



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน

Synthesis of Low-dimensional Nanomaterials of M-Zn-O (M=F, B)
Conductive Oxide by Hydrothermal Process for Functional Energy
Material

ประเภททุน เงินงบประมาณแผ่นดิน รหัสโครงการ A118-0361-018

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ นางสาววนิชยา เมฆประสาท

ผู้ร่วมวิจัย -

ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2561

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 315,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ นางสาววนิชยา เมฆประสาธ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในระดับต่ำที่แตกต่างกันด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี พร้อมกับพัฒนาสมบัติอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นใช้ร่วมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสเพื่อให้เกิดคอลลอยด์ จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางแสงโดยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงในโหมดการสะท้อนแสงและสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการตรวจวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วไฟฟ้าสี่จุด การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิเคราะห์ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนจากการสังเคราะห์ทั้ง 2 กระบวนการนั้นให้โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลและไม่เกิดการเลื่อนของพีคเมื่อมีการเจือลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นให้ลักษณะที่เป็นแท่งที่ยาวขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนความเข้มข้นของการเจือทั้งโบรอนและฟลูออรีนเพิ่มขึ้นแต่ในกระบวนการโซโนให้ลักษณะที่เป็นอนุภาคทรงกลมรวมกันที่มีขนาดไม่แตกต่างกันและสามารถตรวจพบองค์ประกอบของธาตุโบรอนและฟลูออรีนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือโบรอนและฟลูออรีนจะทำให้ช่องว่างของแถบพลังงานน้อยลงเมื่อสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจากการเข้าไปมีส่วนร่วมในโครงสร้างหลักส่งผลทำให้มีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้น และมีเพียงแคซิงค์ออกไซด์เจือฟลูออรีนที่สังเคราะห์จากกระบวนการตกตะกอนร่วมมีความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง

คำสำคัญ ซิงค์ออกไซด์, กระบวนการตกตะกอนร่วม, กระบวนการโซโนเคมี, โบรอน, ฟลูออรีน

Research Title: Synthesis of Low-dimensional Nanomaterials of M-Zn-O (M=F, B) Conductive Oxide by Hydrothermal Process for Functional Energy Material.....

Year: 2018 **Funding:** 315,000 Bath

Period: 1 year from October 1st, 2017 to September 31st, 2018

Researcher: Asst. Prof. Dr. Wanichaya Mekprasart.....

Faculty: College of Nanotechnology..... **Department:** Nanoscience and Nanotechnology

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-doped and F-doped in ZnO synthesized by both methods are in pure 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 in spherical aggregated nanoparticles due to high energy from sono-probe. The interstitial substitution of B and F atom 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 doped ZnO 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

ในการได้รับทุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 นี้ ถือเป็น การได้รับทุนวิจัยครั้งแรกในระดับชาติของการเป็นนักวิจัยของตัวข้าพเจ้านี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ นักวิจัยพี่เลี้ยง รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา สำหรับแนวทางการเป็นนักวิจัย การให้คำปรึกษางานวิจัย การให้ แรงจูงใจและแรงสนับสนุนในการเขียนขอทุนวิจัย รวมถึงคำแนะนำที่มีส่วนสำคัญในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกใน สถานที่ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณคณาจารย์ และสมาชิกห้องปฏิบัติการวัสดุ นาโนคอมโพสิต (NMRL) ที่คอยให้คำปรึกษาและความรู้ รวมทั้งการแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้

ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาท
ผู้ดำเนินการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครงสร้างและกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน.....	4
2.2 สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	9
2.3 โบรอน.....	10
2.4 ฟลูออรีน.....	11
2.5 การทบทวนวรรณกรรม.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	23
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	23
3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม.....	23
3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี.....	24
3.3 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวอย่าง.....	25
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	30
4.1 ผลและการอภิปรายจากสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและ.....	30
ฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน.....	30
และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน.....	34
และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ในผลิตภัณฑ์ ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	38
4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	38
4.1.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	41
4.1.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย ธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	42
4.2 ผลและการอภิปรายจากสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและ ฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	44
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	45
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอน และฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	47
4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ในผลิตภัณฑ์ ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	50
4.2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและ ฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	51
4.2.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและ ฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัย	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	58
6.1 การประชุม/สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference)	58
6.2 วารสารระดับนานาชาติ (International Journal)	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก แผนงานและงบประมาณเพื่อการวิจัย	62
ภาคผนวก ข เอกสารประกอบผลผลิตงานวิจัย	64
ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2.1 สมบัติทางกายภาพของโบรอน.....	10
2.2 ไอโซโทปของธาตุโบรอน.....	11
2.3 สมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน.....	12
2.4 สมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน.....	12
2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบจาก ZnO ที่ปริมาณการเจือของ In ที่ต่างกัน.....	18
4.1 สีของผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยวิธีตกตะกอนร่วมที่โมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ.....	31
ร่วมกับการเผาผลิตภัณฑ์ที่ 500 องศาเซลเซียส	
4.2 ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม.....	33
ร่วมกับการเผาผลิตภัณฑ์ที่ 500 องศาเซลเซียส	
4.3 ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้าเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและ.....	33
ฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	
4.4 สีของผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยวิธีโซโนเคมีซึ่งปราศจากกระบวนการเผา.....	44
ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง	
4.5 ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธีโซโนเคมี.....	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างวัสดุในระดับนาโน 0 มิติ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ.....	5
2.2 วิธีการเตรียมสารละลายด้วยวิธีสารละลายโซลเจล.....	6
2.3 การเกิดและสลายของฟองอากาศควิเตชัน เมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน.....	8
2.4 รูปแบบของเครื่องโซโนเคมี แบบอัลตราโซนิก ฮอรั่นที่มีการใช้งานแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric).....	9
2.5 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ก) เว็ดไซด์ (ข) ผลึกเกลือ และ (ค) ซิงค์เบลน.....	9
2.6 ลักษณะทางกายภาพของธาตุโบรอน.....	10
2.7 ลักษณะทางกายภาพของธาตุฟลูออรีน.....	11
2.8 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่งเป็นองค์ประกอบ.....	13
2.9 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของวัสดุสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่ง.....	13
2.10 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม.....	14
ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่งเป็นองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการสังเคราะห์ต่าง ๆ	
2.11 โครงสร้างของ TiO_2 ที่เกิดขึ้นโดยที่ความเข้มข้นของ PTO แตกต่างกันด้วยกระบวนการ.....	14
ไฮโดรเทอร์มอล	
2.12 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุสังเคราะห์ TiO_2 โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ PTO.....	15
เท่ากับ (a) และ (b) 0.05 โมลาร์ ส่วน (c) และ (d) 0.1 โมลาร์ (e) และ (f) 0.15 โมลาร์	
2.13 ผลการวิเคราะห์ของ TEM ของโครงสร้างวัสดุ TiO_2 ภาพ (a) และ (d) แสดงกระบอกเพชร.....	15
2 ชนิดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ส่วนโครงสร้างวัสดุ TiO_2 ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกัน	
ภาพ (b) และ (c) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ภาพ (e) และ (f) ความเข้มข้น 0.15M	
2.14 ผลการวิเคราะห์ (a) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม.....	16
และ (b) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโครงสร้างวัสดุ TiO_2 ที่สังเคราะห์	
จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	
2.15 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุ ZnO ณ เงื่อนไข (a) ที่ไม่มีการเจือ In และปริมาณการเจือ.....	17
In ใน ZnO เท่ากับ (b) 1 (c) 2 และ (d) 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ	
2.16 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้านข้างของวัสดุ ZnO ณ เงื่อนไข (a) ที่ไม่มีการเจือ In และปริมาณ.....	17
การเจือ In ใน ZnO เท่ากับ (b) 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
2.17 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบ.....	18
จากฟิล์ม ZnO และฟิล์ม ZnO ที่ถูกเจือด้วย In ที่ปริมาณการเจือแตกต่างกัน	
2.18 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุเซรามิกซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขการสังเคราะห์แตกต่างกัน.....	19
(ก) การเผาแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส และวิธีการเผากดดันแบบร้อนที่อุณหภูมิ	
(ข) 1000 และ (ค) 1250 องศาเซลเซียส	
2.19 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุเซรามิกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่เงื่อนไข.....	19
การสังเคราะห์แตกต่างกัน (ก) การเผาแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส และวิธีการเผากดดัน	
แบบร้อนที่อุณหภูมิ (ข) 1000 และ (ค) 1250 องศาเซลเซียส	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ผลจากการตรวจสอบมิติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย อลูมิเนียม	20
2.21 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่ผ่าน การเผาผัดันแบบร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ	20
2.22 อุปกรณ์การทดลองโซโนเคมี (ก) โพรบอัลตราโซนิก และภาชนะแก้วที่เป็นทรง (ข) ลูกบาศก์ (ค) ทรงกระบอก และ (ง) ทรงกลม	21
2.23 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) โพรบอัลตราโซนิก และภาชนะแก้วที่เป็นทรง (ข) ลูกบาศก์ และ (ค) ทรงกระบอก	22
2.24 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ โซโนเคมีที่ใช้ภาชนะบรรจุแก้วที่เป็นรูปทรงแตกต่างกัน	22
3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการการตกตะกอน	24
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการโซโนเคมี	25
3.3 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของบริษัท Rigaku รุ่น SMARTLAB	26
3.4 เครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy ของบริษัท Hitachi รุ่น s 4700	26
3.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ของบริษัท IXRF systems รุ่น 550i	27
3.6 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงของวัสดุ UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy ของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950	27
3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุด้วยวิธี 4 point probe ด้วยเครื่องมือของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500	28
3.8 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงไฟฟ้าของวัสดุด้วยเทคนิค Laser flash analysis จากเครื่องมือของบริษัท Nano Hans รุ่น Netzsch LFA 447	29
4.1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีนด้วยวิธี ตกตะกอนร่วมที่โมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ร่วมกับการเผาผลิตภัณฑ์ที่ 500 องศาเซลเซียส	31
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ ตกตะกอนร่วม	32
4.3 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า	35
4.4 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงปริมาณธาตุต่างๆ ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอนและ (ข) ฟลูออรีนที่ ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม	37
4.6 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	39
4.7 แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์เมื่อเจือด้วยโบรอน	40
4.8 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม	40
4.9 แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์เมื่อเจือด้วยฟลูออรีน	41
4.10 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่อัตราส่วน ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม	42
4.11 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีน ด้วยวิธีด้วยวิธีโซโนเคมีซึ่งปราศจากกระบวนการเผาผลิภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง	44
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีน ในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	45
4.13 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า	48
4.14 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า	49
4.15 กราฟแสดงปริมาณธาตุต่างๆ ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอนและ (ข) ฟลูออรีนที่ความ เข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	50
4.16 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	52
4.17 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี	53
4.18 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่อัตราส่วน ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุตัวนำโปร่งแสง หรือ Transparent Conducting Oxide (TCO) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุในตระกูลซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO) เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอน (n-type) มีค่าดัชนีหักเหสูง การนำความร้อนสูง จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง ความจุความร้อนสูง มีค่าการนำทางไฟฟ้าสูง มีแถบพลังงานกว้าง ทำให้แสงย่านตามองเห็น (visible light) สามารถทะลุผ่านได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ได้อย่างกว้างขวางหลากหลายด้าน อาทิเช่น ขั้วไฟฟ้า (Electrode) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) จอแสดงผล (Flat-panel displays) กระจกสะท้อนความร้อน (Infrared-reflecting glass) หน้าต่างเปลี่ยนสีอัตโนมัติ (Smart windows) เซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส (Gas sensors) หรืออาจจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (Catalyst) เป็นต้น [1-4]

