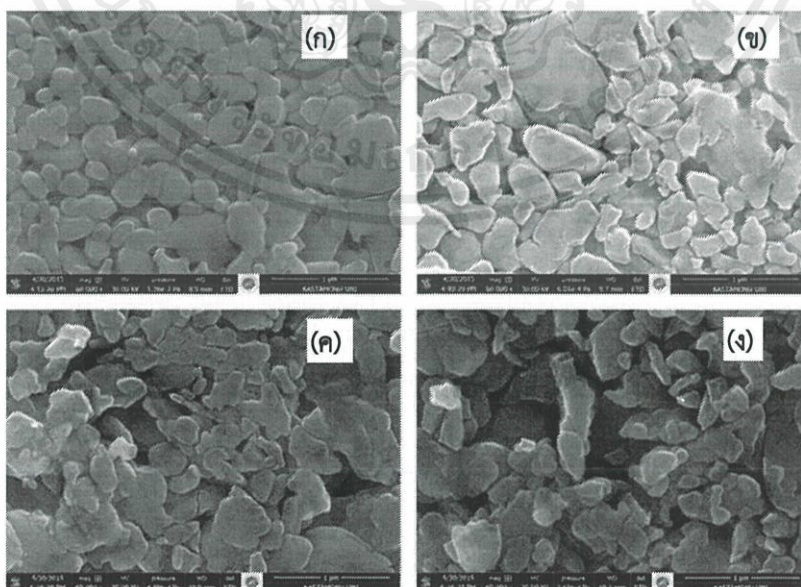


รูปที่ 2.31 กราฟการดูดกลืนทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (ก) ไม่เจือ (ข) 1 เปอร์เซ็นต์ (ค) 2 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3 เปอร์เซ็นต์ (จ) 4 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 6 เปอร์เซ็นต์

ในปี ค.ศ. 2015 S.D. Senol และคณะ [39] ได้ศึกษาผลกระทบทางโครงสร้างสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสง เมื่อมีการเจือโบรอนในปริมาณ 0-11 เปอร์เซ็นต์ต่ออม ลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD พบว่าเมื่อมีการเจือด้วยโบรอนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีขนาดของอนุภาคที่เล็กลงจาก 60.75 เป็น 34.34 นาโนเมตร และมีพีคที่แสดงลักษณะโครงสร้างแบบ Hexagonal (Wurtzite) ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งมีการยืนยันด้วยภาพ SEM แสดงว่าการเจือของโบรอนที่ปริมาณมากขึ้นมีผลต่อลักษณะของพื้นผิวที่เปลี่ยนไปและขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดที่เล็กลง ดังรูปที่ 2.33 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยการดูดกลืนช่วงแสงที่มองด้วยตาเห็นนั้น พบว่ามีตัวอย่างที่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 384 นาโนเมตร และมีค่าแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้น คือ เลื่อนไปทางพลังงานที่สูงขึ้น 3.27 เป็น 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อมีการเจือโบรอนที่ปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.34 และสมบัติทางไฟฟ้า มีความเข้มข้นของพาหะที่เพิ่มขึ้นจาก 0.11×10^{14} เป็น $4.08 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ค่าความคล่องของพาหะมีค่าลดลงจาก 5.61 เป็น $1.22 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ และความต้านทานทางไฟฟ้าลดลงจาก 10.89×10^4 เป็น $1.25 \times 10^4 \text{ } \Omega\text{cm}$

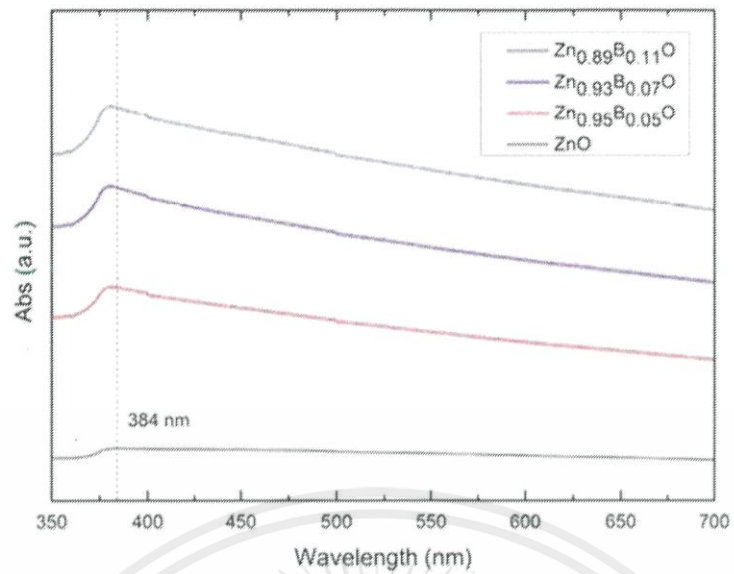


รูปที่ 2.32 กราฟ XRD (ก) พิกัดทั้งหมด และ (ข) 3 พิกัดหลักที่เกิดการเลื่อนไปทางพลังงานที่สูง



รูปที่ 2.33 ภาพ SEM (ก) ไม่มีการเจือ และ (ข)-(ง) 3, 5 และ 11 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 กราฟการดูดกลืนกับความยาวคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี โดยใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรตที่มีการเจือด้วยโบรอนหรือฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกัน จากนั้นนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไปตรวจสอบสมบัติด้านต่างๆ ได้แก่ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction สมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy ในโหมด Diffuse Reflectance ลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยเครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค Four-Point-Probe

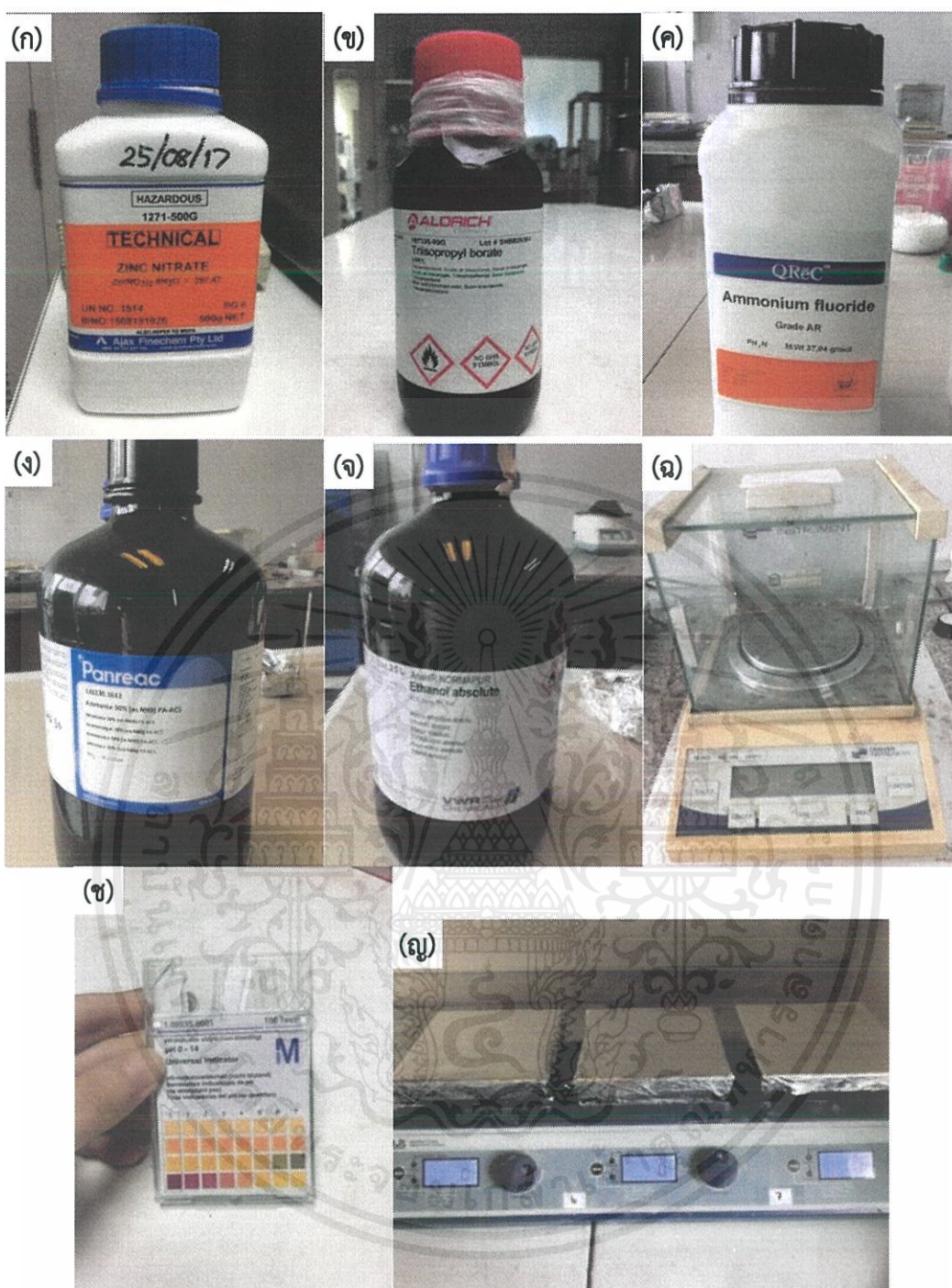
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc Nitrate Hexahydrate : $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)
2. กรดไตรไอโซโพรพิลโบเรต (Triisopropyl borate : $C_9H_{21}BO_3$)
3. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium Fluoride : NH_4F)
4. เอทานอล (Ethanol : C_2H_5OH)
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide : NH_4OH)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์แก้ว
2. เครื่องซังสาร
3. กระจกบอควง
4. ซ้อนตักสาร
5. เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนและแท่งแม่เหล็ก
6. ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
7. ปิเปตอัตโนมัติ
8. เตาเผา
9. โพรบโซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (ก) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต
- (ข) กรดไตรไอโซโพรพิลโบเรท
- (ค) แอมโมเนียมฟลูออไรด์
- (ง) เอทานอล
- (จ) แอมโมเนีย
- (ฉ) เครื่องชั่งสาร
- (ช) ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์

(ญ) เครื่องกวนสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในชื่อของสถาบันเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

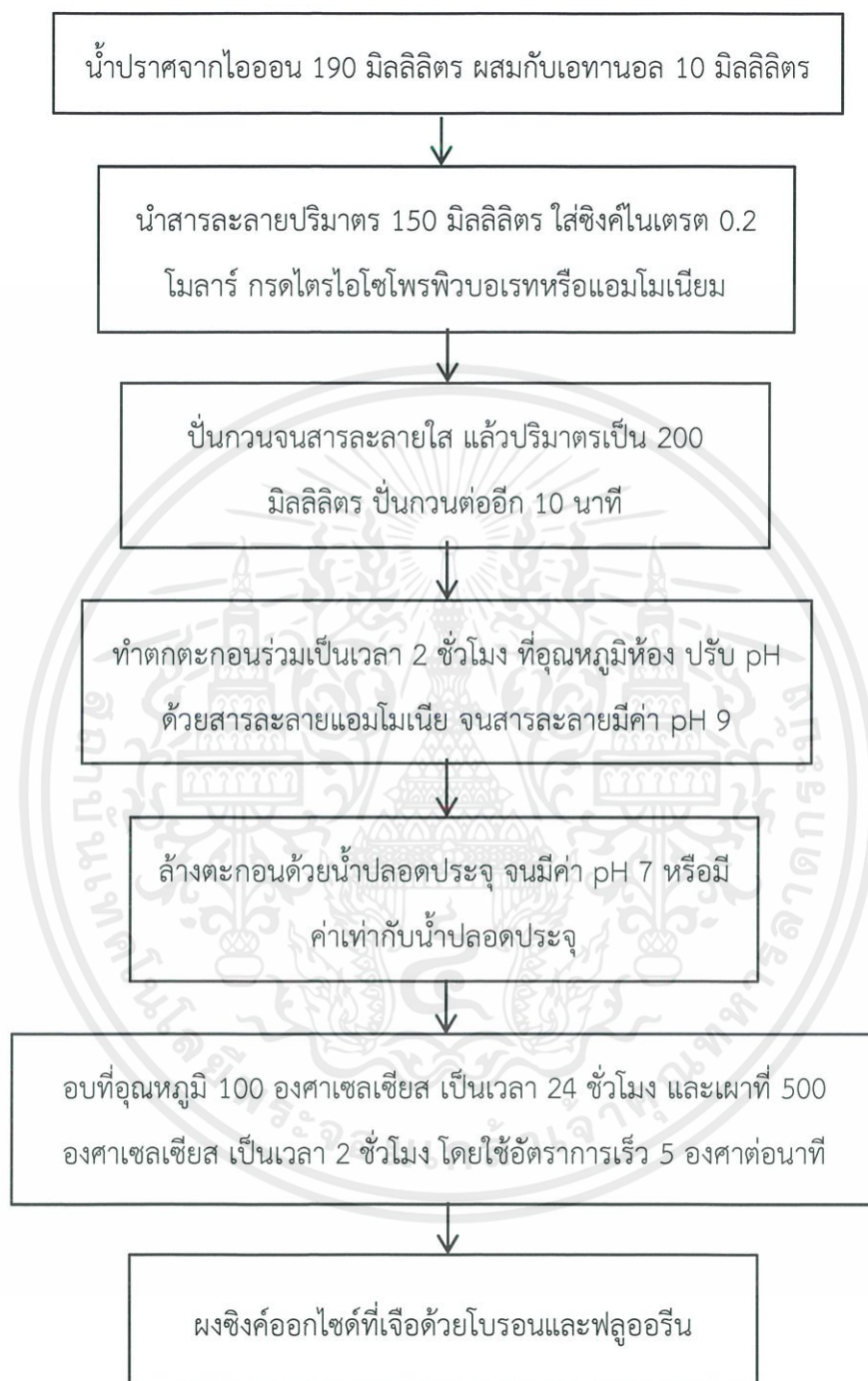
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

เตรียมสารละลายโดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นของซิงค์ออกไซด์และสารละลายกรดไตรโอโซโพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เป็นสารตั้งต้นสารเจือ มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ผสมน้ำปราศจากไอออน 190 มิลลิลิตร และเอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เข้าด้วยกันโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวนสาร
2. นำสารละลายเอทานอลมา 150 มิลลิลิตร ใส่ซิงค์ไนเตรต 0.2 โมลาร์ และกรดไตรโอโซโพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์ 1-9 โมลเปอร์เซ็นต์ ปั่นกวนจนสารละลายใส ปรับปริมาตรสารละลายด้วยการเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร 200 มิลลิลิตรแล้วปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารละลายและแท่งแม่เหล็ก 10 นาที
3. นำสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วมาใส่ภาชนะเพื่อสำหรับการทำการตกตะกอนร่วม พร้อมปั่นกวนด้วยแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายที่ปั่นกวนด้วยแม่เหล็กจนมีค่าเป็น pH 9
5. ทำการล้างสารละลายคอลลอยด์ด้วยน้ำปลอดประจุ คนสารละลายคอลลอยด์ให้เข้ากัน แล้วนำมาใส่หลอดเซนต์ปีทริก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งค่าที่ความเร็วรอบ 6000 รอบ เป็นเวลา 6 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เทน้ำปลอดประจุใส่ที่แยกชั้นกับตะกอนทิ้ง วัดค่า pH ด้วยยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ของสารละลายที่เททิ้ง แล้วเติมน้ำปลอดประจุ ทำซ้ำข้อ 5 จนได้ค่า pH 7 หรือมีค่าเท่ากับน้ำปลอดประจุ
6. นำสารละลายคอลลอยด์ที่ปรับ pH เรียบร้อยแล้ว เข้าเตาอบเพื่ออบแห้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำผงที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นมาใส่ภาชนะสำหรับเผา ตั้งค่าเตาเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้นอุณหภูมิเป็น 5 องศาต่อนาที

แผนผังกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

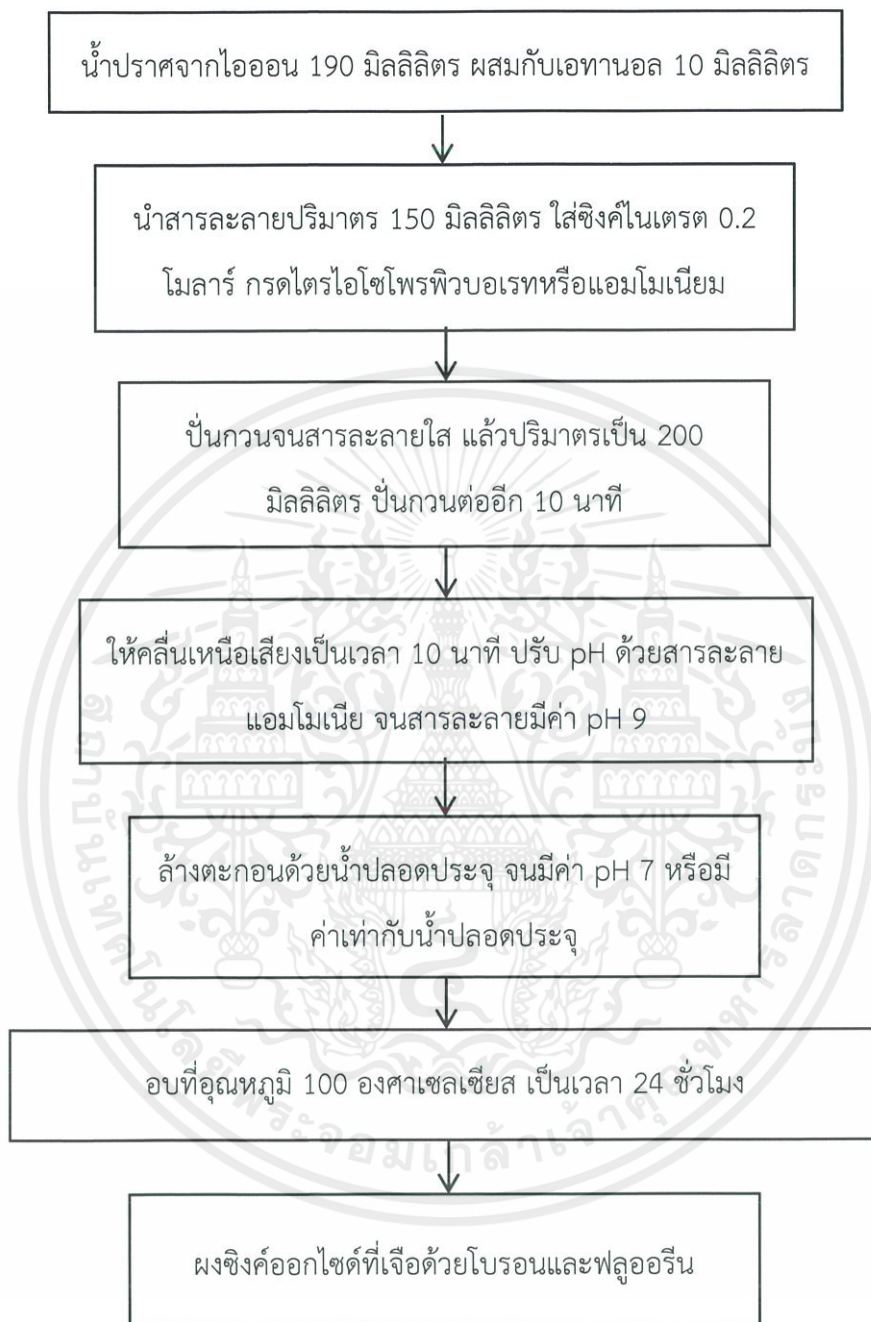
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

เตรียมสารละลายโดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งของซิงค์ออกไซด์และสารละลายกรดไตรโอโซโพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เป็นสารตั้งต้นสารเจือ มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ผสมน้ำปราศจากไอออน 190 มิลลิลิตร และเอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เข้าด้วยกันโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวนสาร
2. นำสารละลายเอทานอลมา 150 มิลลิลิตร ใส่ซิงค์ไนเตรต 0.2 โมลาร์ และกรดไตรโอโซโพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์ 1-9 โมลเปอร์เซ็นต์ ปั่นกวนจนสารละลายใส ปรับปริมาตรสารละลายด้วยการเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร 200 มิลลิลิตรแล้วปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารละลายและแท่งแม่เหล็ก 10 นาที
3. นำสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วมาใส่ภาชนะเพื่อสำหรับการทำโซโนเคมี ด้วยโพรบโซโนเคมี เป็นเวลา 10 นาที 750 วัตต์
4. เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลาย ขณะทำโซโนเคมีจนมีค่าเป็น pH 9
5. ทำการล้างสารละลายคอลลอยด์ด้วยน้ำปลอดประจุ จนสารละลายคอลลอยด์ให้เข้ากัน แล้วนำมาใส่หลอดเซนต์ปีฟัก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งค่าที่ความเร็วรอบ 6000 รอบ เป็นเวลา 6 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เติมน้ำปลอดประจุใส่ที่แยกชั้นกับตะกอนทิ้ง วัดค่า pH ด้วยยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ของสารละลายที่เททิ้ง แล้วเติมน้ำปลอดประจุ ทำซ้ำข้อ 5 จนได้ค่า pH 7 หรือมีค่าเท่ากับน้ำปลอดประจุ
6. นำสารละลายคอลลอยด์ที่ปรับ pH เรียบร้อยแล้ว เข้าเตาอบเพื่ออบแห้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

แผนผังกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือโบรอนและฟลูออรีนด้วยการกระบวนการโซโนเคมี ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาค

3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาคว่ามีโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ โบรอนและฟลูออรีนอะตอมหรือไม่ ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของเบรกก์ ที่จะให้ลักษณะการเลี้ยวเบนของแต่ละโครงสร้างผลึกนั้นจะแตกต่างกัน โดยนำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงใส่ในสตับ (stub) ให้เต็มและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของบริษัท Rigaku รุ่น SmartLab ใช้ Cu K α เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่มีความยาวคลื่น 1.504 อังสตรอม ในโหมด theta-2-theta ตั้งแต่มุม 20 ถึง 80 องศากรี ด้วย Speed duration time 5



รูปที่ 3.4 เครื่อง X-Ray Diffraction ของบริษัท Rigaku รุ่น SMARTLAB

3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างว่ามีลักษณะอย่างไร โดยเทสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงลงบนแผ่นคาร์บอนเทป (Carbon tape) แล้วนำแผ่นคาร์บอนเทปที่มีสารตัวอย่างติดอยู่มาติดลงบนสตับที่สำคัญสำหรับใส่ในเครื่อง แล้วนำไปเคลือบด้วยโมเลกุลแพลทตินัมด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของบริษัท Hitachi รุ่น s 4700 โดยใช้กำลังขยายที่ 10k และ 100k

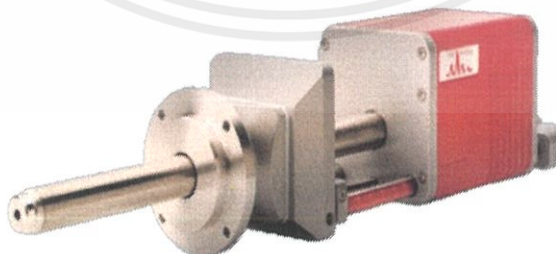
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy
ของ บริษัท Hitachi รุ่น s 4700

3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

ตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง โดยเครื่องมือชนิดนี้จะมีการติดตั้งอยู่กับเครื่องวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิว Scanning Electron Microscopy ซึ่งจะวัดปริมาณอะตอมของธาตุที่เจอเข้าไป และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของบริษัท IXRF systems รุ่น 550i

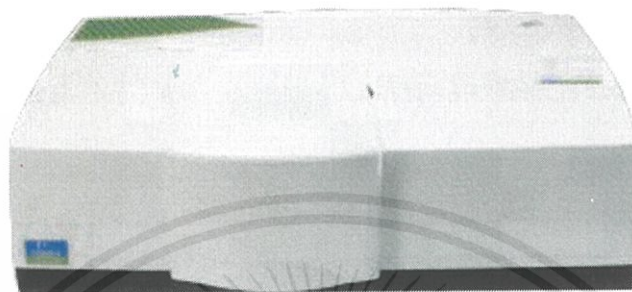


รูปที่ 3.6 เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ของ บริษัท IXRF systems รุ่น 550i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติการกระเจิงแสงและการสะท้อนของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy

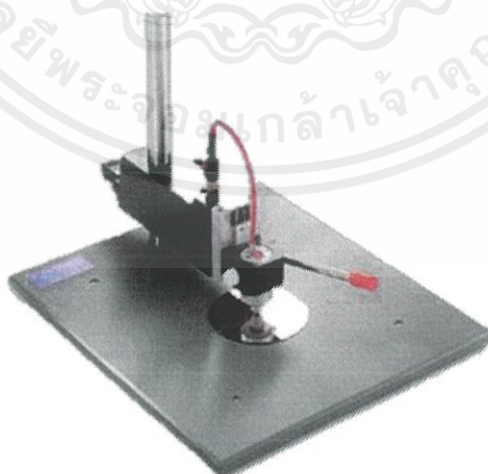
ตรวจสอบการทะลุผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืนของแสง ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยนำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงใส่ในสตัปให้เต็มและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงของของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950



รูปที่ 3.7 เครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy ของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากการวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4 point probe

ตรวจสอบสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง ทำการอัดเม็ดสารตัวอย่างด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยการผสมสารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol : PVA) แล้วทำการเผาเพื่อทำการไล่สารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ออก แล้วนำไปวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4 point probe ของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500



รูปที่ 3.8 เครื่อง 4 point probe ของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

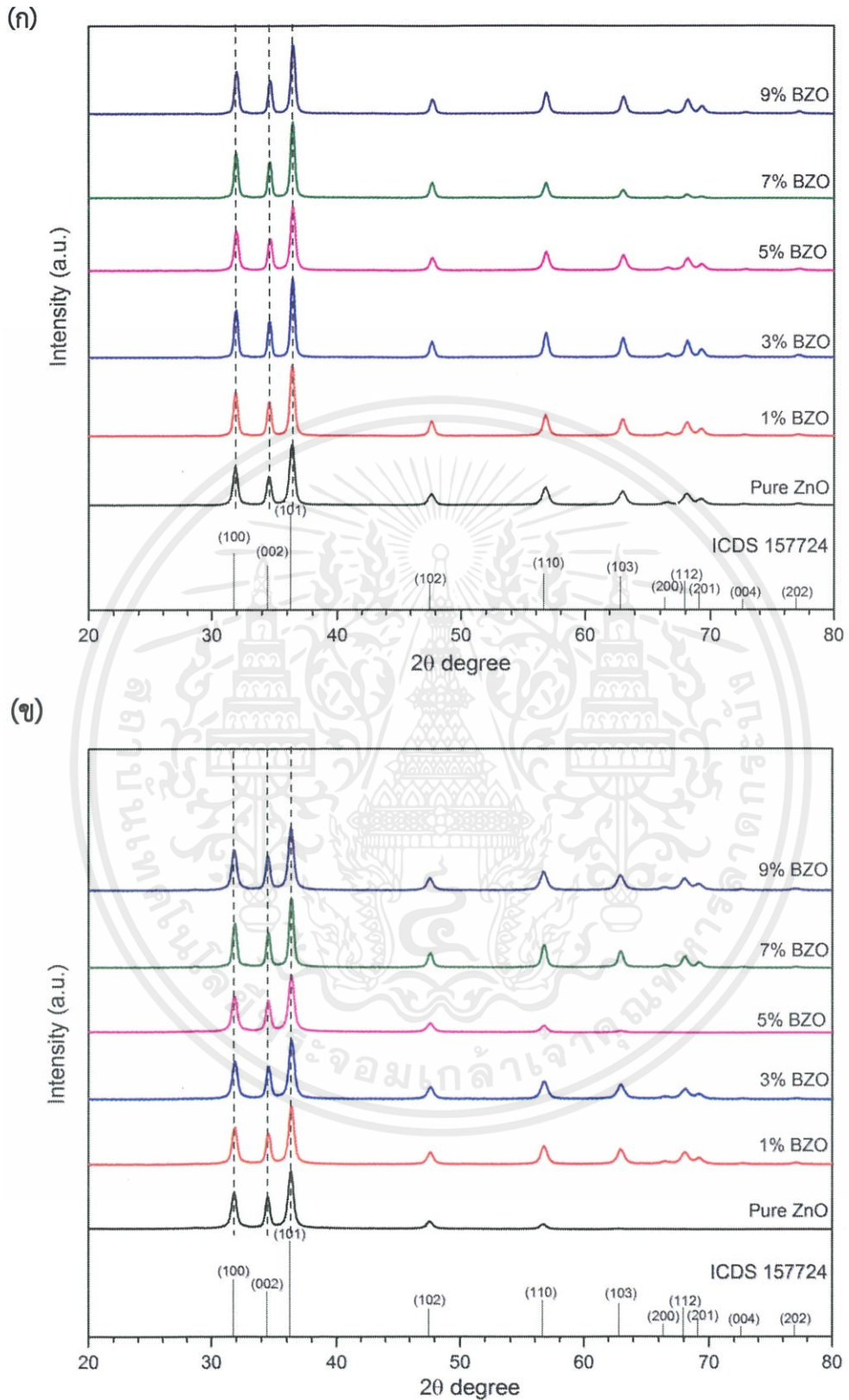
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน

4.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี ดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้ทำการตรวจสอบมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์หมายเลข ICDS 157724 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ที่มีมุม 2 θ เท่ากับ 31.7 34.4 36.2 47.5 56.5 62.8 66.3 67.9 69.0 72.5 และ 76.9 องศา ซึ่งตรงกับระนาบเป็น (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) และ (202) ตามลำดับ จะพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยโบรอน รูปที่ 4.1(ก) ที่เป็นการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม และรูปที่ 4.1(ข) เป็นการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี จะสอดคล้องกับรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโดยไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ และยังไม่มีย่านสำคัญของการเลี้ยวเบนของพีคในทุกอัตราส่วนความเข้มข้นของการเจือด้วยโบรอนที่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 เปอร์เซ็นต์โมล จากตารางที่ 4.1 แสดงขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน โดยคำนวณจากสมการ Scherrer ที่ใช้ 3 พีคหลักของรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในการคำนวณ [29] พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปจะทำให้มีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากการที่กระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ผลิตภัณฑ์จึงทำให้ผลึกของซิงค์ออกไซด์นั้นเกิดการรวมตัวกันส่งผลทำให้ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นและคาดว่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากการที่โบรอนไอออนสามารถที่จะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้จึงทำให้เกิดการขยายของโครงสร้างผลึกโดยสามารถที่ยืนยันการเข้าไปอยู่ในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ของโบรอนไอออนได้จากสมบัติทางแสง [40,41] ส่วนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีที่เงื่อนไขการเจือโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆนั้นมีขนาดผลึกที่ไม่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลจากการที่ไม่เกิดการรวมตัวกันของผลึกจากการได้ให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เหมือนอย่างในกระบวนการตกตะกอนร่วมจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกดังตารางที่ 4.1 ยกเว้นเงื่อนไขการเจือโบรอน 7 โมลเปอร์เซ็นต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเงื่อนไขที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอน 19 นาโนเมตร เป็น 23 นาโนเมตร คาดว่าอาจจะเกิดจากการรวมตัวของผลึกในขั้นตอนการสังเคราะห์จึงทำให้มีขนาดของผลึกมีขนาดที่แตกต่างไป



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วน

ความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานที่รับผิดชอบในการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี

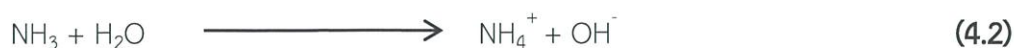
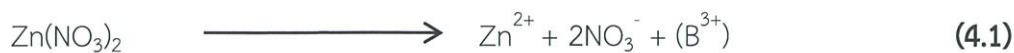
อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน (นาโนเมตร)	
	กระบวนการตกตะกอนร่วม	กระบวนการโซโนเคมี
0	20	19
1	22	19
3	25	19
5	22	19
7	24	23
9	24	19

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่การเจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนต่างๆ จากรูปที่ 4.2 เป็นการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมในรูปที่ 4.2(ก)-(ข) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอนนั้นมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลม (Spheres-likes structure) ที่รวมตัวกันโดยมีขนาดของอนุภาคทรงกลมประมาณ 143.3 นาโนเมตร รูปที่ 4.2(ค)-(ง) เจือไนซที่เจือด้วยโบรอน 1 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปมีลักษณะเป็นแท่งที่รวมตัวกันมีความยาวของแท่งประมาณ 507.2 นาโนเมตรและรูปที่ 4.2(จ-ฉ) เจือไนซที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเจือโบรอนเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ได้ลักษณะที่เป็นแท่งหกเหลี่ยมที่รวมกันเป็นกลุ่มคล้ายดอกไม้ (Flower-like structure) ที่มีความยาวของแท่งที่ประมาณ 701.0 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดของแท่งซิงค์ออกไซด์ที่ใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้น โดยการก่อตัวของอนุภาคหรือแท่งซิงค์ออกไซด์นั้นมาจากการที่ซิงค์ไนเตรตมีการแตกตัวได้เป็นซิงค์ไอออนและไนเตรตไอออนในสารละลาย ส่วนไตรโอโซโพรพิลโบเรทแตกตัวได้เป็นโบรอนไอออนในสารละลายตามสมการที่ 4.1 และแอมโมเนียที่ผสมกับน้ำมีการแตกตัวเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนในสมการที่ 4.2 เมื่อสารละลายซิงค์ไนเตรตและสารละลายแอมโมเนียมผสมกันดังสมการที่ 4.3 จะทำให้ซิงค์ไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์และเกลือไนเตรตที่ละลายน้ำ โดยถ้ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของโบรอนมากขึ้นทำให้ในระบบเกิดโบรอนไอออนมากขึ้น โดยโบรอนไอออนชอบเกาะที่ระนาบ (10-10) ส่งผลทำให้ซิงค์ไอออนไปจับซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่ระนาบ (0001) ได้มากขึ้นทำให้เกิดเป็นแท่งที่ยาวขึ้นดังตามรูปที่ 4.2 ซึ่งในกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้น เมื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแตกตัวและรวมตัวกันกันใหม่ของไอออนตามสมการที่ 4.3 จะต้องให้ความร้อนเพื่อไล่ไฮดรอกไซด์ไอออนออกเพื่อให้เกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ดังสมการที่ 4.4 [42]

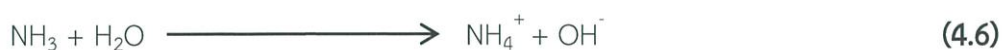
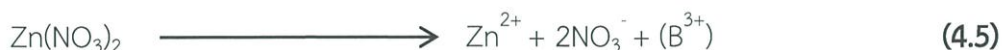
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงการเกิดกระบวนการตกตะกอนร่วมที่เจือด้วยโบรอน [43]

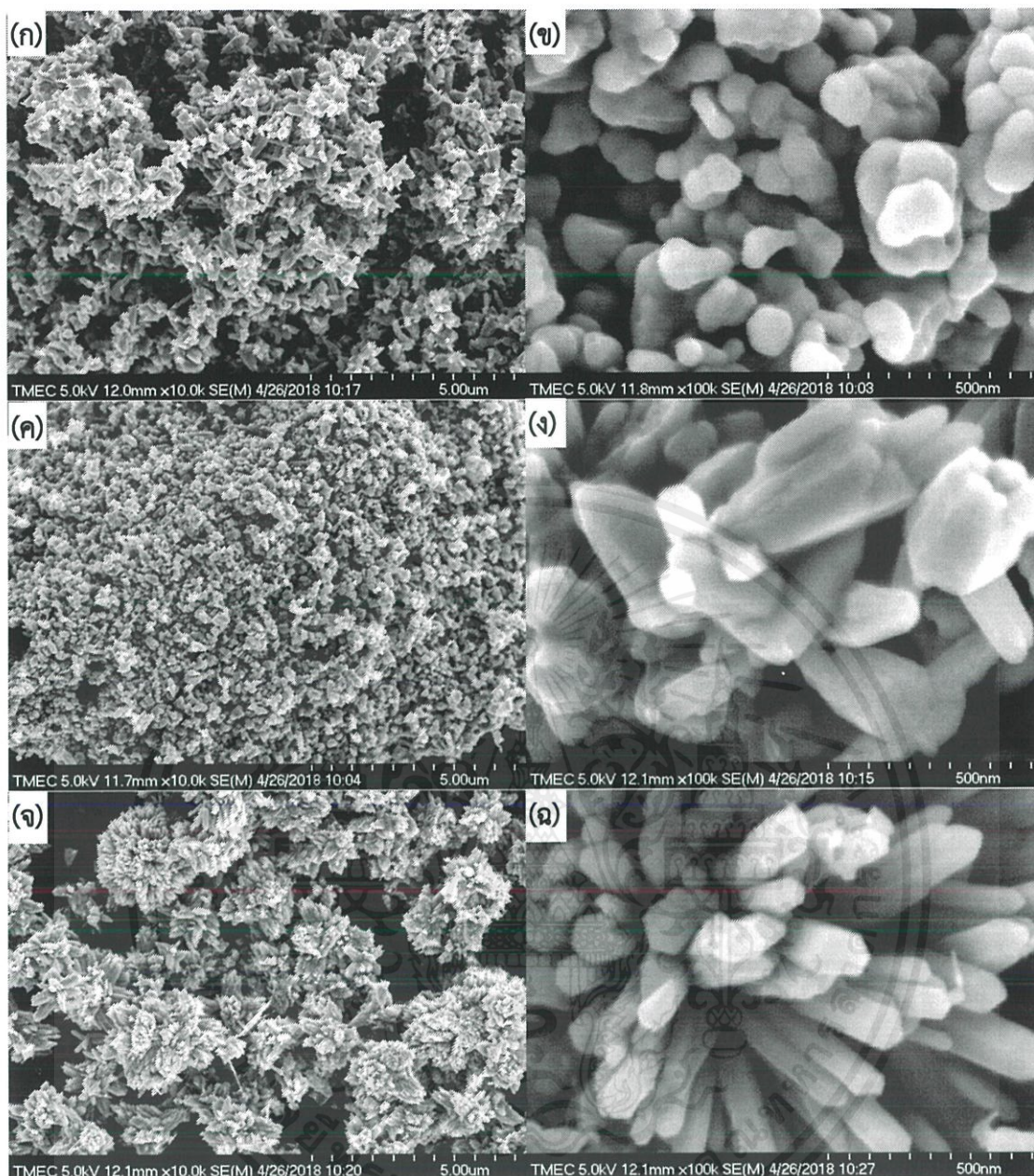


ส่วนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะได้ว่า มีลักษณะสัมมนาวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เมื่อทำการเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนมากขึ้นจะให้ความยาวของอนุภาคที่สั้นกว่าที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยโบรอนและขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในรูปที่ 4.4 จะได้ว่า การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นมีขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้ใกล้เคียงกัน 86.4, 81.4 และ 78.7 นาโนเมตร และมีบางส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งในซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ มีความยาวของแท่งประมาณ 148.2 และ 134.0 นาโนเมตร ตามลำดับ การเกิดเป็นอนุภาคซิงค์ออกไซด์นั้นเกิดจากการแตกตัวของสารละลายซิงค์ในเตรต สารละลายไตรโอโซฟิวบอเรทและสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ 4.5-4.6 เช่นเดียวกับในสมการที่ 4.1-4.2 ได้เป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์จากการรวมตัวของซิงค์ไอออนกับไฮดรอกไซด์ไอออนและได้เกลือไนเตรตที่ละลายน้ำตามสมการ 4.6 โดยกระบวนการโซโนเคมีเป็นการให้คลื่นเหนือเสียงแก่ระบบทำให้เกิดผลทางเคมีกับสารละลายที่เกิดจากอะคูสติค คาวิตีชั่น ส่งผลทำให้เกิดเป็นฟองอากาศที่มีการขยายและแตกออกภายในสารละลาย ซึ่งการแตกของฟองอากาศทำให้เกิดพลังงานและมีอุณหภูมิสูงขึ้นภายในระบบทำให้พลังงานที่สูงนี้เป็นไลไฮดรอกไซด์ไอออนออกจากซิงค์ไฮดรอกไซด์เกิดซิงค์ออกไซด์ ดังสมการที่ 4.8 จากการที่อัตราส่วนการเจือโบรอนมากขึ้นทำให้เกิดแท่งซิงค์ออกไซด์ได้เนื่องจากมีโบรอนไอออนในระบบมากขึ้น โดยโบรอนไอออนจะไปขัดขวางการโตในระนาบ (10-10) ส่งผลทำให้มีปริมาณซิงค์ไอออนไปจับซิงค์ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ระนาบ (0001) ได้มากขึ้นทำให้เกิดเป็นแท่งได้แต่การให้คลื่นเหนือเสียงเป็นการไปรบกวนการก่อตัวเป็นแท่งของซิงค์ออกไซด์จากการได้รับพลังงานของคลื่นเหนือเสียงในทุกทิศทางจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเหมือนในกระบวนการตกตะกอนร่วม [42]

สมการแสดงการเกิดกระบวนการโซโนเคมีที่เจือด้วยโบรอน [44]

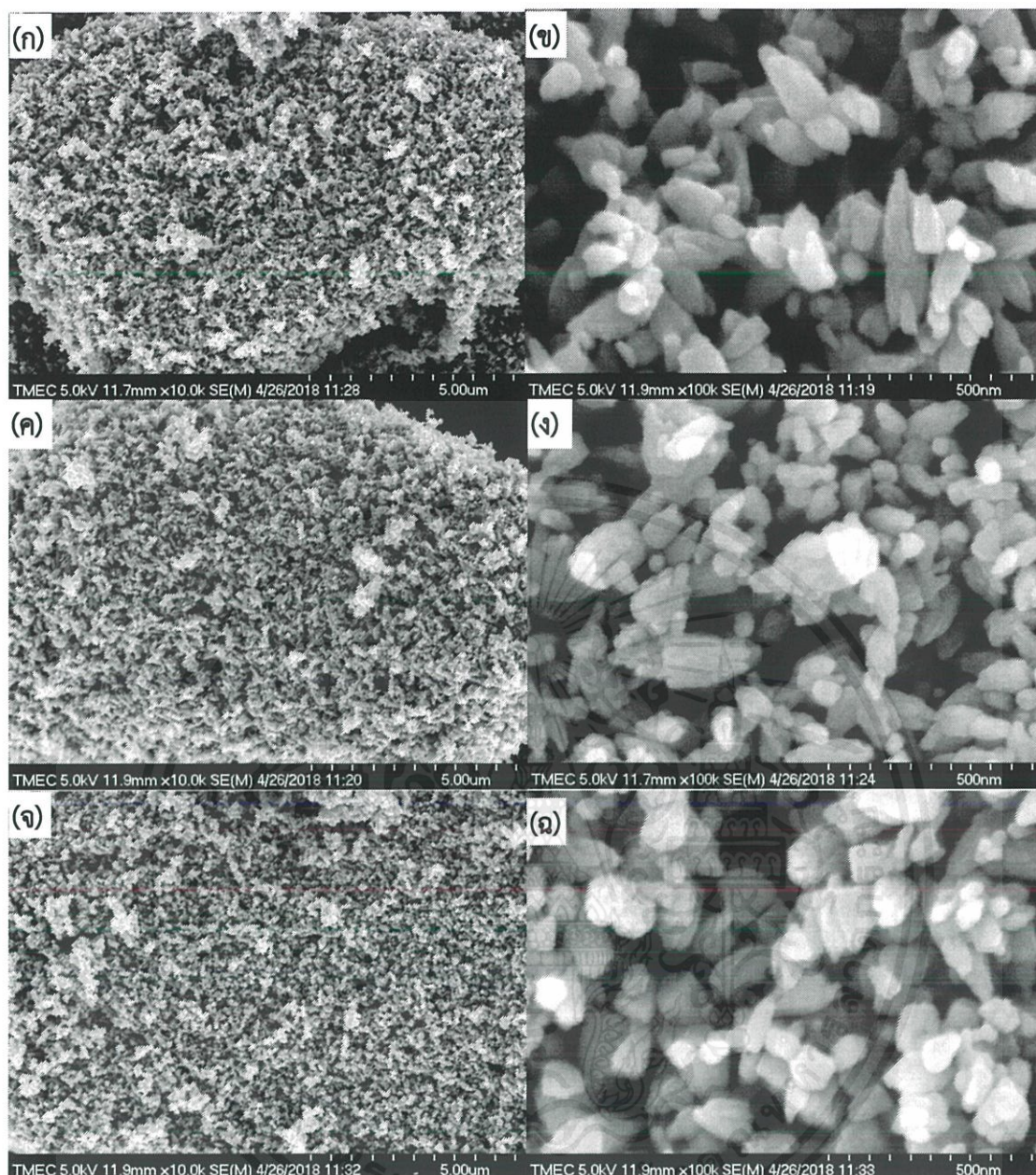


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



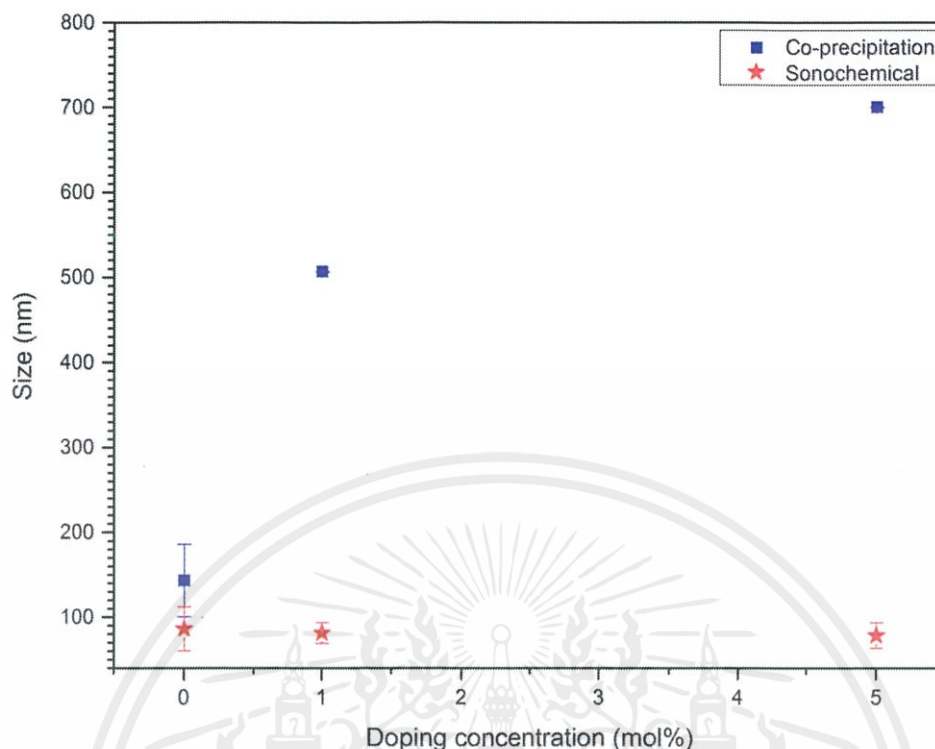
รูปที่ 4.2 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k