จากการศึกษาพบว่า สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของวัสดุ TCO นั้น จะสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการเตรียม ขนาดของอนุภาค รวมทั้งธาตุที่เจือเพิ่มเข้ามา เช่น การเจือธาตุอินเดียม (Indium: In) ในสารหลักของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้านั้นลดต่ำลงและเพิ่มความกว้างของแถบพลังงาน จึงส่งผลทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าและแสงสามารถทะลุผ่านได้มากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากธาตุอินเดียมเป็นธาตุที่หายากและมีราคาแพง ทำให้มีการศึกษาและทดลองในการเจือธาตุอื่นๆ เพิ่มเข้าไปในซิงค์ออกไซด์แทน เช่น Boron (B) หรือ Fluorine (F) ซึ่งส่งผลทำให้ได้สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดียิ่งขึ้น

ส่วนวิธีการสังเคราะห์สารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุต่าง ๆ มีวิธีการสังเคราะห์หลายวิธี อาทิเช่น วิธีการระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) เป็นการเผาสารตั้งต้นในเตาแบบท่อ วิธีทางโซลเจล (Sol-gel process) และวิธีการตกตะกอน (Precipitation) โดยวิธีทางโซลเจลและตกตะกอนเป็นวิธีการที่มีต้นทุนต่ำ เครื่องมือไม่ซับซ้อน สามารถทำในระบบเปิดได้และได้ปริมาณสารที่สังเคราะห์ได้มากต่อครั้ง ส่วนวิธีไฮโดรเทอร์มอลและโซลโวเทอร์มอล (Hydrothermal and solvothermal) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิและความดันสูง ใช้ตัวทำละลายซึ่งเป็นน้ำหรือตัวทำละลายสารอินทรีย์ นอกจากนั้นการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการนี้ยังสามารถสังเคราะห์สารให้มีโครงสร้างใหม่ในระดับนาโนเมตรได้ อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งนับว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการสังเคราะห์สารที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งจะสามารถทดแทนการนำเข้า ลดต้นทุน และลดปัญหาด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจที่จะสังเคราะห์และพัฒนาสมบัติวัสดุซิงค์ออกไซด์ด้วยการเจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนผ่านกระบวนการพื้นฐานโซล-เจลร่วมกับการใช้คลื่นเสียง ซึ่งคาดว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้ในรูปของโครงสร้างระดับนาโน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและทางแสงของซิงค์ออกไซด์เมื่อนำเคลือบบนวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ที่ได้จากกระบวนการเตรียมดังกล่าว

- 1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสัญญาณของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ที่เตรียมได้
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ที่เตรียมได้
- 1.2.5 เพื่อสร้างและพัฒนาสมบัติเด่นของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุด้านพลังงาน เช่นเป็นวัสดุกักเก็บพลังงาน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ หรือวัสดุเคลือบชิ้นงานเพื่อป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบางช่วงความถี่ เป็นต้น
- 1.2.6 เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ และนานาชาติ รวมทั้งการเสนอผลงานแก่นักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สร้างและติดตั้งระบบการผลิตวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ด้วยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง
- 1.3.2 ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตั้งต้น ศึกษาผลกระทบของตัวแปรและปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างผลึก สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแสงวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B)
- 1.3.3 ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว สัญญาณวิทยา และสมบัติทางแสงของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B)
- 1.3.4 ทดสอบประสิทธิภาพการเป็นวัสดุทำงานของวัสดุนาโนออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ในการประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน
- 1.3.5 มีการเผยแพร่งานวิจัยและความรู้ใหม่ในวารสารวิชาการระดับชาติ และนานาชาติ รวมทั้งการเสนอผลงานแก่นักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย “การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน” ในระหว่าง 1 ต.ค. 2560 ถึง 30 ก.ย. 2561 รวมระยะเวลา 1 ปีตลอดโครงการวิจัย ผลงานวิจัยนี้คาดว่าจะได้องค์ความรู้ใหม่และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุใหม่ด้านพลังงานของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) ในรูปแบบของโครงสร้างระดับนาโนด้วยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง รวมถึงเข้าใจถึงหลักการ วิธีการ ตัวแปรและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์วัสดุนี้เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานตามจุดประสงค์ที่ได้กล่าวไป โดยผลเบื้องต้นจะนำเสนอในการตีพิมพ์ผลงานในวารสารและการนำเสนอผลงานทางวิชาการสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรีและโท/เอก ขณะเดียวกันยังสามารถหาแนวทางและองค์ความรู้ใหม่เพื่อใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุให้ดีขึ้น อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ได้เฉพาะทางมากขึ้น โดยมีกลุ่มเป้าหมายคือกลุ่มนักวิจัยและพัฒนานาวัสดุด้านพลังงาน ในงานวิจัยนี้ได้มีการวางแผนการดำเนินการดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการดำเนินงานวิจัย

ปี	กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
2560	ศึกษาการเตรียมสารตัวอย่าง ด้วยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง/ จัดซื้อวัสดุสารเคมี	X	X										
2560-2561	เตรียมวัสดุนาโนมิติต่ำของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-(Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง พร้อมกับศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของวัสดุ เช่น เวลาการสังเคราะห์ อุณหภูมิ ชนิดสารที่ช่วยในการก่อตัว		X	X	X	X	X	X					
2561	ศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง สันฐานวิทยา และการวิเคราะห์เชิงลึกของสารที่เตรียมได้				X	X	X	X	X	X			
2561	ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุที่เตรียมได้ทางด้านพลังงาน เช่น วัสดุกักเก็บพลังงาน วัสดุสำหรับชั้นป้องกันแสงสะท้อนในเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น					X	X	X	X	X	X		
2561	เขียนรายงานวิจัย บทความวิชาการ									X	X	X	X

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 เข้าใจถึงหลักการและวิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนมิติต่ำของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง
- 1.5.2 ทราบถึงสมบัติทางโครงสร้าง รูปร่าง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติอื่นที่เกี่ยวข้องของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง
- 1.5.3 สามารถทราบถึงตัวแปรและปัจจัยที่สำคัญ ในการเตรียมวัสดุนาโนมิติต่ำของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง
- 1.5.4 สามารถนำวัสดุที่เตรียมได้เป็นวัสดุใหม่ที่น่าสนใจทางด้านพลังงาน เช่น ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ และวัสดุกักเก็บพลังงาน
- 1.5.5 ได้ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอผลงานแก่นักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ
- 1.5.6 เพื่อถ่ายทอดความรู้เทคนิคต่าง ๆ และฝึกทักษะการวิจัยให้กับบุคลากรรุ่นใหม่ เพื่อให้มีความรู้ความสามารถในการวิจัย ซึ่งจะเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนางานการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน

วัสดุและโครงสร้างนาโนจัดเป็นวัสดุและโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (Low-dimensional system) เนื่องจากมิติทางกายภาพของวัสดุและโครงสร้างนาโนดังกล่าวมีมิติอย่างน้อยมิติหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตรเท่านั้น การจำกัดขนาดวัสดุดังกล่าวส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ภายในวัสดุและโครงสร้างนาโนแตกต่างไปจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดใหญ่