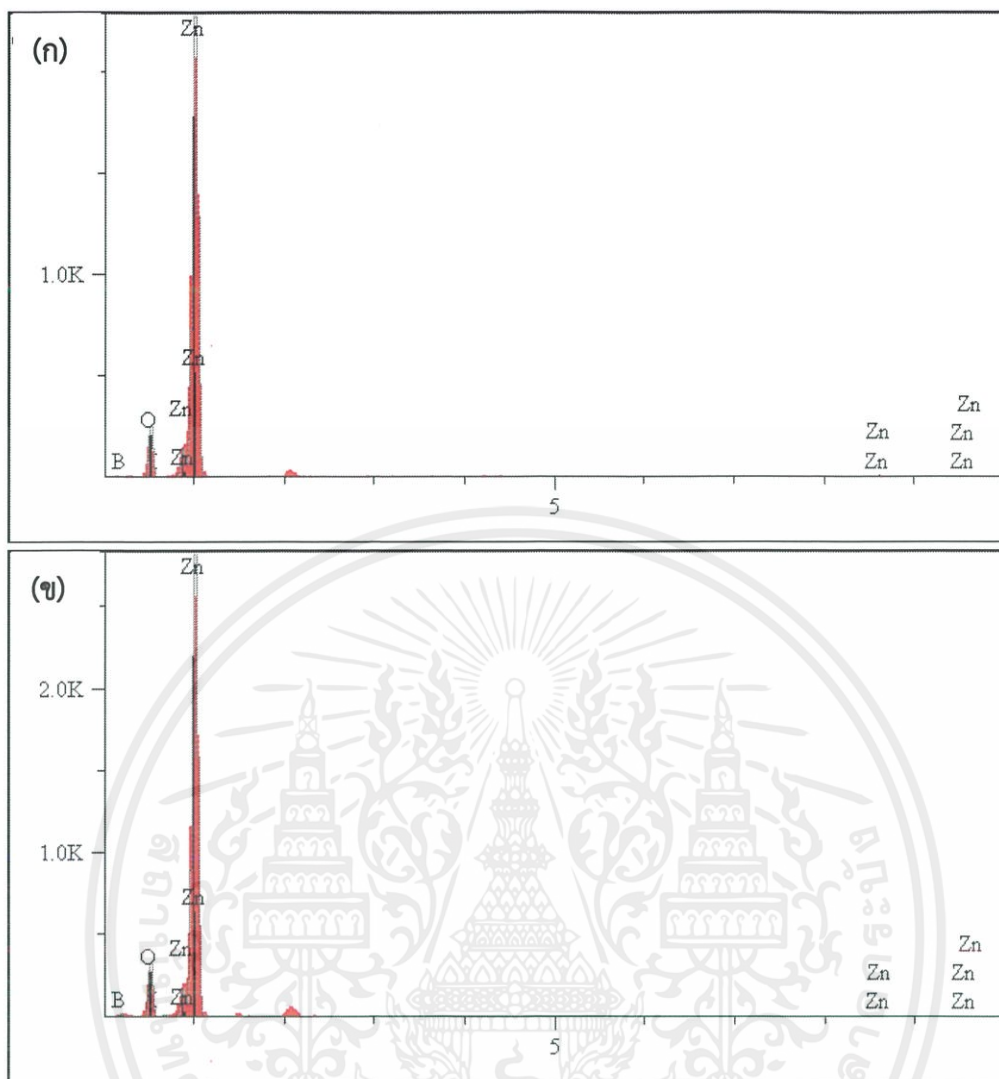
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการวัดขนาดอนุภาคด้วยรูป SEM ในเงื่อนไขการเจือด้วยโบรอนที่ 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุในผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีเอ็กซ์

จากการตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการยิงรังสีเอ็กซ์จะทำให้พบธาตุซิงค์จากพลังงานชั้น L_{α} ออกซิเจนจากชั้น K_{α} และโบรอนจากชั้น K_{α} จากรูปที่ 4.5(ก) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะพบพีคของซิงค์ร้อยละ 74.14 ออกซิเจนร้อยละ 18.73 และโบรอนร้อยละ 7.91 ส่วนในรูปที่ 4.5(ข) เป็นกระบวนการโซโนเคมีพบพีคของซิงค์ร้อยละ 52.31 ออกซิเจนร้อยละ 17.28 และโบรอนร้อยละ 30.38 จากทั้งสองกระบวนการสังเคราะห์นั้นพบองค์ประกอบของธาตุโบรอนทั้งคู่แต่ที่กระบวนการโซโนเคมีจะเจอโบรอนที่มากกว่า เนื่องจากการใช้เวลาเพียง 10 นาทีในการให้คลื่นเหนือเสียงแก่ระบบนั้นทำให้ไอออนของสารตั้งต้นยังคงเหลืออยู่ในระบบและไอออนของสารเจือเหล่านั้นจะจับกลุ่มกันและเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ เมื่อทำการตรวจวัดองค์ประกอบของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นพบธาตุโบรอนที่เป็นสารเจือได้มากกว่าในกระบวนการตกตะกอนร่วมที่ไอออนของโบรอนนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ [45,46]

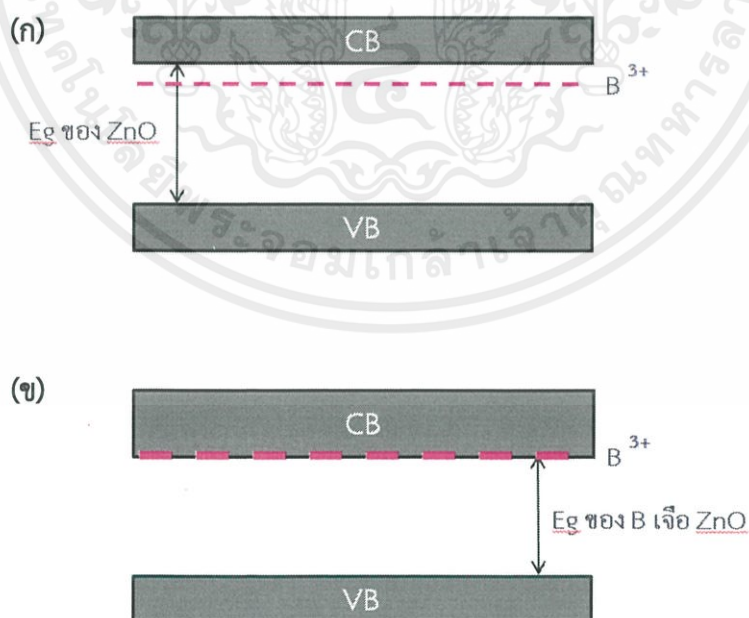


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณธาตุ ซิงค์ ออกซิเจน โบรอนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโหมดการสะท้อนของแสง

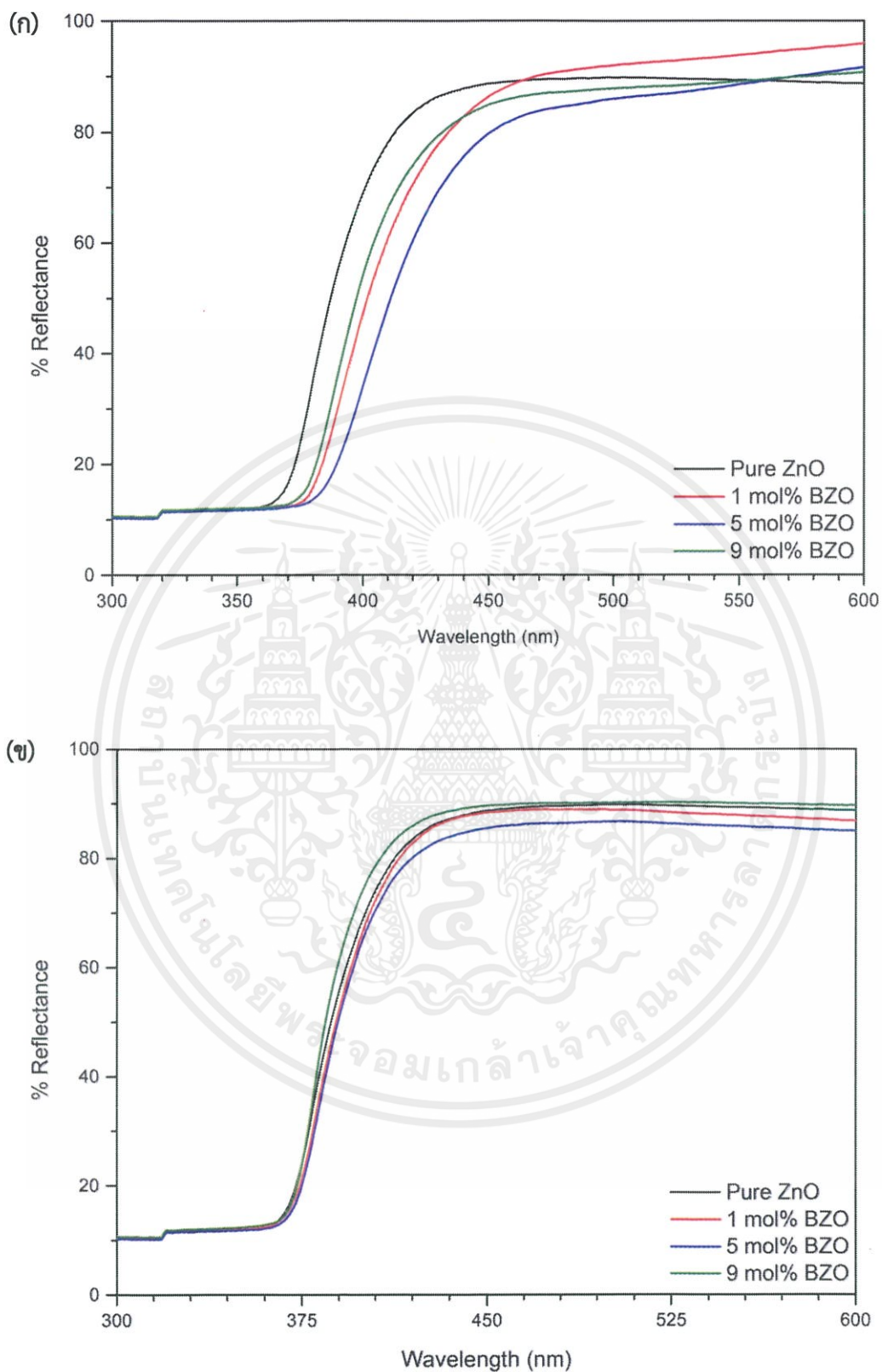
จากการตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการวัดการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วน 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.7(ก)-(ข) เป็นกราฟการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี จากการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะมีขอบการดูดกลืน (Absorbance edge) ที่เลื่อนไปทางที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น (red shift) เมื่อมีการเจือโบรอน ส่วนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นจะมีขอบการดูดกลืนที่ไม่แตกต่างกันเมื่อมีการเจือโบรอน ซึ่งสามารถนำไปหาช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy band gap : E_g) จากการคำนวณฟังก์ชันของ Kubelka Munk [47] แล้วนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{1-R}{1+R})^2$ และพลังงานโฟตอน ($h\nu$) สามารถหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้จากการหาความชันของเส้นกราฟที่มีความชันสูงสุดแล้วลากเส้นความชันนั้นตัดกับแกน x จะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน ดังรูปที่ 4.8 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 0, 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานเป็น 3.28, 3.19, 3.13 และ 3.21 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8(ก) จะพบว่าที่อัตราส่วน 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่แคบกว่าที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอน การเลื่อนของขอบการดูดกลืนไปทางด้านที่มีพลังงานมากขึ้นแสดงให้เห็นการมีอยู่ของโบรอนไอออนในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จากการที่แถบพลังงานของโบรอนไอออนนั้นรวมตัวกับแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของซิงค์ออกไซด์ ทำให้มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์นั้นที่แคบลง [48,49] ดังรูปที่ 4.6 และเป็นผลจากลักษณะสัญญาณวิทยาที่มีลักษณะเป็นแท่ง จากการที่ไอออนของโบรอนนั้นสามารถที่จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ซึ่งคาดว่าโบรอนไอออนน่าจะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างแบบแทรกระหว่างช่องว่างของซิงค์ไอออนและออกซิเจนไอออนที่เป็นโครงสร้างหลัก โดยมีขนาดไอออนของโบรอนเป็น 41 พิโคเมตร ขนาดไอออนของซิงค์เป็น 74 พิโคเมตร และออกซิเจนมีขนาดไอออนเป็น 140 พิโคเมตร ทำให้โครงสร้างผลึกนั้นเกิดการขยายตัวออกเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ [40,41] ซึ่งอาจจะส่งผลต่อขนาดผลึกที่ขนาดที่ใหญ่ขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(ข) เป็นการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีจะให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานเป็น 3.29, 3.27, 3.28 และ 3.27 อิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างไม่ต่างกัน เนื่องจากมีลักษณะสัญญาณที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นอนุภาคและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบอื่นๆ และคาดว่าไอออนของโบรอนอาจจะไม่ได้เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์เนื่องจากมีขนาดผลึกตามตารางที่ 4.1 ที่ไม่แตกต่างเมื่อไม่ได้เจือด้วยโบรอน ซึ่งสามารถที่จะยืนยันได้จากผลการตรวจวัดองค์ประกอบของธาตุที่พบปริมาณของโบรอนในกระบวนการโซโนเคมีที่มากกว่าในกระบวนการตกตะกอนร่วม



รูปที่ 4.6 แผนภาพช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ (ก) ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยโบรอนและ (ข) เมื่อเจือด้วยโบรอน

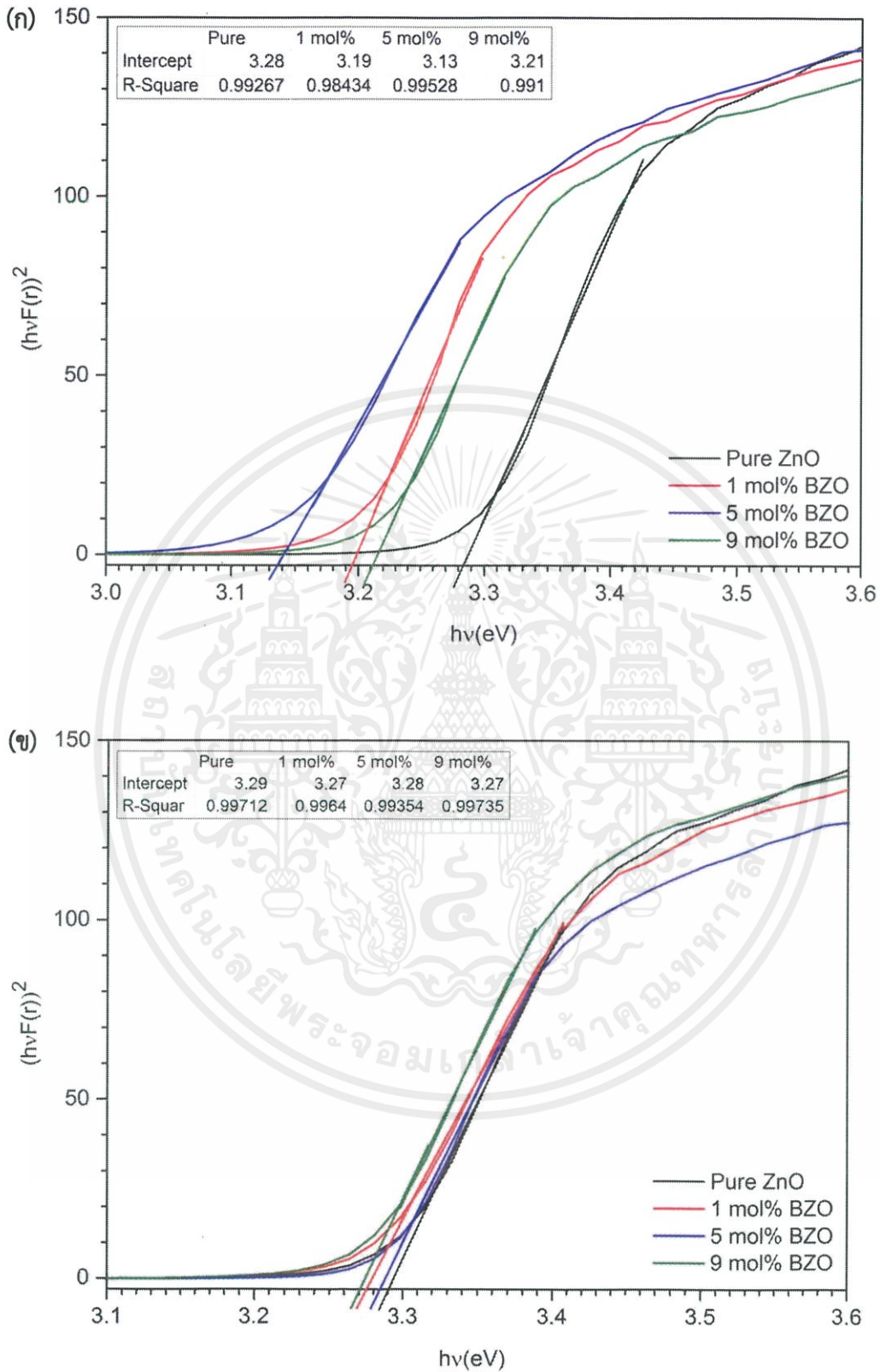
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟการสะท้อนทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจาก

(ก) ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์ไฮโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



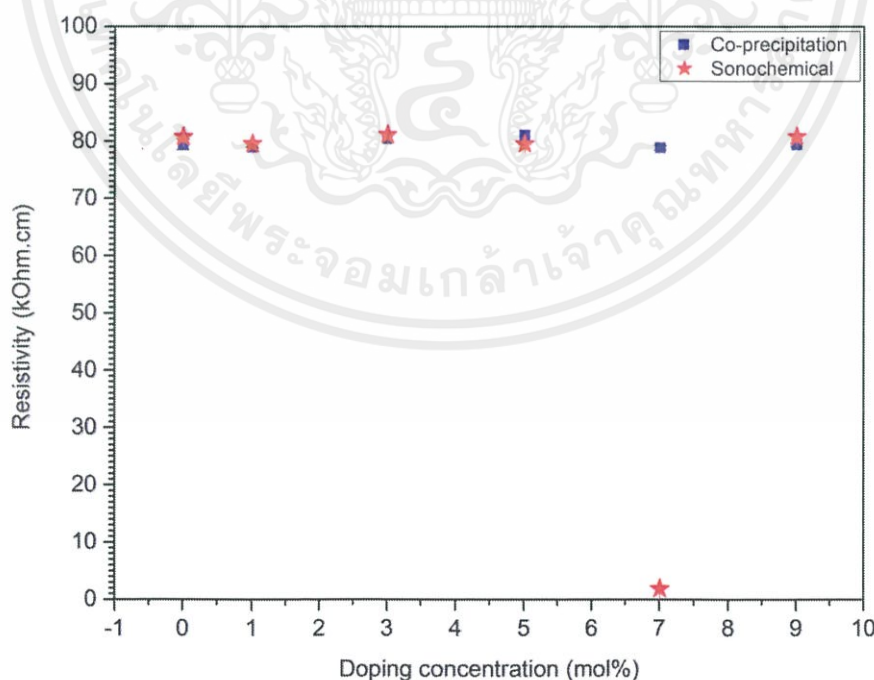
รูปที่ 4.8 ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจาก

(ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์ไฮโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคขั้วไฟฟ้า 4 จุด

จากการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์-ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน จากรูปที่ 4.9 สีเหลี่ยมสีน้ำเงินเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม พบว่าเมื่อเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็น 79.44, 78.93, 80.44, 81.03, 78.85 และ 79.43 กิโลโอห์มเซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการที่โบรอนไอออนเข้าไปแทรกในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จะทำให้มีไอออนของโบรอนที่มากเกินไปภายในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ ทำให้เป็นการเคลื่อนที่ของตำหนิ (Dislocation) หรือทำให้เกิดการแบ่งแยกที่ของเกรน (Grain Boundary) ส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง [50,51] และจากรูปที่ 4.9 ดาวสีแดงเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็น 80.71, 79.49, 81.10, 79.46, 1.84 และ 80.77 กิโลโอห์มเซนติเมตร เมื่อเจือโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้นตั้งแต่ 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีแนวโน้มค่าความต้านทานที่ไม่แตกต่างกันจากการที่โบรอนไอออนที่ไม่ได้สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้แล้วเกิดการรวมตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ [52] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสมบัติทางแสงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอน 7 โมลเปอร์เซ็นต์ นั้นจะให้ความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าที่เจือโบรอนอัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆ อาจจะเป็นผลมาจากการที่มีลักษณะสัญญาณวิทยาที่ไม่เหมือนกับที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นคืออาจเกิดเป็นลักษณะที่เป็นแผ่นหรือแท่งมากกว่าแบบอนุภาค [51]



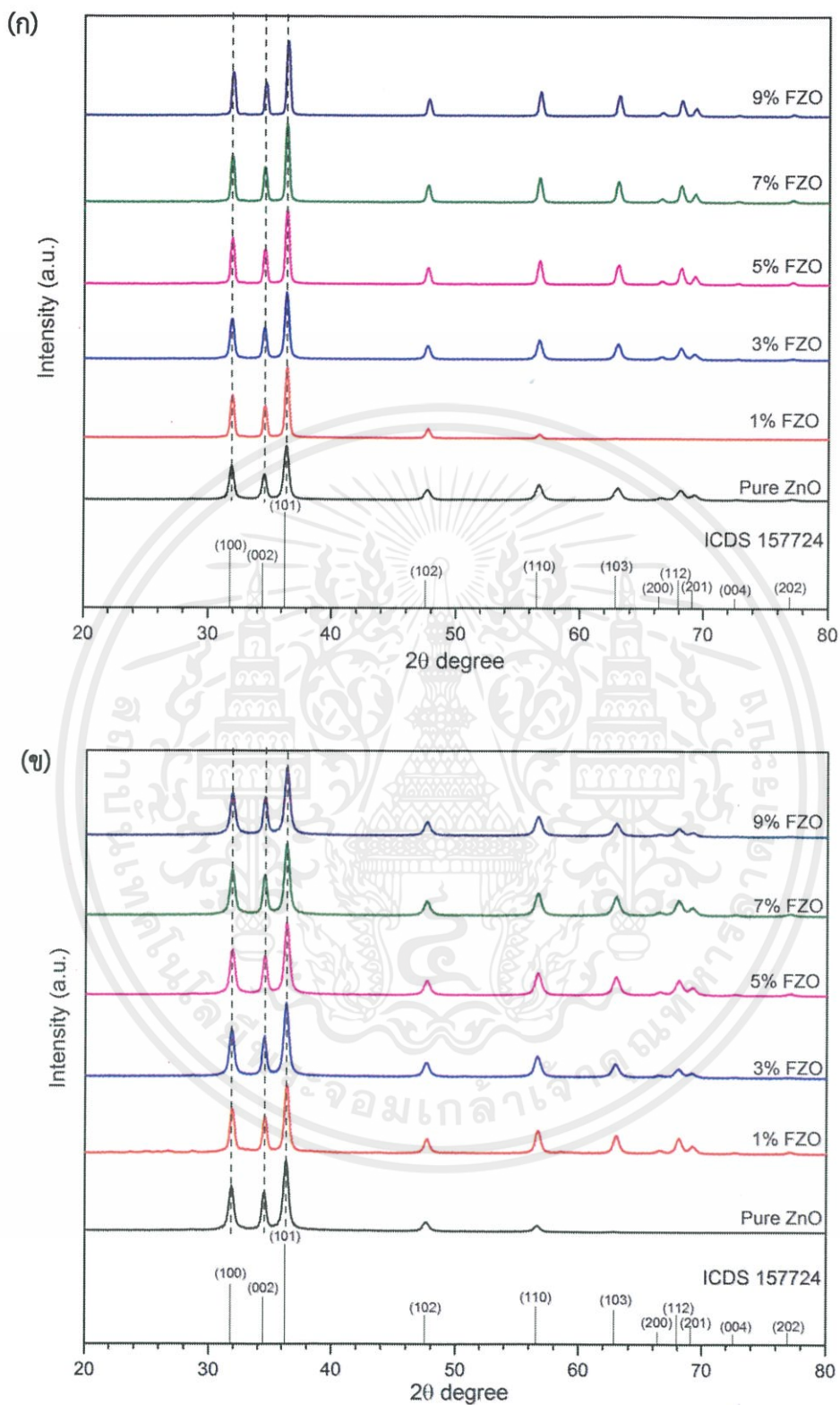
รูปที่ 4.9 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์

ที่เจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้พิมพ์/ผู้จำหน่าย โดยไม่อนุญาตให้มีการนำข้อความหรือรูปภาพไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

4.2 การวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน

4.2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี โดยมีการเจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.10 จากการนำเอารูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองกระบวนการมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์หมายเลข ICDS 157724 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล จะได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล มีระนาบผลึกเป็น (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) และ (202) ซึ่งสอดคล้องกับมุม 2θ เท่ากับ 31.7 34.4 36.2 47.5 56.5 62.8 66.3 67.9 69.0 72.5 และ 76.9 องศา ตามลำดับ ทั้งในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม ดังรูปที่ 4.10(ก) และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี ดังรูปที่ 4.10(ข) โดยในทุกอัตราส่วนความเข้มข้นของการเจือด้วยฟลูออรีนไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่น ๆ และไม่มีนัยสำคัญของการเลื่อนของพีค โดยสามารถคำนวณหาขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้จากสมการ Scherrer [29] โดยนำ 3 พีคหลักของรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์มาคำนวณจะได้ขนาดผลึกดังตารางที่ 4.2 พบว่าในเงื่อนไขที่มีการเจือฟลูออรีนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะให้ขนาดผลึกของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเมื่อมีการเจือด้วยฟลูออรีนจาก 20 นาโนเมตร เป็น 25, 24, 27, 31 และ 29 นาโนเมตร เมื่อมีอัตราส่วนการเจือเป็น 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นนั้นคาดว่ามาจากการรวมตัวกันของผลึกจากการได้รับความร้อนเนื่องจากการที่กระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นต้องมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ผลิตภัณฑ์และคาดว่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเข้าไปแทรกของไอออนฟลูออรีนในโครงสร้างหลักของซิงค์ออกไซด์ [53] โดยสามารถยืนยันการมีอยู่ของฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างได้จากสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า ส่วนในเงื่อนไขที่มีการเจือฟลูออรีนด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นมีขนาดผลึกที่ไม่แตกต่างกันตามตารางที่ 4.2 เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ไม่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเหมือนในกระบวนการตกตะกอนร่วมจึงไม่เกิดการรวมกันของผลึกภายในกระบวนการตกตะกอนร่วม



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

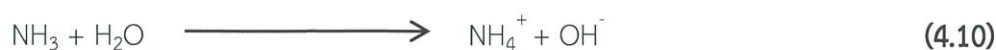
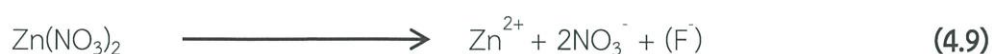
ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี

อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (นาโนเมตร)	
	กระบวนการตกตะกอนร่วม	กระบวนการโซโนเคมี
0	20	19
1	25	21
3	24	20
5	27	19
7	31	20
9	29	19

4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่การเจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม ดังรูปที่ 4.11(ก)-(ข) จะได้ว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือฟลูออรีนจะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลมที่รวมตัวกันที่มีขนาดประมาณ 143.3 นาโนเมตร และเมื่อมีการเจือฟลูออรีนที่ 1 โมลเปอร์เซ็นต์นั้นจะมีทั้งเป็นอนุภาคที่กระจายตัวอยู่กับแ่งส่วนที่เจือฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์มีความยาวของแ่งประมาณ 225.8 และ 760.8 นาโนเมตรตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11(ค)-(ง) และรูปที่ 4.13 โดยการเกิดเป็นอนุภาคหรือแ่งซิงค์ออกไซด์เกิดจากการแตกตัวของสารละลายซิงค์ไนเตรตได้เป็นซิงค์ไอออนและไนเตรตไอออนและสารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ได้เป็นฟลูออรีนไอออนตามสมการที่ 4.9 ส่วนแอมโมเนียในสารละลายตามสมการที่ 4.10 จะเกิดการแตกตัวกลายเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน สารละลายซิงค์ไนเตรตและสารละลายแอมโมเนียมจะผสมกันดังสมการที่ 4.11 จะเกิดการรวมตัวกันของซิงค์ไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนได้เป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์และเกลือไนเตรตที่ละลายน้ำ หลังจากนั้นต้องนำซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการรวมตัวกันของไอออนในสารละลายแล้วต้องนำมาผ่านการให้ความร้อนเพื่อไล่ไฮดรอกไซด์ไอออนออกดังสมการที่ 4.12 และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นซิงค์ออกไซด์โดยการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของฟลูออรีนนั่นจะทำให้ได้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ปริมาณมากขึ้นส่งผลต่อไฮดรอกไซด์ไอออนเกาะพื้นผิวระนาบ (0001) ที่มากขึ้นทำให้ซิงค์ไอออนมาจับเกิดเป็นแ่งที่ยาวขึ้นดังตามรูปที่ 4.11 [42]

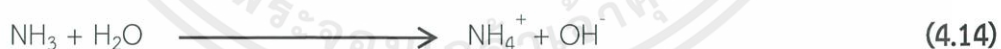
สมการแสดงการเกิดกระบวนการตกตะกอนร่วมที่เจือด้วยฟลูออรีน [43]



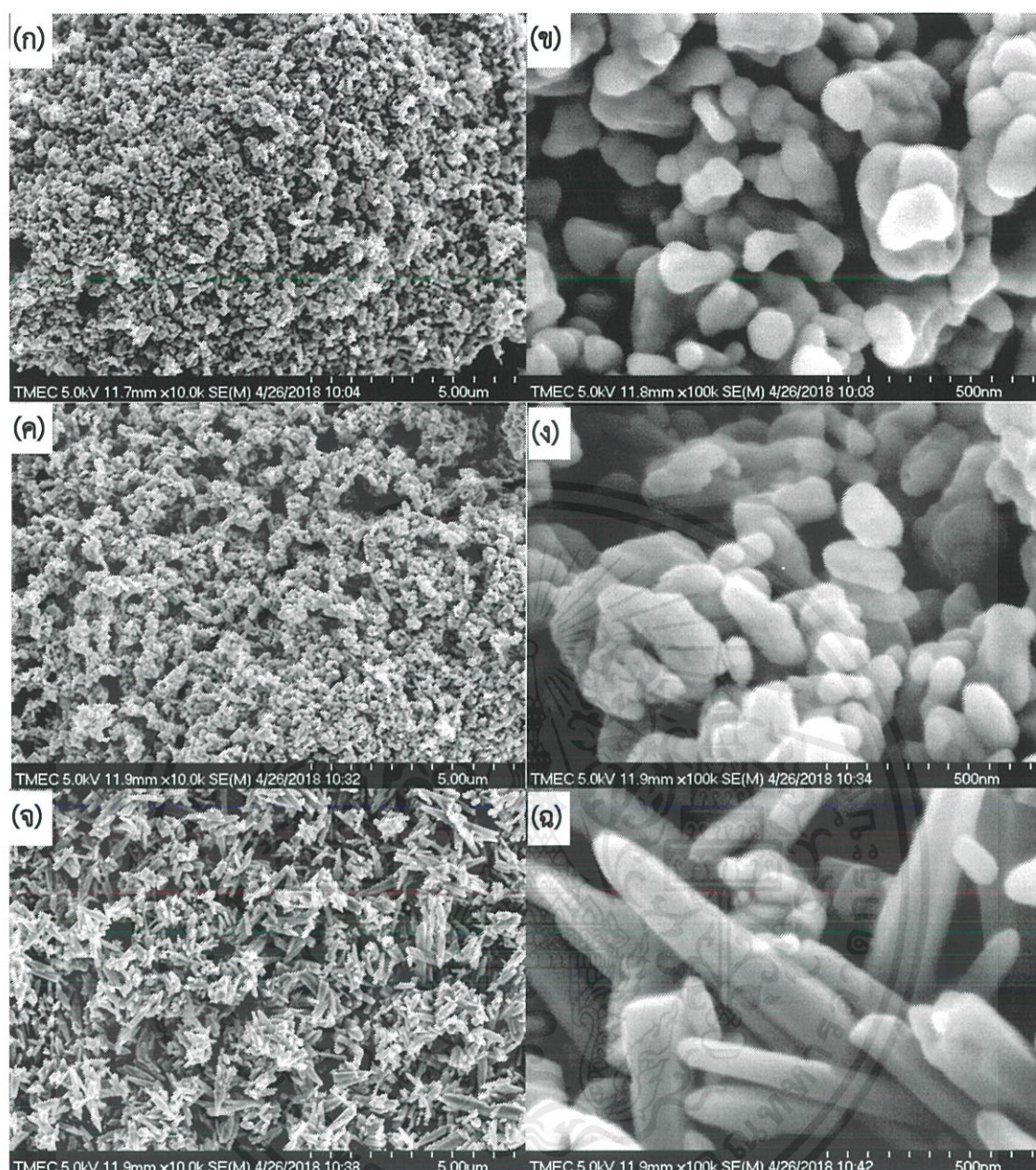
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีจะได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการเจือฟลูออรีนที่ 1 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือดังรูปที่ 4.12(ก)-(ง) และยังประกอบด้วยลักษณะสัณฐานวิทยาแบบดิส (nanodisks) เล็กน้อยปนกันไปกับอนุภาค ซึ่งการเกิดลักษณะสัณฐานวิทยาแบบดิสเนื่องจากที่บริเวณนั้นอาจมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่น้อยจึงส่งผลต่อการก่อตัวขึ้นและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานพื้นผิวที่ระนาบ (0001) ทำให้มีการก่อตัวเป็นแท่งที่น้อยลง [54,55] และที่เจือฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 4.12(จ)-(ฉ) จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.13 เมื่อเจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นจะมีขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน คือ 86.4, 77.9 และ 80.4 นาโนเมตร ส่วนการเกิดเป็นอนุภาคซิงค์ออกไซด์ของกระบวนการโซโนเคมีในสมการที่ 4.13-4.14 จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเช่นเดียวกับในกระบวนการตกตะกอนร่วม แต่เมื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์แล้วในสมการที่ 4.15 เมื่อให้คลื่นเหนือเสียงที่มีพลังงานสูงที่ทำให้เกิดการโตและแตกออกของฟองอากาศในสารละลายเป็นผลทางเคมีจากอะคูสติก คาวิตชันนั้น ส่งผลต่อพลังงานภายในระบบและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการแตกออกของฟองอากาศเป็นการไล่ไฮดรอกไซด์ไอออนออกจากโมเลกุลซิงค์ไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ออกไซด์ตามสมการที่ 4.16 ปริมาณที่มากขึ้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบทำให้ซิงค์ออกไซด์เกิดเป็นแท่งที่ยาวขึ้นเมื่อซิงค์ไอออนมาจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกาะอยู่ที่ระนาบ (0001) แต่การให้คลื่นเหนือเสียงจะไปรบกวนการก่อตัวเป็นแท่งซิงค์ออกไซด์จากการเกิดพลังงานให้ทุกทิศทางจึงทำให้มีลักษณะเป็นแท่งที่น้อยกว่าในกระบวนการตกตะกอนร่วม [42]

สมการแสดงการเกิดกระบวนการโซโนเคมีที่เจือด้วยฟลูออรีน [44]

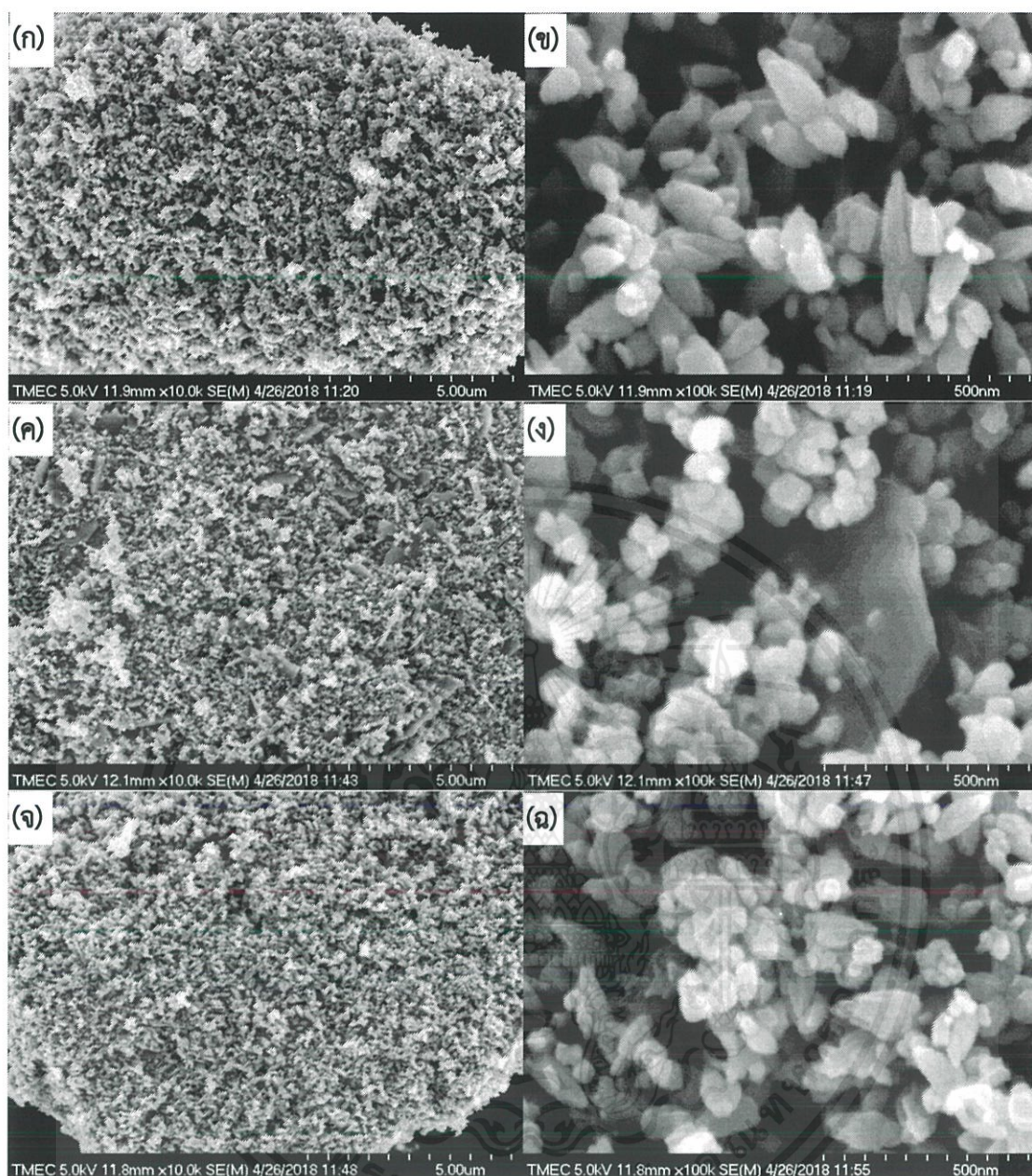


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



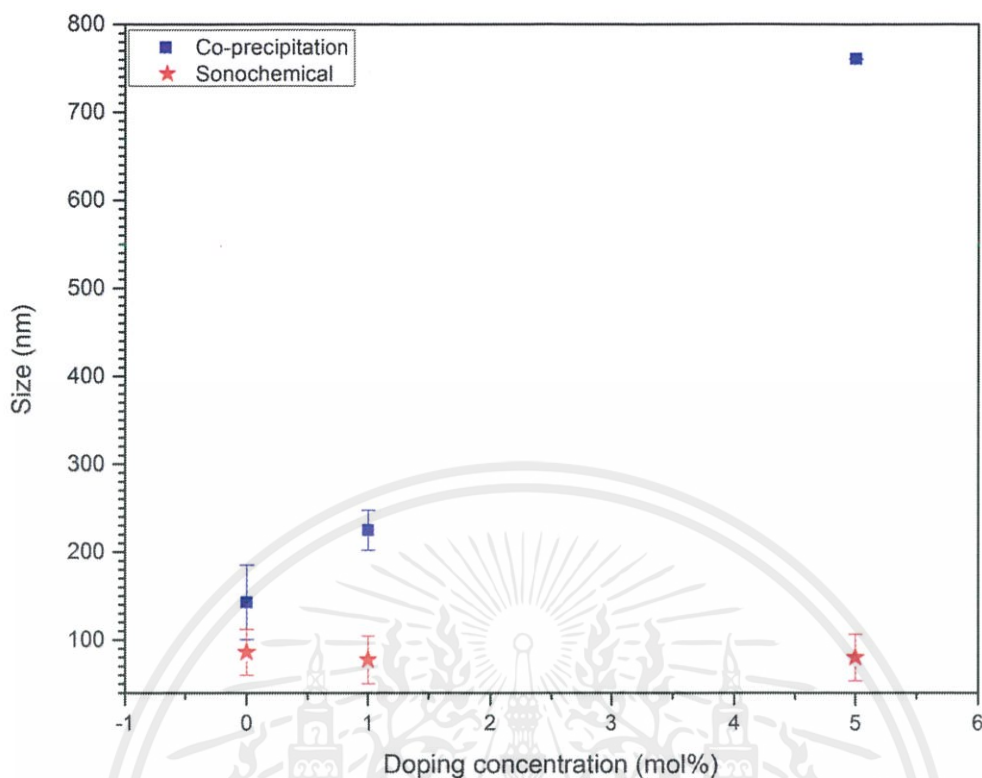
รูปที่ 4.11 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10k และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100k

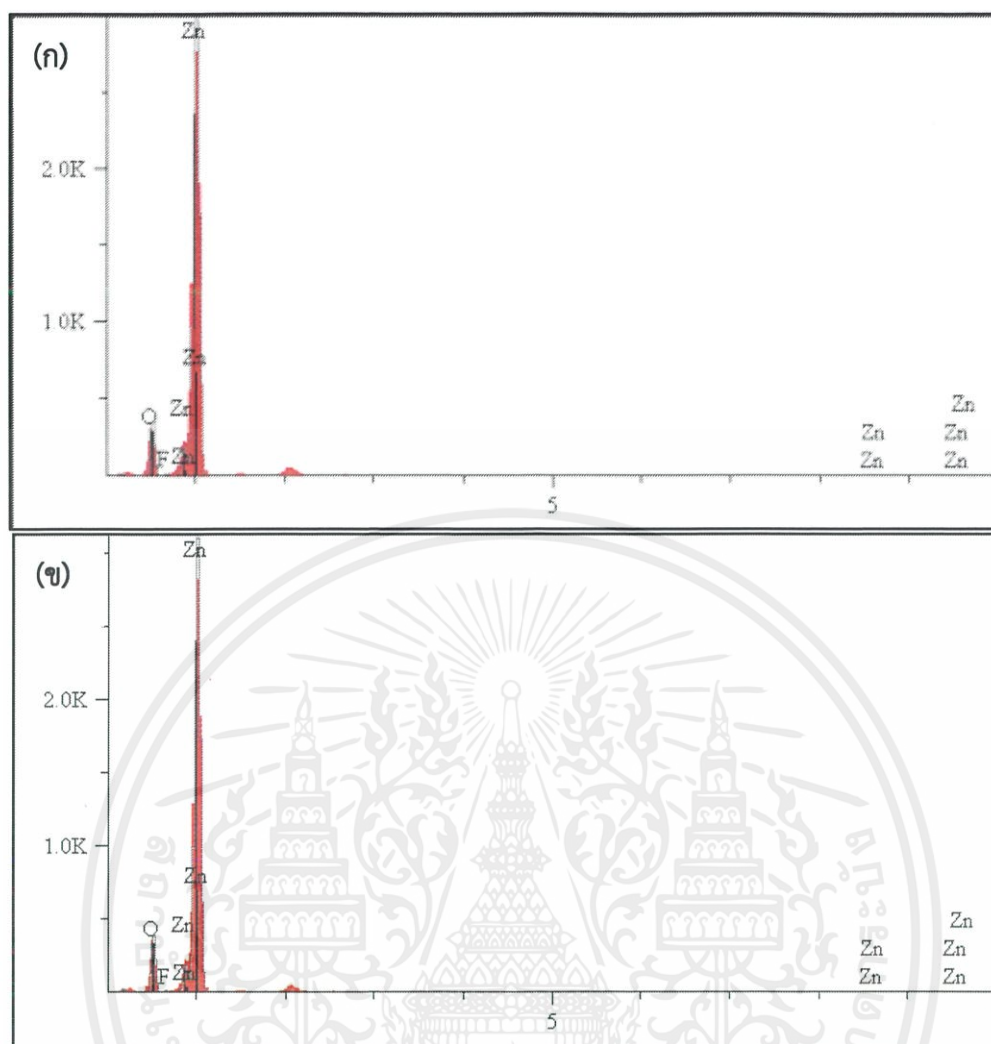
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการวัดขนาดอนุภาคด้วยรูป SEM ในเงื่อนไขการเจือด้วยฟลูออรีนที่ 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี

4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุในผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีเอ็กซ์

จากการตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยเครื่อง วิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปจะพบให้พบธาตุซิงค์จากพลังงานชั้น L_{α} ออกซิเจนจากชั้น K_{α} และฟลูออรีนจากชั้น K_{α} อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะพบพีคซิงค์ร้อยละ 62.55 ออกซิเจนร้อยละ 27.19 และฟลูออรีนร้อยละ 10.23 ดังรูปที่ 4.14(ก) และในรูปที่ 4.14(ข) เป็นการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีพบพีคของซิงค์ร้อยละ 60.22 ออกซิเจนร้อยละ 28.68 และฟลูออรีนร้อยละ 11.08 ซึ่งทั้งสองกระบวนการนั้นพบองค์ประกอบของธาตุฟลูออรีนแต่ที่กระบวนการโซโนเคมีจะมีค่ามากกว่าเนื่องจากกระบวนการโซโนเคมีนั้นใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์เพียง 10 นาทีทำให้ไอออนของสารตั้งต้นยังคงเหลือในระบอบอยู่และไอออนของสารเจือนั้นชอบรวมกลุ่มกันและเกาะที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์แทนจึงทำให้เมื่อทำการตรวจวัดองค์ประกอบของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นพบธาตุฟลูออรีนที่เป็นสารเจือในกระบวนการโซโนเคมีได้มากกว่ากระบวนการตกตะกอนร่วมที่ไอออนสารเจือสามารถที่จะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้ [45,46]

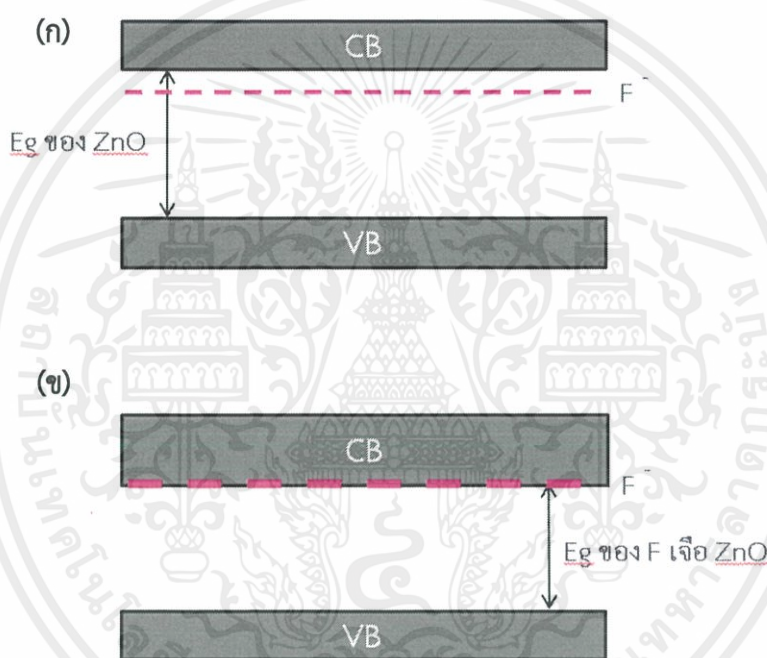


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงปริมาณธาตุ ซิงค์ ออกซิเจน และฟลูออรีนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ (ก) สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและ (ข) สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโหมตการสะท้อนของแสง