วัสดุและโครงสร้างนาโนสามารถจำแนกได้ 4 ระบบ ตามมิติทางกายภาพดังแสดงในรูป 2.1 ได้แก่

1) ระบบศูนย์มิติ (Zero-dimensional (0D) system)

วัสดุและโครงสร้างนาโนที่ถูกจำแนกในระบบนี้ต้องมีมิติทางกายภาพทั้ง 3 มิติ ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น อนุภาคซิงค์ออกไซด์และไททาเนียมออกไซด์ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Nanoparticle) เป็นต้น

2) ระบบหนึ่งมิติ (One-dimensional (1D) system)

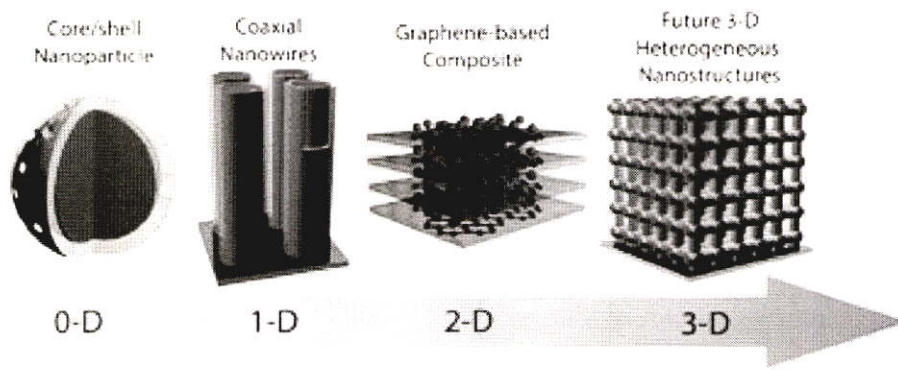
วัสดุและโครงสร้างที่ถูกจำแนกในระบบหนึ่งมิติเป็นวัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสองมิติที่มีขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ส่วนอีกหนึ่งมิติมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยมิติที่มีขนาดใหญ่ อาจจะมีความยาวระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ตัวอย่างโครงสร้างที่มีพื้นฐานแบบหนึ่งมิติ เช่น แท่งนาโน (Nanorod) ลวดนาโน (Nanowire) และท่อนาโน (Nanotube) เป็นต้น โดยลวดนาโนและท่อนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1-100 นาโนเมตร และมีความยาวของลวดหรือท่อมากกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุและโครงสร้างในระบบหนึ่งมิติมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) อย่างชัดเจน การเกิดรูปร่างแบบนี้สามารถทำนายได้อย่างคร่าวๆ จากอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมาก วัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีรูปร่างอนุภาคเป็นลวดนาโนหรือท่อนาโนมากกว่าที่จะเป็นแท่งนาโน

3) ระบบสองมิติ (Two-dimension (2D) system)

วัสดุและโครงสร้างที่ถูกจำแนกในระบบสองมิติเป็นโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพเพียงหนึ่งมิติเท่านั้นที่ถูกจำกัดขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ส่วนอีกสองมิติที่เหลือมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร ตัวอย่างวัสดุที่ถูกจำแนกให้ระบบสองมิติ เช่น ฟิล์มบางนาโน เป็นต้น

4) ระบบสามมิติ (Three-dimension (3D) system)

เป็นโครงสร้างที่ไม่มีทิศทางใดถูกจำกัดให้อยู่ในระดับนาโนเมตร อาจจะหมายถึงการที่โครงสร้างในรูปแบบ 0 มิติ 1 มิติหรือ 2 มิติ มารวมกันเป็นวัสดุขนาดใหญ่ที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เช่น ผลึกคริสตัล (Polycrystals)



รูปที่ 2.1 รูปร่างวัสดุในระดับนาโน 0 มิติ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ [5]

ส่วนกระบวนการเตรียมหรือสังเคราะห์วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเตรียมอนุภาคหรือวัสดุต่างๆ ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนสามารถจำแนกได้ 2 แนวทางหลัก ได้แก่ กระบวนการจากบนลงล่าง (Top-down approach) และกระบวนการจากล่างขึ้นบน (Bottom-up approach)

- กระบวนการจากบนลงล่าง

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างเป็นกระบวนการทำให้วัสดุที่มีขนาดใหญ่แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรสำหรับวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบดธรรมดา (Conventional ball milling) และการบดด้วยพลังงานสูง (High energy ball milling)

- กระบวนการจากล่างขึ้นบน

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากล่างขึ้นบนเป็นการทำให้วัสดุที่มีขนาดเล็กๆ ในระดับอะตอมหรือโมเลกุลรวมตัวกันกลายเป็นวัสดุหรืออนุภาคขนาดใหญ่ วิธีที่นิยมใช้เตรียมอนุภาคนาโน เช่น กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) การตกตะกอน (Precipitation) และกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemical) เป็นต้น โดยการเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างและกระบวนการจากล่างขึ้นบนนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรและมีคุณภาพสูงโดยทั่วไปลักษณะของอนุภาคที่ต้องการมีลักษณะต่างๆ ดังนี้

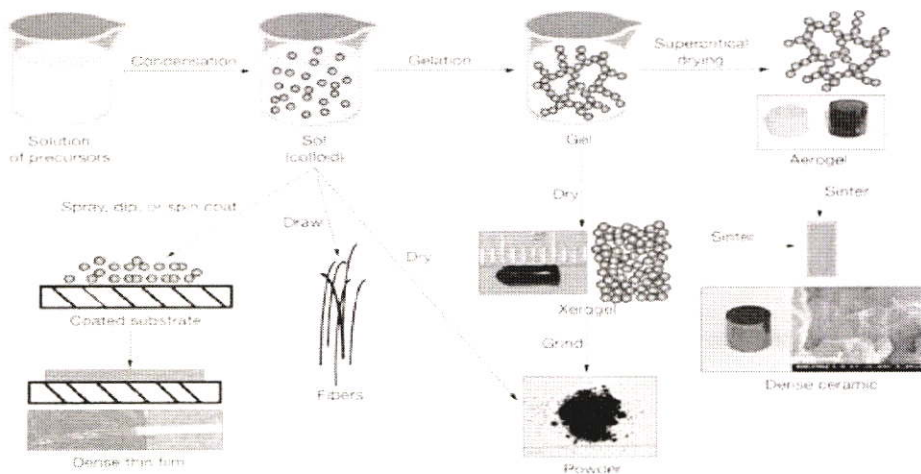
- 1) อนุภาคต้องมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร
- 2) อนุภาคต้องมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ
- 3) อนุภาคต้องมีรูปร่างและรูปร่างทางเรขาคณิตเหมือนกัน
- 4) อนุภาคมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน
- 5) อนุภาคต้องไม่รวมตัวกัน

ในรายงานนี้จะเป็นการสังเคราะห์วัสดุในระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการจากล่างขึ้นบน จึงขอให้อธิบายที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานดังต่อไปนี้

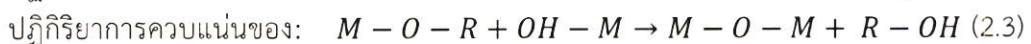
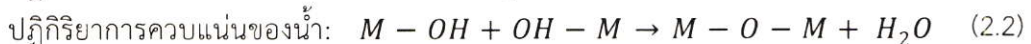
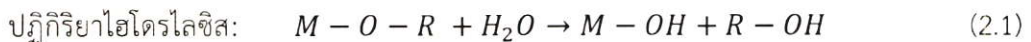
- วิธีการโซลเจล (Sol-gel method)

การเตรียมสารละลายโซลเจลจะเป็นการเตรียมสารที่ต้องการและกวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนสารพร้อมทั้งให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้สารแตกตัวและเกิดการรวมตัวเป็นพันธะ เพื่อให้เป็นสารตัวใหม่ตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีสารละลายโซลเจลนี้มีขั้นตอนในการเตรียมสารที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำในระบบที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศได้ สามารถควบคุมปริมาณการเจือสารและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเตรียมสารเรียบร้อยแล้วจะมีเทคนิคที่นำสารที่เตรียมได้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบาง อาทิเช่น การหมุนเคลือบ การจุ่มเคลือบ และการพ่นเคลือบ เป็นต้น หรือเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของผงหรืออนุภาคในระดับเล็กที่มีความสม่ำเสมอทางโครงสร้างได้อีกด้วย โดยปฏิกิริยากระบวนการโซล-เจลในขั้นตอนต่าง ๆ และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโซลเจลแสดงในรูปที่ 2.2

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซลเจลประกอบไปด้วย 3 ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาการควบแน่นของน้ำ (Water condensation) และปฏิกิริยาการควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการที่ 2.1 – 2.3



รูปที่ 2.2 วิธีการเตรียมสารละลายด้วยวิธีสารละลายโซลเจล



แอลกอฮอล์

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา นั่นคือ ค่าความเป็นกรด-เบส ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างน้ำและสารตั้งต้น และอุณหภูมิ ดังนั้นในสภาวะและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน [6]

- กระบวนการตกตะกอน (Precipitation) [7]