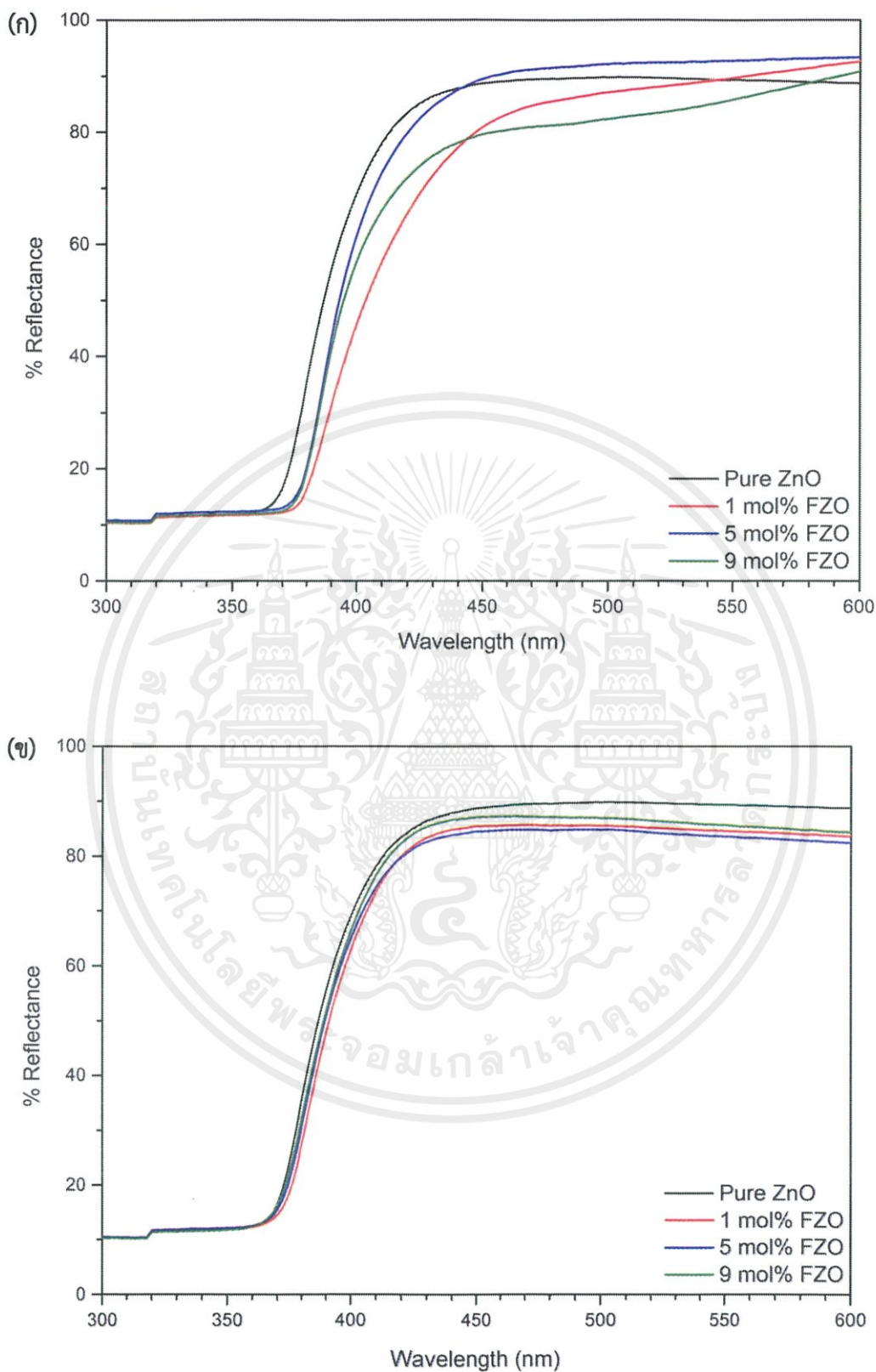
จากการตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมตการวัดการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ จะได้กราฟการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ผลิตภัณต์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมมีขอบการดูดกลืนที่เลื่อนไปทางที่มีพลังงานต่ำลง ดังรูปที่ 4.16(ก) ส่วนการสังเคราะห์ผลิตภัณต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้น มีขอบการดูดกลืนที่ไม่แตกต่างกันเมื่อมีการเจือฟลูออรีน ตามรูปที่ 4.16(ข) และจากกราฟการสะท้อนแสงสามารถที่นำไปคำนวณหาค่าช่องว่างของแถบพลังงาน จากการคำนวณสมการของ Kubelka Munk [47] แล้วนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{1-R}{1+R})^2$ และพลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้จากการหาความชันของเส้นกราฟที่มีความชันสูงสุดแล้วลากเส้นความชันนั้นตัดกับแกน x จะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน ดังรูปที่ 4.17(ก) เป็นการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมที่มีการเจือ 0, 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานเป็น 3.28, 3.20, 3.22 และ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดยมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างของแถบพลังงานที่แคบลงในเงื่อนไขที่มีการเจือด้วยฟลูออรีน เนื่องจากเกิดตำหนิภายในผลึกจากการเข้าไปแทรกของฟลูออรีนไอออนที่มีขนาดไอออน 134 พิโคเมตร ในช่องว่างระหว่างแลตทิซของซิงค์และออกซิเจนทำให้เกิดเป็นตำหนิแบบการเคลื่อนที่ของตำหนิและการแทรกของไอออนฟลูออรีนส่งผลทำให้ขนาดผลึกมีค่าที่ใหญ่ขึ้นดังตารางที่ 4.2 [53] ซึ่งการมีอยู่ของฟลูออรีนในโครงสร้างหลักและลักษณะสัญญาณวิทยาที่เป็นแบบแท่งนั้นทำให้สมบัติทางแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปคือเกิดการรวมกันของแถบพลังงานของฟลูออรีนไอออนและแถบนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ทำให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่แคบลงตามรูปที่ 4.15 [56] ส่วนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีตามรูปที่ 4.17(ข) จะให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ไม่แตกต่างกัน คือ 3.29, 3.25, 3.27 และ 3.28 อิเล็กตรอนโวลล์ เนื่องจากมีลักษณะสัญญาณวิทยาที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นอนุภาคและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอื่นๆและอาจไม่เกิดการเข้าไปในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์



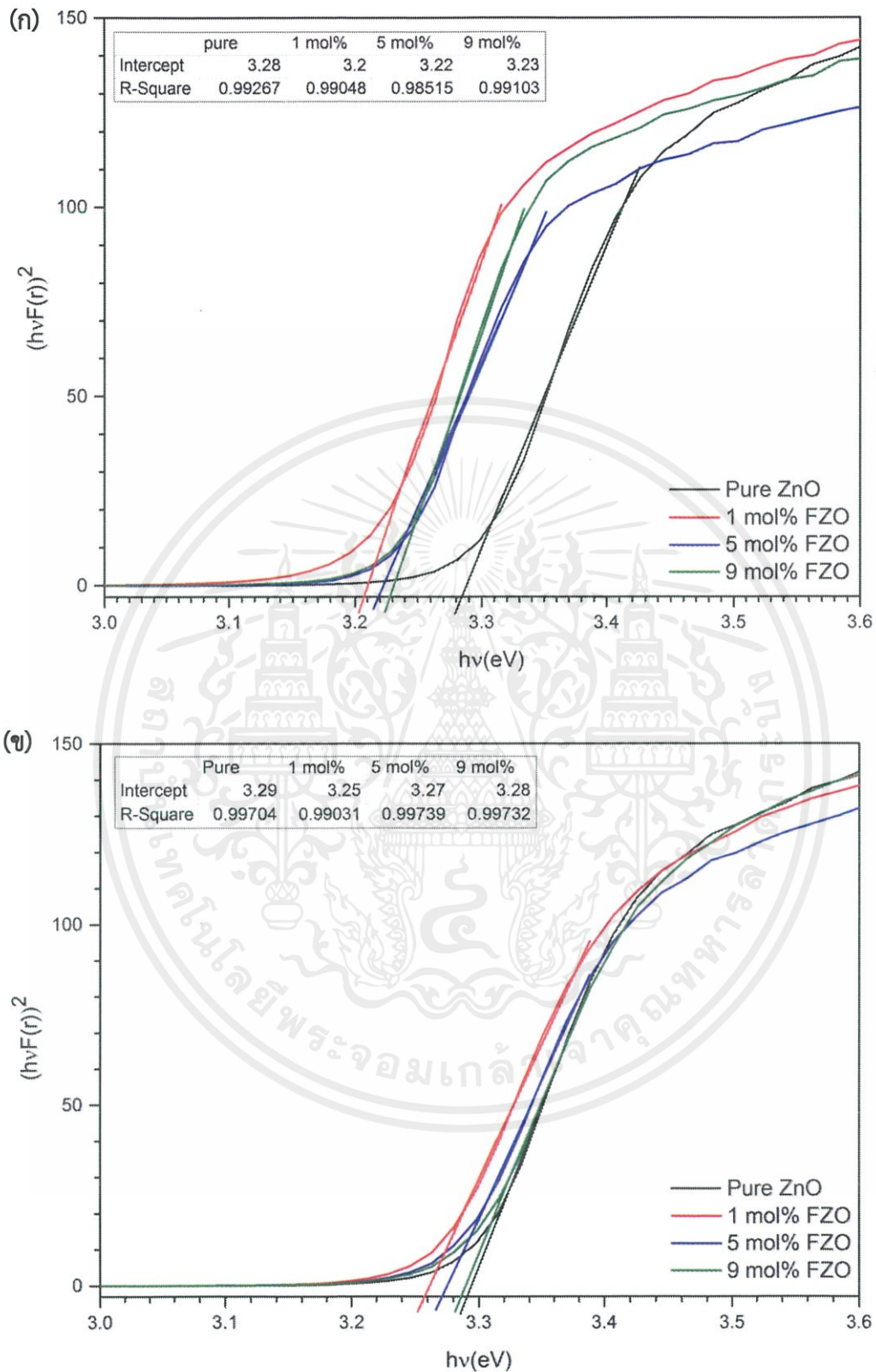
รูปที่ 4.15 แผนภาพช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์
(ก) ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยฟลูออรีนและ (ข) เมื่อเจือด้วยฟลูออรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟการสะท้อนทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนจาก (ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



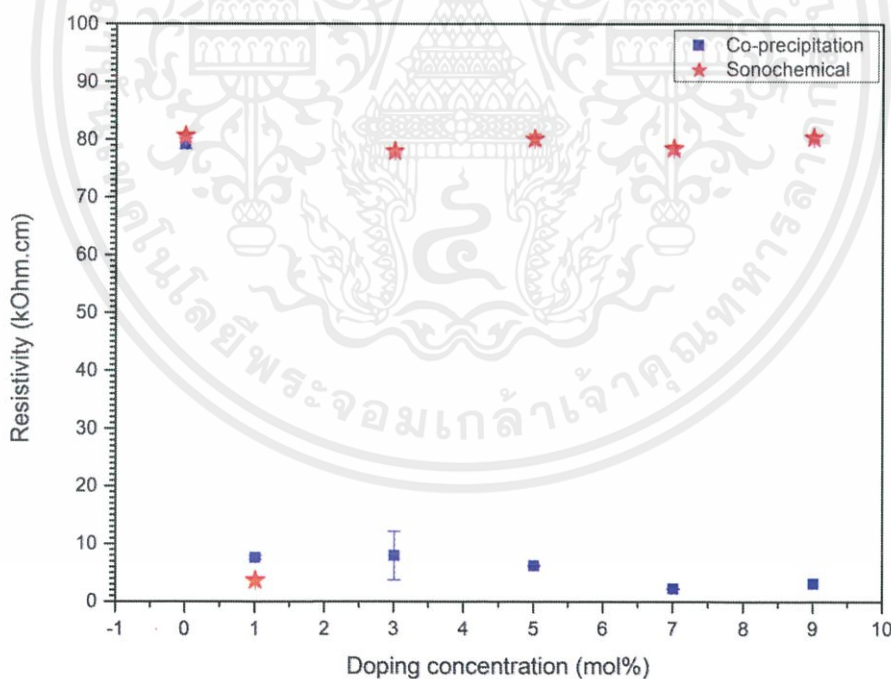
รูปที่ 4.17 ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจาก

(ก) กระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วมและ (ข) กระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีวีไฟฟ้า 4 จุด

จากการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์-ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะได้ว่าเมื่อทำเจือฟลูออรีนเข้าไปในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ทำให้สภาพความต้านทานทางไฟฟ้านั้นลดต่ำลงจากที่ไม่ได้ทำการเจือที่มีความต้านทาน 79.44 กิโลโห์มเซนติเมตร เป็น 7.61, 7.93, 6.16, 2.22 และ 3.08 กิโลโห์มเซนติเมตร เมื่อเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วน 1, 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 สี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน การลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเกิดจากการเข้าไปแทรกในโครงสร้างหลักของฟลูออรีนไอออนเกิดเป็นตำหนิภายในผลึกส่งผลต่อช่องว่างของแถบพลังงานแคบลงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น [56] และเมื่อทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีจากรูปที่ 4.18 ดาวสีแดงแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือด้วยฟลูออรีนนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ต่างกัน คือ 80.71, 3.64, 78.05, 80.14, 78.53 และ 80.51 กิโลโห์มเซนติเมตรเนื่องจากฟลูออรีนไอออนไม่ได้อยู่ในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์แต่จะพบว่าที่เจือฟลูออรีน 1 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ลดลงเป็น 3.64 กิโลโห์มเซนติเมตร จากการที่มีลักษณะสัณฐานวิทยานั้นมีรูปแบบที่เป็นแผ่นแบบดีสอยู่ด้วยทำให้มีการนำพาได้ดีกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคและแห้งอาจจะเป็นผลมาจากการที่อิเล็กตรอนอิสระสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปมาบนแบบแผ่นได้ง่ายกว่า [57]



รูปที่ 4.18 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นำไฟฟ้าด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี เพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือของธาตุในหมู่ IIIV คือโบรอน และ หมู่ VII คือฟลูออรีน ในอัตราส่วนความเข้มข้นตั้งแต่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองนี้ได้กำหนดให้สารละลายมีค่าเป็นเบสที่ pH 9 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ได้ลักษณะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เป็นอนุภาคมาก

ผลจากการศึกษาการเจือโบรอนลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมีที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ และมีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกของโบรอนไอออนในโครงสร้างหลัก ลักษณะสัณฐานวิทยาที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปทำให้มีลักษณะที่เป็นแท่ง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นที่ 5 โมลเปอร์เซ็นต์จะได้ลักษณะเป็นกลุ่มคล้ายดอกไม้และทำการวัดองค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยโบรอนที่ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและโบรอน ส่วนสมบัติทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เมื่อเจือโบรอนทำให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานมีค่าที่ต่ำลงโดยที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.13 อิเล็กตรอนโวลต์และสมบัติทางไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกันของความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปไม่แสดงว่าการเจือโบรอนเข้านั้นไม่ส่งผลสมบัติทางไฟฟ้าแต่มีผลต่อสมบัติทางแสงเพียงเท่านั้นและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ แต่ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ นั้นมีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการแทรกของโบรอนไอออนในโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับในกระบวนการตกตะกอนร่วมหรือจากการรวมตัวกันของไอออนในขั้นตอนการสังเคราะห์ ลักษณะสัณฐานวิทยามีลักษณะที่เป็นอนุภาคที่รวมตัวกันและมีบางส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่ง พบองค์ประกอบของธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและโบรอนของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่วนสมบัติทางแสงมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่มีค่าไม่ต่างกันเมื่อมีการเจือและสมบัติทางไฟฟ้าจะมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ จากการที่ขนาดของผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆแสดงว่าลักษณะสัณฐานวิทยาอาจมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลจากการศึกษาการเจือฟลูออรีนลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี โดยมีอัตราส่วนความเข้มข้นตั้งแต่ 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมให้โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆเช่นเดียวกับที่เจือด้วยโบรอน ขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการแทรกของฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จากการที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาเปลี่ยนจากอนุภาคกลายเป็นแท่งส่งผลต่อสมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงทำให้มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำลงโดยที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์และส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าทำให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำลงเมื่อเจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ประมาณ 2.22 กิโลโห์มเซนติเมตร ส่วนการวัดองค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและฟลูออรีน และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีให้โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ มีขนาดผลึกที่ไม่ต่างกันจากการที่ไม่เกิดการแทนที่กันระหว่างฟลูออรีนและออกซิเจนไอออนหรือการแทรกในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลทางลักษณะสัญญาณวิทยาว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อทำการเจือฟลูออรีน องค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและฟลูออรีน ในส่วนของสมบัติทางแสงจะมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ไม่แตกต่างกันและสมบัติทางไฟฟ้าที่มีแนวโน้มของความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเจือฟลูออรีนเข้าไป ยกเว้นที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1 โมลเปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.64 กิโลโห์มเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาว่ามีรูปร่างบางส่วนเป็นรูปแบบดีสทำให้มีความต้านทานที่ต่ำลงได้จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระได้ง่าย

จากการทดลองสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมีนั้นพบว่า การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงสามารถที่จะทำให้สารที่เจือนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้ส่งผลทำให้ลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป แต่การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากซิงค์ไฮดรอกไซด์เป็นซิงค์ออกไซด์ ส่วนในกระบวนการโซโนเคมีนั้นใช้เวลาเพียง 10 นาที อาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้สารที่เจือนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างหลักของซิงค์ออกไซด์ได้หรือมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัญญาณวิทยาวงจรจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ แต่เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย ให้ขนาดของอนุภาคที่เล็กและไม่ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการที่ให้คลื่นเหนือเสียงเข้าไปจะทำให้ฟองอากาศมีการเกิด โต้และแตกออกภายในระบบได้เป็นพลังงานและอุณหภูมิภายในระบบที่สูงเพียงพอกับการทำให้มีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นซิงค์ออกไซด์ได้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

5.2.1 เมื่อใช้งานโพรบโซโนคอร์ทจะทิ้งระยะเวลาเพื่อให้ตัวโพรบนั้นได้เย็นตัวก่อนที่จะใช้งานต่อไป ป้องกันการหยุดทำงาน (Over load) ระหว่างทำการใช้งาน

5.2.2 สารที่จะทำการอัดเม็ดเกิดความชื้นต้องทำการอบสารก่อนนำไปอัดเม็ดเพื่อไล่ความชื้นหรือใส่ขวดที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการดูดความชื้น

5.2.3 ในการล้างค่า pH ของตะกอนเพื่อให้เป็นกลางนั้น ควรที่จะล้างตะกอนให้มีค่า pH เท่ากับน้ำปอดประจู่ที่ใช้ เพื่อให้แน่ใจว่าตะกอนที่ได้นั้นจะไม่เหลือความเป็นเบสตกค้างอยู่

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 นำอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อยืนยันว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปจึงส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า

5.3.2 ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นจะต้องทำการเพิ่มเวลาในการให้พลังงานคลื่นเหนือเสียงที่มากกว่า 10 นาที เพื่อให้เกิดพลังงานภายในระบบที่มากพอเพื่อให้เกิดการแทนที่กันของไอออน และต้องลดกำลังของพลังงานคลื่นเหนือเสียงลงเนื่องจากข้อจำกัดในการใช้โพรบโซโนเคมี โดยทำการทดลองซ้ำกับการเจือด้วยโบรอนและฟลูออรีน



บรรณานุกรม

- [1] ศุภมาส ตำนานวิทยากุล. “ซิงค์ออกไซด์วัสดุนาโนประสม”. MTEC. 13-22. 2016.
- [2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. [กันยายน 2560]. ลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์. [online]. Available from : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nano-database/info2.php?cat_id=2&p_id=130
- [3] Naveed Ul Haq, A., et al. “Synthesis Approaches of Zinc Oxide Nanoparticles : The Dilemma of Ecotoxicity”. Journal of Nanomaterials. 1-14. 2007.
- [4] สิริพัฒน์ ประโชนเทพ. 2004 [กันยายน 2560]. นาโนเทคโนโลยี...คืออะไรกันแน่?. [online]. Available from : <http://www.vcharkarn.com/varticle/189>.
- [5] ญัฐพันธ์ ศุภกา. 2006 [กันยายน 2560]. นาโนเทคโนโลยีคืออะไร?. [online]. Available from : <http://www.vcharkarn.com/varticle/324>.
- [6] V. Pokropivny, R. Lohmus, I. Hussainova, A. Pokropivny, S. Vlassov. Introduction to nanomaterials and nanotechnology. Tartu: Tartu University Press. 2007.
- [7] Faye Jones. [September 2017]. Piezoelectronic properties of ZnO and its potential to power nanotech. [online]. Available from : <http://blogs.hmc.edu/vanheuvelen/the-elements/piezoelectronic-properties-of-zno-and-its-potential-to-power-nanotech-by-faye-jones/>.
- [8] Azonano. 2013 [September 2017]. Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles – Properties Applications [online]. Available from: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3348>
- [9] Mathematics. 2013 [September 2017]. Boron [online]. Available from: <http://periodictable.com/Elements/005/index.html>.
- [10] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. หนังสือสารานุกรมธาตุโบรอน.
- [11] Mathematics. 2013 [September 2017]. Flourine [online]. Available from: <http://periodictable.com/Elements/009/index.html>.
- [12] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. หนังสือสารานุกรมธาตุฟลูออรีน.
- [13] Christian Ngô, Marcel Van de Voorde. Nanotechnology in a Nutshell: From Simple to Complex Systems. Atlantic press. 2014.
- [14] Ran Liu, Jonathon Duay and Sangbok Lee. “Heterogeneous nanostructured electrode materials for electrochemical energy storage”. Chemical Communication. 47: 1384-1404. 2011.
- [15] Prof. Sunil Khijwania. 2014. [May 2018]. Precipitation and Co-precipitation. [online]. Available from: <http://nptel.ac.in/courses/103103026/7#>
- [16] Gregory Chatel, Liudmila Novikova and Sabine Petit “How efficiently combine sonochemistry and clay science”. Applied Clay Science. 119: 193-201.2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] Nimesh Pokhrel, Phani Kiran Vabbina and Nezih Pala. "Review : Sonochemistry: Science and Engineering". *Ultrasonics Sonochemistry*. 29: 104-128. 2014.

[18] Intrustrial Sonomechanics. [September 2017]. Ultrasonic horn designs and properties [online]. Available from: http://sonomechanics.com/technology/ultrasonic_horn_designs_and_properties/.

[19] K. S. Suslick, M. M. Fang, T. Hyeon and M. M. Mdeleleni "Applications of Sonochemistry to Materials Synthesis". *Sonochemistry and Sonoluminescence*. 291-320. 1999.

[20] Timothy J. Mason. "Ultrasound in synthetic organic chemistry". *Chemical society*. 26. 443-451. 1997.

[21] Mark Waldrep. 2014 [September 2017]. Ultrasonic [online]. Available from: <http://www.realhd-audio.com/?p=2465>.

[22] Mozart Ultrasonic. [September 2017]. How does ultrasonic cleaning work [online]. Available from: <http://ultrasonicmachines.com/about-ultrasonics/how-does-ultrasonic-cleaning-work/>.

[23] Hielscher ultrasound technology. [September 2017]. Sonochemical [online]. Available from: https://www.hielscher.com/th/sonochem_01.htm.1.

[24] William D. Callister. *Materials Science and Engineering An Introduction*. Quebecor: John Wiley & Sons, Inc. 2007.

[25] ศุภกาญจน์ กิจอำนาจสุข, เกียรติกร สุพรรณพงษ์ และ กฤษณา นาทีเลิศ. [กันยายน 2560]. เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. [online]. Available from : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray>.

[26] เกียรติพงษ์ ได้การ. [กันยายน 2560]. X-ray Diffraction XRD. [online]. Available from: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu.html>.

[27] [September 2017]. X-ray Powder Diffraction (XRD) [online]. Available from: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html

[28] [กันยายน 2560]. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) [online]. Available from: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>

[29] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. "การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-ray Diffraction". *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 62(194): 34-35. 2557.

[30] [September 2017]. ABC's of the Diffuse Reflection Method (online). Available from: <http://www.shimadzu.com/an/ftir/support/ftirtalk/talk1/intro.html>

[31] *Handbook of analytical methods for materials. Materials evaluation and engineering*, Inc. 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[32] หัสวีภา หมายมั่น. (กันยายน 2560). Scaning electron microscope : SEM [online]. Available from : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>

[33] Michael V. Martinez. [September 2017]. A basic understanding of Scaning electron microscopy (SEM) and Energy dispersive X-ray detection (EDX) [online]. Available from : <http://www.forensicevidence.net/iama/sem-edxtheory.html>

[34] เจริญชัย เหลืองอ่อน. การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 74-79. 2554.

[35] R. Gonzalez-Hernandez, Arturo I. Meatinez, C. Falcony, A.A. Lopez, M.I. Pech-Canul and H.M. Hdz-Garcia. "Study of the properties of undoped and fluorine doped zinc oxide nanoparticle". Material letter. 64. 1493-1495. 2010.

[36] Chun-Xiu He, Bing-Xin Lei, Yu-Fen Wang, Cheng-Yong Su, Yue-Ping Fang, and Dai-Bin Kuang. "Sonochemical Preparation of Hierarchical ZnO Hollow Spheres for Efficient Dye-Sensitized Solar Cells". Chmical European Journal. 10. 8757-8761. 2010.

[37] Chien-Yie Tsay and Wei-Tse Hsu. Sol-gel derived undoped and boron-doped ZnO semiconductor thin films: Preparation and characterization. Ceramic International. 39(7). 7425-7432. 2013.

[38] A.N. Mallikan, A. RamaChandraReddy, K. SowriBabu and K. Venugopal Reddy. "Synthesis and optical characterization of aluminum doped ZnO nanoparticles". Ceramic International. 40 : 12171-12177. 2014.

[39] S.D. Senol, O. Ozturk and C. Terzioglu. "Effect of boron doping on the structural, optical and electrical properties of ZnO nanoparticles produced by the hydrothermal method". Ceramic international. 41: 11194-11201. 2015.

[40] Wei Wang, Taotao Ai and Qi Yu. Electrical and photocatalytic properties of boron-doped ZnO nanostructure grown on PET-ITO flexible substrates by hydrothermal method. Scientific Reports. 7. 42615. 2017.

[41] Qi Yu, Jia Li, Hongdong Li, Qiliang Wang, Shaoheng Cheng and Liuan Li. Fabrication, structure, and photocatalytic activities of boron-doped ZnO nanorods hydrothermally grown on CVD diamond film. Chemical Physics Letters. 539-540. 74-78. 2012.

[42] Jaebum Joo, Brian Y. Chow, Manu Prakash, Edward S. Boyden and Joseph M. Jacobson. "Face-selective electrostatic control of hydrothermal zinc oxide nanowire synthesis". Nature materials. 10. 596-601. 2011.

[43] Swaroop K. and H.M. Somashekarappa. "Effect of pH values on surface Morphology and Particle size variation in ZnO Nanoparticles Synthesised by co-precipitation Method". Research Journal of Recent Sciences. 4. 197-201. 2015.

[44] Raghvendra S. Yadav, Priya Mishra and Avinash C. Pandey. “Growth mechanism and optical property of ZnO nanoparticles synthesized by sonochemical method”. *Ultrasonics Sonochemistry*. 15.863–868. 2008.

[45] Nihar Ranjan Panda, Dojalisa Sahu and B. S. Acharya. “Ultrasound Assisted Synthesis and Properties of ZnO:B Nanorods and Micro Flowers”. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 12. 6977–6986. 2012.

[46] A. Khorsand Zak, W.H.abd. Majid, H.Z. Wang, Ramin Yousefi, A. Moradi Golsheikh and Z.F. Ren. “Sonochemical synthesis of hierarchical ZnO nanostructures”. *Ultrasonics Sonochemistry*. 20. 395–400. 2013.

[47] C. Aydin, M.S. Abd Ei-sadek, Kaibo Zheng, I.S. Yahia and F. Yakuphanoglu. “Synthesis, diffused reflectance and electrical properties of nanocrystalline Fe-doped ZnO via sol–gel calcination technique”. *Optic & Laser Technology*. 48. 447-452. 2013.

[48] Saliha Ilcan, Fahrettin Yakuphanoglu, Mujdat Caglar and Yasemin Caglar. “The role of pH and boron doping on the characteristics of sol gel derived ZnO films”. *Journal of Alloys and Compounds*. 509. 5290–5294. 2011.

[49] Snigdha Bhattacharjee, Moumita Basu, and Asim Roy. “Optical and electrical properties of undoped and boron doped zinc oxide synthesized by chemical route”. *Advanced Materials and Radiation Physics*. 1675. 020007. 2015.

[50] B.N. Pawar, S.R. Jadkar and M.G. Takwale. “Deposition and characterization of transparent and conductive sprayed ZnO:B thin films”. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 66. 1779–1782. 2005.

[51] Gilho Kim, Jungsik Bang, Yunseok Kim, S.K. Rout and Seong Ihl Woo. “Structural, electrical and optical properties of boron doped ZnO thin films using LSMCD method at room temperature”. *Applied Physics A Materials Science & Processing*. 97.821-828. 2009

[52] J. Steinhäuser, S. Faÿ, N. Oliveira, E. Vallat-Sauvain, and C. Ballif. “Transition between grain boundary and intragrain scattering transport mechanisms in boron-doped zinc oxide thin films”. *Applied Physics Letter*. 90. 142107. 2007.

[53] Saliha Ilcan, Yasemin Caglar, Mujdat Caglar and Fahrettin Yakuphanoglu. “Structural, optical and electrical properties of F-doped ZnO nanorod semiconductor thin films deposited by sol–gel process”. *Applied Surface Science*. 255. 2353–2359. 2008.

[54] C.X. Xu, X.W. Sun, Z.L. Dong, and M. B. Yu. “Zinc oxide nanodisk”. *Applied Physics Letters*, 85 (17). 3878- 3880. 2004.

[55] Jing Guo, Ji Zheng, Xinzhao Song and Kun Sun. “Synthesis and conductive properties of Ga-doped ZnO nanosheets by hydrothermal method”. *Materials Letters*. 97.34-36.2013.

[56] Saliha Ilcan, Yasemin Caglar, Mujdat Caglar and Fahrettin Yakuphanoglu. “Structural, optical and electrical properties of F-doped ZnO nanorod semiconductor thin films deposited by sol–gel process”. *Applied Surface Science*. 255. 2353–2359. 2008.

[57] Hojun Seong, Jungwon Yun, Jin Hyung Jun, Kyoungah Cho and Sangsig Kim, “The transfer of charge carriers photogenerated in ZnO nanoparticles into a single ZnO nanowire”, *Nanotechnology*. 20. 245201-245206. (2009).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2560					พ.ศ. 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาค ZnO ทางเคมีและวางแผนการทดลอง	→									
2. สังเคราะห์อนุภาค ZnO ที่เจือ B/F ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม		→								
3. ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงอนุภาค ZnO ที่เจือ B/F				→						
4. สังเคราะห์อนุภาค ZnO ที่เจือ B/F ด้วยวิธีโซโนเคมี						→				
5. ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงอนุภาค ZnO ที่เจือ B/F ด้วยวิธีโซโนเคมี							→			
6. ตรวจสอบสมบัติทางพื้นผิวและทางไฟฟ้าอนุภาค ZnO ที่เจือ B/F ของทั้งสองวิธี								→		
7. วิเคราะห์ข้อมูลสรุปผล รายงานผลและจัดทำรูปเล่ม					→					→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล รฐิตารัตน์ ทองประดิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่ 30 ซอยสามัคคี 58/26 ตำบลท่าทราย อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
การศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนราชินีบน แขวงนครไชยศรี เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร
แผนการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์
จบการศึกษาปีการศึกษา 2556

ระดับชั้นปริญญาตรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ
จบการศึกษาปีการศึกษา 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้