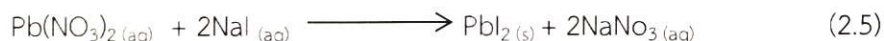
การตกตะกอนประกอบด้วยของแข็งที่เป็นอนุภาคในสารละลายที่เกิดปฏิกิริยาเคมี อนุภาคของแข็งนี้จะตกลงด้านล่างตามความหนาแน่นของตัวมันทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างสารละลายและของแข็งที่เป็นอนุภาค เช่น สารละลายคอลลอยด์ ขนาดอนุภาคของตะกอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวถูกผสมในสารละลาย ตะกอนเกิดขึ้นจากกระบวนการนิวคลีเอชัน (Nucleation) ของไอออน อะตอมหรือโมเลกุลมารวมกัน เกิดเป็นนิวคลีโอ (Nuclei) และเมื่อนิวคลีโอโตจะกลายเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) และรวมกันเป็นอนุภาคที่เป็นการตกตะกอนขึ้น การตกตะกอนนำไปสู่วิธีการสังเคราะห์อนุภาคที่เรียกว่า การตกตะกอนร่วม (Cociprecipitation) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

การตกตะกอนร่วมเป็นกระบวนการที่เกิดจากสารประกอบอื่นที่มากกว่าหนึ่งชนิดเกิดการแตกตัวของสารประกอบแล้วเกิดการการรวมตัวกันได้เป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่มีเฟสใดเฟสหนึ่งที่เกิดเป็นของแข็งและอีกเฟสเป็นของเหลว ดังเช่นในสมการที่ 2.5 จะเห็นว่ามีการผสมสารประกอบที่มากกว่าหนึ่งชนิดเข้าด้วยกันคือ เลด(II) ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) เมื่อเกิดการแตกตัวและรวมตัวกันของไอออนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนของแข็งก็คือ เลด(II) ไอโอไดด์ (PbI_2) และโซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) ที่เป็นสารละลายจากกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะสามารถปรับปรุงสมบัติของสารได้โดยการทำให้เกิดตำหนิในโครงสร้างหลักโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลักด้วยกระบวนการเจือ ซึ่งไอออนที่มากจากการเจือนั้นจะสามารถเข้าไปแทรกหรือแทนที่ตำแหน่งแลตทิซในโครงสร้างหลักได้จากกระบวนการเกิดเป็นนิวคลีโอและมีการรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่เป็นของแข็งคือตะกอน โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเจือโบรอนและฟลูออรีนเพื่อให้เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของซิงค์และออกซิเจนในซิงค์ออกไซด์แลตทิซ

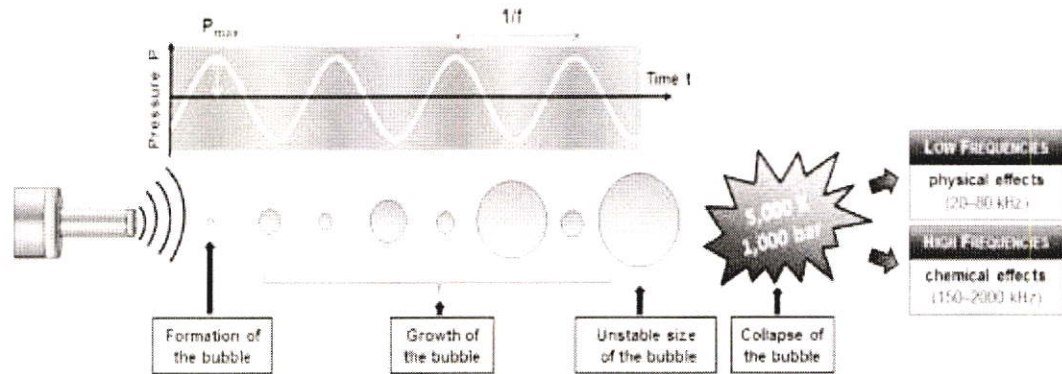
สมการแสดงการเกิดการตกตะกอนร่วม



เช่น การตกตะกอนของสารละลายตะกั่ว



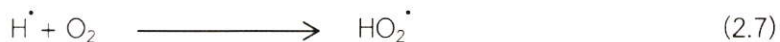
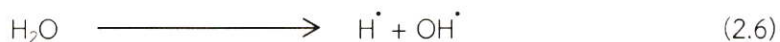
- กระบวนการโซโนเคมี (Sonochemistry)



รูปที่ 2.3 การเกิดและสลายของฟองอากาศควิเตชัน เมื่อคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่าน [8]

กระบวนการโซโนเคมี คือ กระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางกลจากการให้พลังงานคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) แก่ระบบ ทำให้สารละลายถูกกระตุ้นอย่างเฉพาะที่เกิดเป็นช่องว่างฟองอากาศภายในสารละลาย แล้วเมื่อการบีบอัดและคลายตัวของคลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของเหลวที่มีฟองอากาศอยู่เกิดเป็นพลังงานขึ้นภายในช่องว่างของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเกิดการขยายตัวจากแรงดันและเกิดพลังงานที่สูงจนมีการแตกออกเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อะคูสติค ควิเตชัน (Acoustic Cavitation) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยกระบวนการโซโนเคมีเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมความเป็นผลึกได้ในการสังเคราะห์โครงสร้างอัญฐานของโลหะและโลหะอัลลอยด์ การใช้กระบวนการโซโนเคมีเป็นวิธีที่มีราคาต่ำและรวดเร็ว [9]

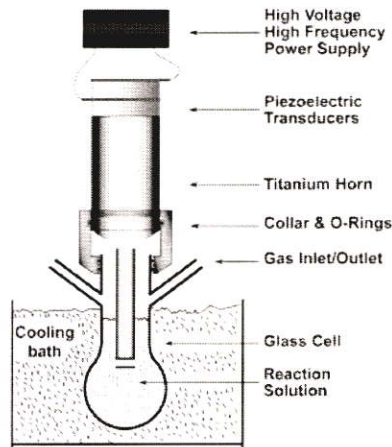
สมการแสดงการเกิดโซโนเคมี



กระบวนการโซโนเคมีใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า อัลตราโซนิก ฮอร์น (Ultrasonic horn) มีลักษณะเป็นอ่างและมีหัวโพรบ (Probe) ที่ให้พลังงานสูงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณคลื่นโดยใช้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducers) และทำให้เกิดพลังงานอะคูสติค (Acoustic energy) ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.4 การใช้งานของอัลตราโซนิก ฮอร์นมีอยู่ 2 แบบ [10] คือ

1. คอนเวนชันนอล ฮอร์น (Conventional horn) เป็นรูปแบบที่ใช้ทดลองในระดับสเกลห้องทดลอง ให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่สูงและให้พลังงานที่ไม่สูงมากจากการที่ปลายฮอร์นมีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการจำกัดบริเวณของการเกิดควิเตชัน

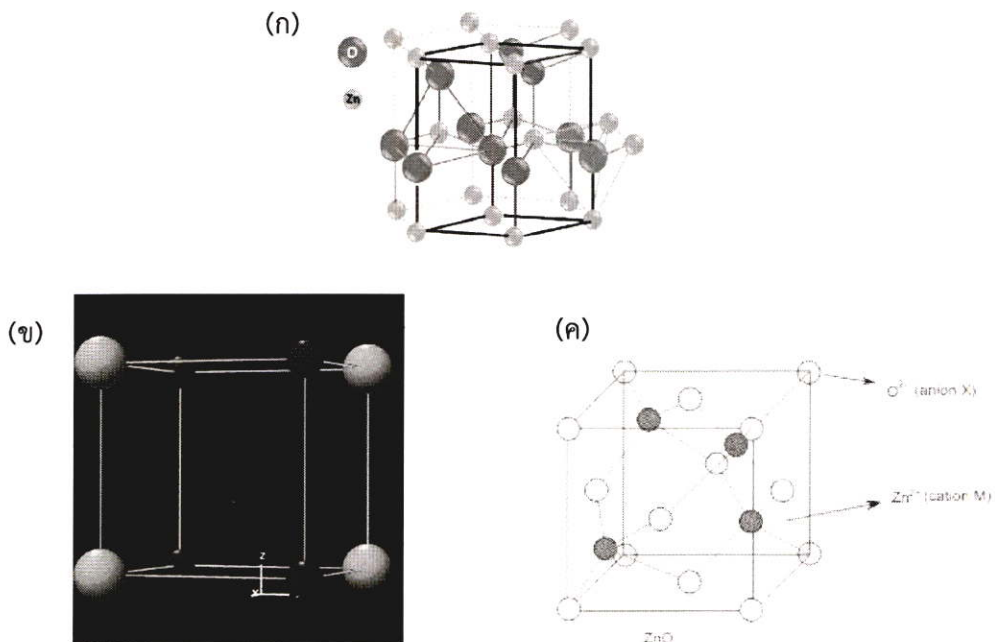
2. บาร์เบลล์ ฮอร์น (Barbell horn) เป็นรูปแบบที่มีขนาดของปลายฮอร์นใหญ่กว่าแบบคอนเวนชันนอลฮอร์น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และให้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นเหนือเสียงที่สูงและให้พลังงานที่สูง



รูปที่ 2.4 รูปแบบของเครื่องโซโนเคมี แบบอัลตราโซนิก ฮอร์นที่มีการใช้งานแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [11]

2.2 สมบัติของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) หรือเป็นที่รู้จักในนาม “คาลาไมล์” ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิธไซต์ (Smithsonite) ซิงค์ออกไซด์สารที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ไม่มีกลิ่น มวลโมเลกุล 81.38 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 5.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 1,975 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,360 องศาเซลเซียส มีแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ดัชนีหักเห 2.0041 [12-13] ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย ด้วยเหตุผลนี้ ซิงค์-ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ อีกทั้งยัง

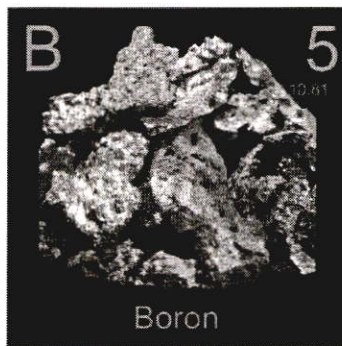


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ก) เวกต์ไซด์ (ข) ผลึกเกลือ และ (ค) ซิงค์เบลน [14-16]

สามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตในย่าน UV-A และ UV-B ในทางวัสดุศาสตร์จึงออกไซด์จัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น มีโครงสร้างผลึกแบบเวิตไซด์ (Wurtzite) ผลึกเกลือ (Rocksalt) และซิงค์เบลน (Zincblend) ดังรูปที่ 2.5 เมื่ออยู่ในรูปสารกึ่งตัวนำออกไซด์จะมีสมบัติเด่น อาทิเช่น มีสมบัติทะลุผ่านแสงได้ดี แถบพลังงานต้องห้ามกว้าง มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดี และสามารถเปล่งได้ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นต้น ด้วยสมบัติเด่นเหล่านี้จึงนำออกไซด์นำมาใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง และไดโอดเปล่งแสง

2.3 โบรอน

โบรอน (Boron) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ ที่มีสัญลักษณ์คือ B และมีเลขอะตอมเป็น 5 โดยเป็นธาตุในหมู่ที่ 3 ในตารางธาตุ ซึ่งจัดเป็นธาตุกึ่งโลหะ โบรอนมักพบมากในแร่บอแรกซ์ และมี 2 ไอโซโทป สี่ของโบรอนแบบอเสถียรจะมีสีน้ำตาลและแบบแมททาลิกจะมีสีดำดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีสมบัติทางกายภาพและไอโซโทปของธาตุโบรอนแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ธาตุโบรอนเป็นโลหะที่แข็งมาก แต่ถ้าอยู่ในรูปของโบรอนบริสุทธิ์จะมีความเปราะมาก การนำไฟฟ้าของโบรอนนั้นจะนำไฟฟ้าไม่ดีในอุณหภูมิห้อง จะไม่พบเป็นธาตุอิสระในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์และสารประกอบเฮไลด์



รูปที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของธาตุโบรอน [17]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโบรอน

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

ตารางที่ 2.2 ไอโซโทปของธาตุโบรอน

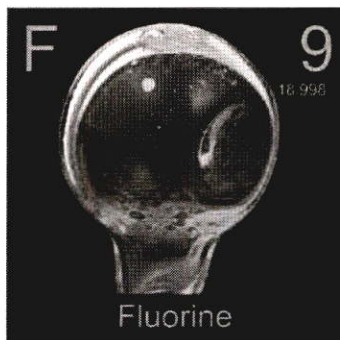
Isotope	Atomic mass	Natural abundance (%)
^{10}B	10.013	19.9
^{11}B	11.009	80.1

ประโยชน์ของธาตุโบรอน

- 1) ใช้ทำโลหะเจือสำหรับการใช้งานพิเศษ
- 2) เป็นตัวควบคุมนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์
- 3) เส้นใยของโบรอนใช้ผสมกับโลหะ ทำให้โลหะมีความเหนียวขึ้น
- 4) ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 5) ใช้ผสมในเชื้อเพลิงขั้วจรวด
- 6) ผสมในโลหะเจือที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง
- 7) ผลิตเครื่องแก้วทดลองที่เรียกว่า Borocilicated glass

2.4 ฟลูออรีน

ฟลูออรีน (Fluorine) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ ที่มีสัญลักษณ์เป็น F และมีเลขอะตอมเป็น 9 โดยเป็นธาตุในหมู่ 7 มักจะอยู่ในรูปของแก๊สดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีสมบัติทางกายภาพสอดคล้องกับตารางที่ 2.3 จัดเป็นอโลหะและเป็นธาตุที่เบาที่สุด มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ทำให้ไม่พบฟลูออรีนรูปอิสระในธรรมชาติแต่จะพบอยู่ในรูปฟลูออไรด์ที่มีประจุลบ โดยฟลูออไรด์ไอออน (F^-) ซึ่งมีขนาดไอออนใกล้เคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จึงมักจะแทนที่กันได้ดีในแร่ธาตุ ฟลูออรีนพบมากบนเปลือกโลกในรูปของเป็นก๊าซเฉื่อย (Halogen) มีสีเหลืองอ่อน เป็นก๊าซที่ไวต่อปฏิกิริยา และไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้เป็นประจุบวกได้ ฟลูออรีนมีความอันตรายสูง จึงไม่ควรสัมผัสโดยตรงต้องใช้ภาชนะที่ปิดมิดชิดป้องกันการรั่วไหล ฟลูออรีนจะพบได้ในร่างกายของเรา เช่น กระดูกและฟัน แต่จะอยู่ในลักษณะของสารผสมที่เรียกว่า ฟลูออไรด์ (Fluoride)



รูปที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของธาตุฟลูออรีน [18]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของฟลูออรีน

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

ประโยชน์ของธาตุฟลูออรีน

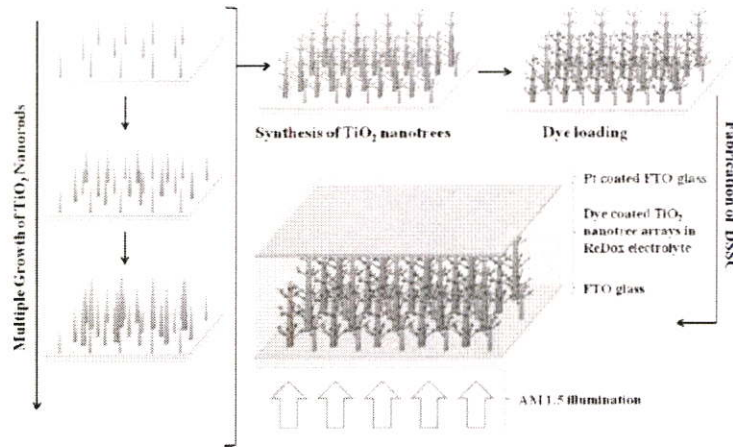
- 1) อะตอมฟลูออรีนและโมเลกุลฟลูออรีนถูกใช้สำหรับการทำพลาสมาเอทซิง (Plasma etching) ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์
- 2) ใช้ในการผลิตพลาสติกที่ทนแรงได้น้ำ เช่น เทฟลอน
- 3) ฟลูออไรด์ถูกผสมเข้าในยาสีฟัน เพื่อป้องกันฟันผุ

2.5 การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยการสังเคราะห์วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide: TCO) โครงสร้างมีดัดแปลงเพื่อนำไปใช้งานด้านพลังงานในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายประเภทและวิธีการสังเคราะห์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้รวบรวมงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้มีการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นการศึกษาขั้นต้นประกอบในการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงความเป็นไปได้และประโยชน์ในการใช้งานจากวัสดุและโครงสร้างที่ต้องการศึกษา ซึ่งจากการทบทวนบทความวิจัยพบว่าการพัฒนา TCO โครงสร้างมีดัดแปลงนั้น จะทำให้ประสิทธิภาพวัสดุเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่น

Chih-Min Lin และ คณะ [19] ได้ทำการวิจัยและศึกษาการสังเคราะห์วัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide: TiO₂) โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเริ่มจากนำฐานรองนำไฟฟ้า FTO ใส่ลงในหม้อปฏิกรณ์แบบเทฟลอน (Teflon reactor) จากนั้นเติมน้ำปอดประจุ 30 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl aqueous solution) ความเข้มข้น 37% 30 มิลลิลิตร และไททาเนียมบิวทอกไซด์ (titanium butoxide) 0.5 มิลลิลิตร ตามด้วยการนำหม้อปฏิกรณ์ให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-20 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาทำการล้างฐานรองที่ได้ในน้ำปอดประจุ และแอลกอฮอล์หลายครั้ง แล้วทำการเป่าแห้งด้วยไนโตรเจน จากนั้นนำสารที่ได้ใส่ลงในหม้อปฏิกรณ์ แล้วทำการเติมโทลูอีน (toluene) 10 มิลลิลิตร ไททาเนียมบิวทอกไซด์ 0.25-2.0 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 37% 1 มิลลิลิตร) ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl₄) 1 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในโทลูอีน จากนั้นให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ทำการล้างในน้ำปอดประจุและแอลกอฮอล์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้เผาที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อม N719 0.3 mM ทำการแช่อยู่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าชื่อว่า MPN-100 ของบริษัท Solaronix จำกัด ประเทศสวีเดนผสมกับตัวทำละลายอะซิโตไนไตร (acetonitrile) ในอัตราส่วน 1:2 และมีการเคลือบแพททินัม (Pt) บนฐานรองรับ FTO เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังรูปที่ 2.8 ผลที่ได้พบว่าเมื่อ

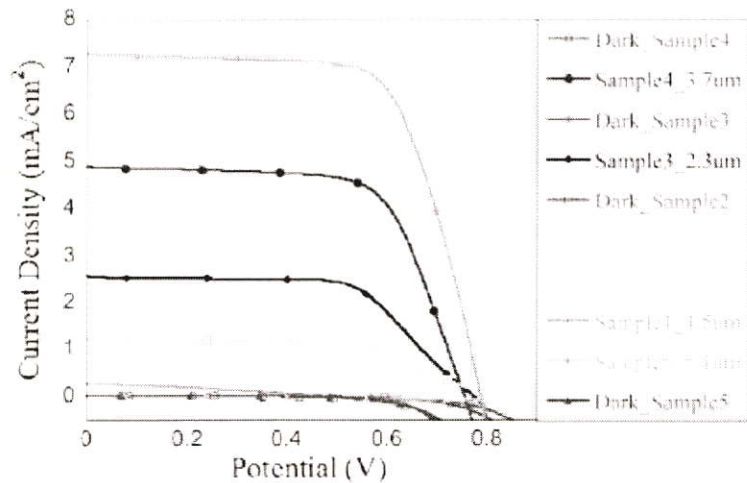
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่ง (TiO_2 nanorod) ดังรูปที่ 2.9 โดยพบว่า เมื่อ TiO_2 nanorod มีความยาวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นไปด้วย (รูปที่ 2.10) ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่ง เมื่อมีความยาวมากขึ้นทำให้ไปจับกับปริมาณสีย้อมได้มากขึ้นด้วย ส่งผลให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าในตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้น จึงช่วยให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้นได้



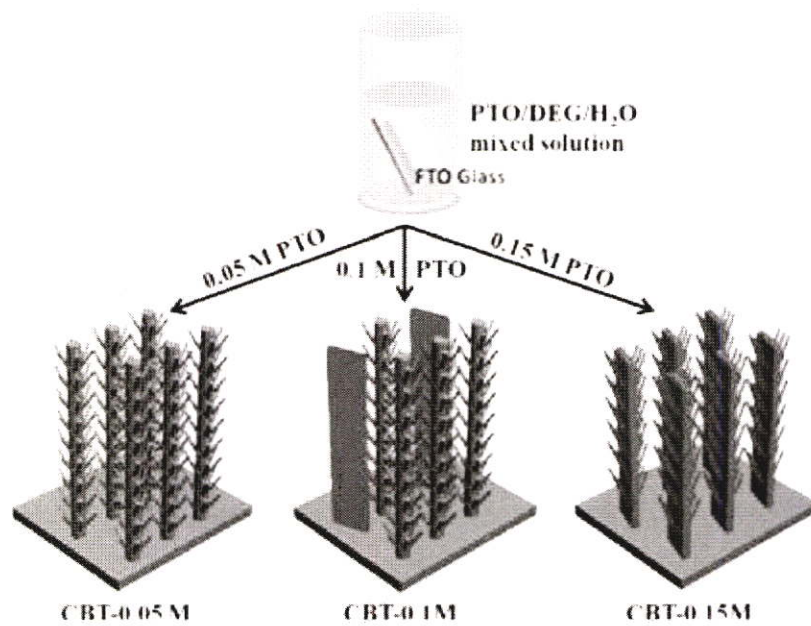
รูปที่ 2.8 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่งเป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของวัสดุสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่ง



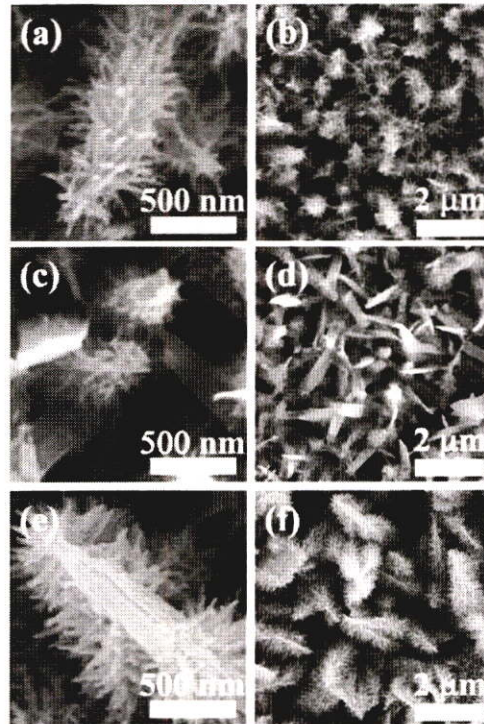
รูปที่ 2.10 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแท่งเป็นองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการสังเคราะห์ต่าง ๆ



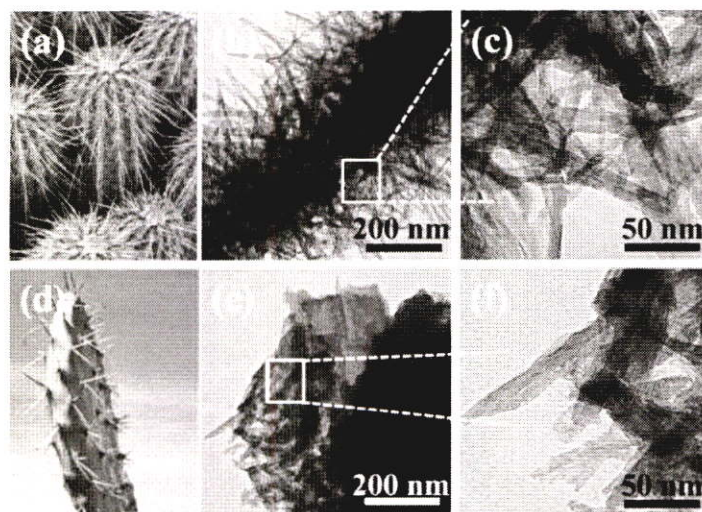
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ TiO_2 ที่เกิดขึ้นโดยที่ความเข้มข้นของ PTO แตกต่างกันด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

Wu-Qiang Wu และ คณะ [20] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างคล้ายกระบองเพชรด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงดังรูปที่ 2.11 โดยเริ่มจากใช้สารตั้งต้น potassium titanium oxalate dehydrate (PTO) ละลายในน้ำปอดประจุ 2.5 มิลลิลิตร และสารลดแรงตึงผิว diethylene glycol (DEG) 17.5 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเตรียมฐานรองรับนำไฟฟ้า FTO ที่เคลือบ TiO_2 หนา 100 นาโนเมตร ด้วยกระบวนการหมุนเคลือบด้วยความเร็วสูง (spin-coating process) แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายและฐานรองรับที่เตรียมไว้ใส่ในหม้อปฏิกรณ์ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นตัว ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำปอด

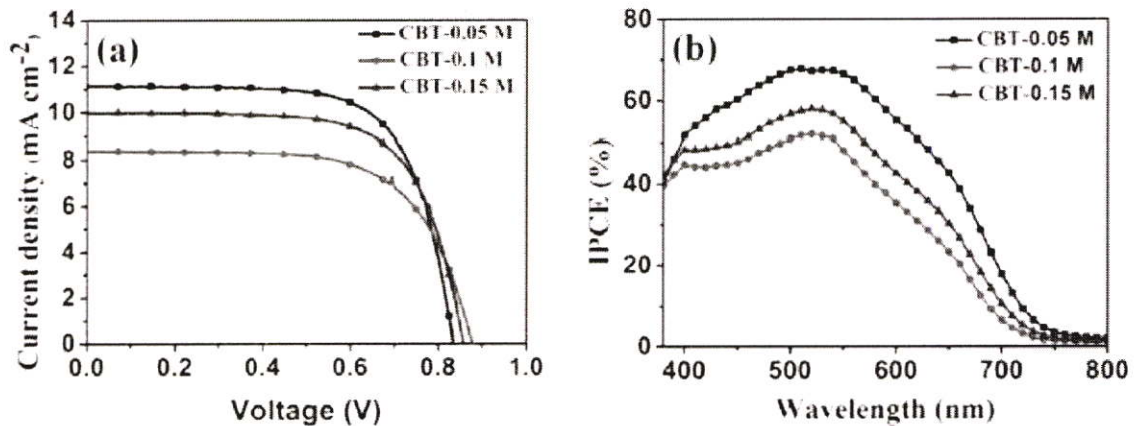
ประจุและเอทานอลหลายๆ ครั้ง ตามด้วยการให้ความร้อนที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัด DEG โดยกำหนดเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ PTO ตั้งแต่ 0.05, 0.1 และ 0.15 โมลาร์ แล้วจึงนำมาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปใช้เป็นขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ นำฟิล์มที่ได้มาแช่สารละลาย TiCl_4 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้าง



รูปที่ 2.12 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุสังเคราะห์ TiO_2 โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ PTO เท่ากับ (a) และ (b) 0.05 โมลาร์ ส่วน (c) และ (d) 0.1 โมลาร์ (e) และ (f) 0.15 โมลาร์



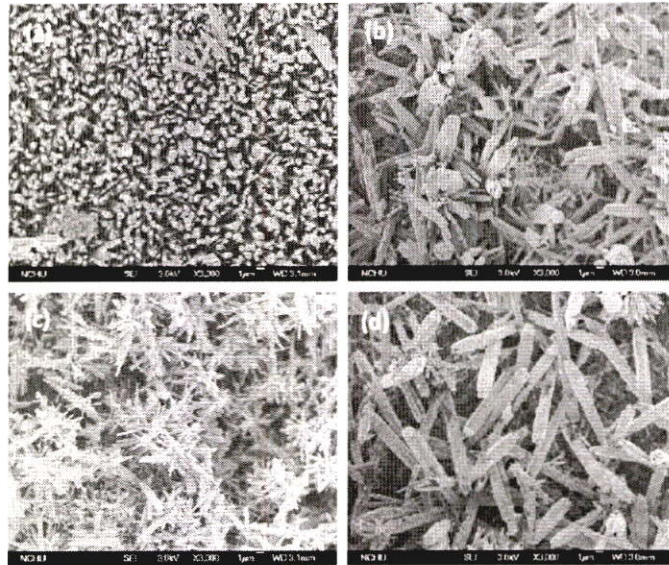
รูปที่ 2.13 ผลการวิเคราะห์ของ TEM ของโครงสร้างวัสดุ TiO_2 ภาพ (a) และ (d) แสดงกระบอเพชร 2 ชนิด ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ส่วนโครงสร้างวัสดุ TiO_2 ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแตกต่างกัน ภาพ (b) และ (c) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ภาพ (e) และ (f) ความเข้มข้น 0.15M



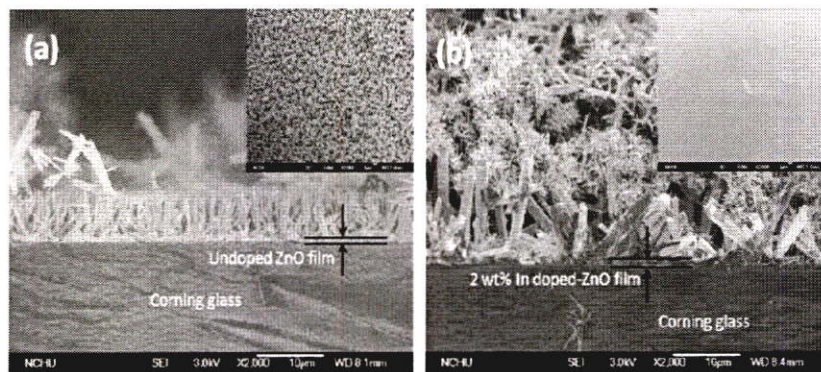
รูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์ (a) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม และ (b) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโครงสร้างวัสดุ TiO₂ ที่สังเคราะห์จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

น้ำและเอทานอล ตามด้วยการเตรียมพื้นผิวหน้าฟิล์มโดยการเผาที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงมาที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปแช่สีย้อม N719 ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ซึ่งผสมกับตัวทำละลาย acetonitrile/tertbutanol ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร โดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ต่อมาจึงนำมาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โดยมี TiO₂ เป็นขั้วแอโนด และมี Pt เป็นขั้วแคโทด จากนั้นทำ การฉีดยาละลายอิเล็กโทรไลต์ไอโอดี (I/I₃) ในอุปกรณ์โดยมีขนาดพื้นที่ของฟิล์มประมาณ 0.16 ตารางเซนติเมตร จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้น PTO จะมีผลต่อการก่อตัวเป็น โครงสร้างแท่งนาโนของ TiO₂ โดยที่ปริมาณความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จะได้โครงสร้างสมบูรณ์แบบที่เป็น กระจบองเพชรนาโนแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.1 และ 0.15 โมลาร์ จะทำให้ขนาดของแท่ง นาโนเกิดการรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น จนทำให้กลายเป็นแผ่นนาโนได้ที่ความเข้มข้นสูงสุด ซึ่งยืนยันผลด้วยการ วิเคราะห์ด้วยภาพ SEM และ TEM ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ส่วนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมโดยใช้โครงสร้างวัสดุ TiO₂ โดยแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่า เมื่อฟิล์ม TiO₂ nanorod ที่มีความ หนา 7 μm ภายใต้เงื่อนไข PTO ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เซลล์แสงอาทิตย์จะให้ประสิทธิภาพที่ 6.43% ภายใต้การให้แสงอาทิตย์จำลองที่ AM 1.5 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากปริมาณพื้นที่ผิวที่ เพิ่มขึ้นและความสามารถในการกระเจิงแสง ซึ่งเกิดจากเงื่อนไขที่เหมาะสมในการก่อตัวเป็นโครงร่างแท่งนาโน

Auttasit Tubtimtae และ คณะ [21] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์ซึ่งออกไซด์โครงสร้างแท่งนาโน (ZnO nanorod) และ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เจือด้วยธาตุอินเดียม (indium; In) เพื่อทำเป็นขั้วนำ ไฟฟ้าโปร่งแสงบนกระจกที่ไม่นำไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการทดลองจะเริ่มจาก เตรียมฐานรองซึ่งเป็นกระจกชนิด Corning 1737 ซึ่งผ่านกระบวนการล้างด้วยอะซิโตน เมทานอล และ น้ำ กลั่น ภายใต้การล้างโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 5 นาทีสำหรับตัวทำละลายแต่ละชนิด และทำให้แห้ง โดยใช้แก๊สไนโตรเจน จากนั้นทำการเตรียมสารตั้งต้นเพื่อทำเป็นฟิล์ม ZnO โดยใช้สารละลายสารตั้งต้นของ zinc nitrate hexahydrate (Zn(NO₃)₂·6H₂O) 0.08 โมลาร์ ผสมกับ hexamethylenetetramine (HMT, C₆H₁₂N₄) 0.05 โมลาร์ในน้ำกลั่น และ hydrogen peroxide (H₂O₂) 1 โมลาร์ จะทำให้สารละลายขุ่นมากขึ้น โดยมีค่า pH เท่ากับ 6.0-6.5 แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเติม สารตั้งต้น anhydrous InCl₃ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอยู่ที่ 1-3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ pH ประมาณ 5 เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการเจือ indium (In³⁺) ลงใน ZnO nanorod โดยฟิล์ม ZnO จะถูกเคลือบ



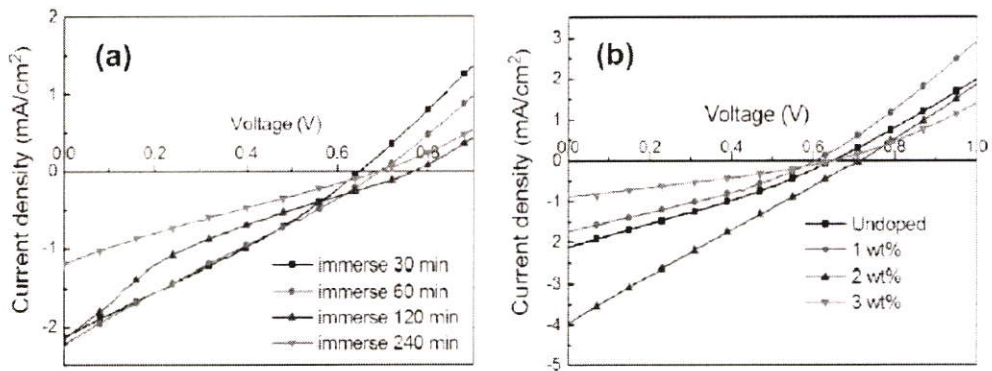
รูปที่ 2.15 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุ ZnO ฟิล์ม เจริญไซ (a) ที่ไม่มีการเจือ In และปริมาณการเจือ In ใน ZnO เท่ากับ (b) 1 (c) 2 และ (d) 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้านข้างของวัสดุ ZnO ฟิล์ม เจริญไซ (a) ที่ไม่มีการเจือ In และปริมาณการเจือ In ใน ZnO เท่ากับ (b) 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โดยการแช่ในสารละลาย (0.01 โมลาร์) เช่นเดียวกับขั้นตอนแรก และทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทำซ้ำ 6 รอบ จากนั้นล้างด้วยน้ำปอดประจุเพื่อกำจัดเกลือและอนุภาคบนพื้นผิวแล้วจึงทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์โดยนำฟิล์มที่ได้แช่สีย้อม N719 ความเข้มข้น 0.3 mM โดยใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการแช่ที่ 30 60 120 และ 240 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างโดยใช้เอทานอลเพื่อล้างสีย้อมส่วนเกินที่เหลืออยู่

จากการวิเคราะห์ด้วยภาพ SEM ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ ZnO ด้วยกระบวนการนี้จะได้โครงสร้างที่เป็นแท่งนาโน โดย ZnO ที่ยังไม่มีการเจือด้วย In จะมีลักษณะเป็นแท่งตั้งฉากกับฐานรองรับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร และความยาวประมาณ 8 ไมโครเมตร แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ In เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความยาวของแท่ง ZnO ลดลงจนเหลือประมาณ 1.5 ไมโครเมตร จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์ม ZnO และ ZnO:In ในรูปแบบการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยเงื่อนไขการเจือด้วย In



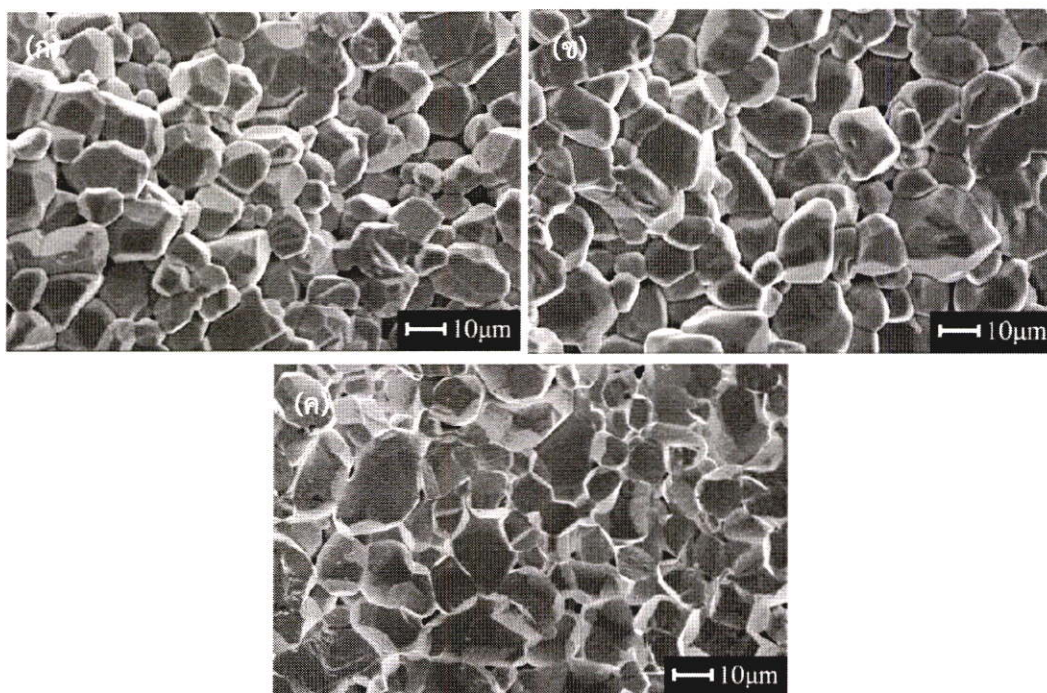
รูปที่ 2.17 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบจากฟิล์ม ZnO และฟิล์ม ZnO ที่ถูกเจือด้วย In ที่ปริมาณการเจือแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบจาก ZnO ที่ปริมาณการเจือของ In ที่ต่างกัน

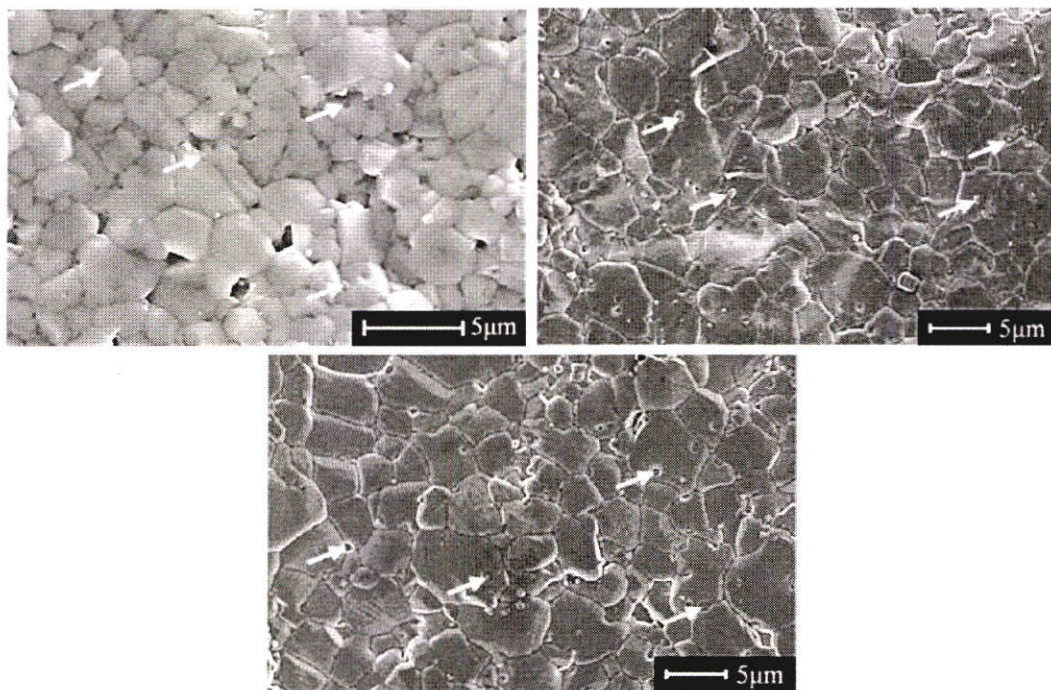
Indium content (wt%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
0	2.14	0.649	33.1	0.40
1	1.73	0.609	30.5	0.32
2	3.96	0.716	20.0	0.56
3	0.56	0.651	44.4	0.16

2 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเงื่อนไขที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นที่สุด โดยทำให้ตัวอุปกรณ์มีความหนาแน่นกระแสสูงที่สุดอยู่ที่ 3.96 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและมีความต่างศักย์ 0.72 โวลต์ ค่า fill factor ที่ได้อยู่ที่ 20% และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะมีค่าอยู่ที่ 0.56% ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการแสดงค่าตัวแปรพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 2.4

Ming Wei Wu และ [22] คณะทำการศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเติมลงใน ซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีการกดดันแบบร้อน (Hot isotatic pressing) เพื่อใช้เป็นเป้าสารตั้งต้นของกระบวนการสปีดเทอริงในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งแสง โดยใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ต่อซิงค์ออกไซด์ 2:98 โดยมวลด้วยกระบวนการปั่นกววน พร้อมกับทำการอบแห้งที่ 140 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการพ่นแบบแห้งในการทำให้เป็นผง จากนั้นจะถูกนำไปกดด้วยความดัน 150 เมกะปาสคาลขนาด 12.5 มิลลิเมตร ความหนา 7 มิลลิเมตรอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 30 นาทีในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจะนำไปเผาด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยกระบวนการที่กล่าวมาจะเป็นกระบวนการดั้งเดิม ส่วนสารผสมที่สร้างด้วยวิธีการกดดันแบบร้อนที่อุณหภูมิ 1000 หรือ 1250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความดันแก๊ส อาร์กอน 150 เมกะปาสคาล เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์และสมบัติอื่นๆ ผลิตภัณฑ์เซรามิกซิงค์ออกไซด์และการเจืออะลูมิเนียมในซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากทั้ง 3 เงื่อนไขแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้กระบวนการเผากดดันแบบร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าการเผาแบบทั่วไป และการเจืออะลูมิเนียมเข้าไปในวัสดุซิงค์ออกไซด์จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกซิงค์ออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ส่วนผลที่ได้จากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าเกิดความเข้มสัญญาณที่สอดคล้องกับสารซิงค์ออก-

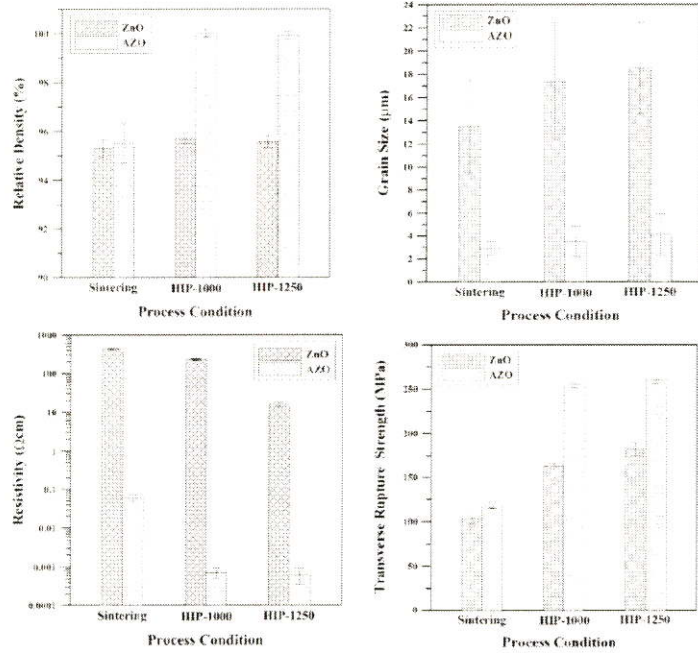


รูปที่ 2.18 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุเซรามิกซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขการสังเคราะห์แตกต่างกัน (ก) การเผาแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส และวิธีการเผากดดันแบบร้อนที่อุณหภูมิ (ข) 1000 และ (ค) 1250 องศาเซลเซียส

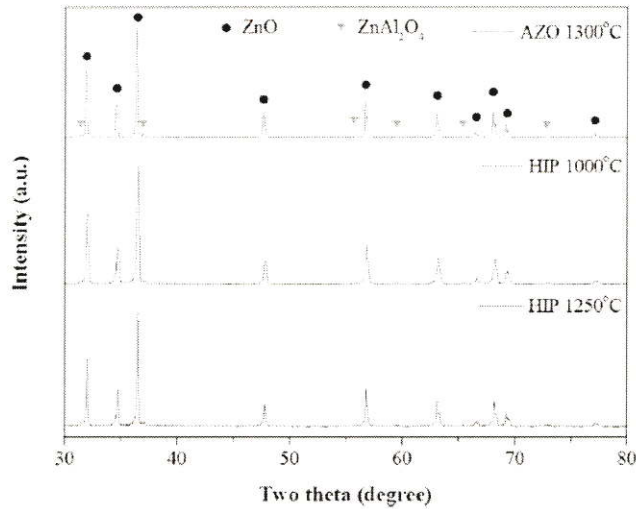


รูปที่ 2.19 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของวัสดุเซรามิกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่เงื่อนไขการสังเคราะห์แตกต่างกัน (ก) การเผาแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส และวิธีการเผากดดันแบบร้อนที่อุณหภูมิ (ข) 1000 และ (ค) 1250 องศาเซลเซียส

ไซด์และซิงค์ออกไซด์เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.21 อีกทั้งยังพบว่า การเจืออลูมิเนียมออกไซด์ลงในซิงค์ออกไซด์ทำให้ขนาดเกรนเล็กลง ความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ความแข็งเพิ่มขึ้น และทนต่อแรงดึงได้ดีมากขึ้น

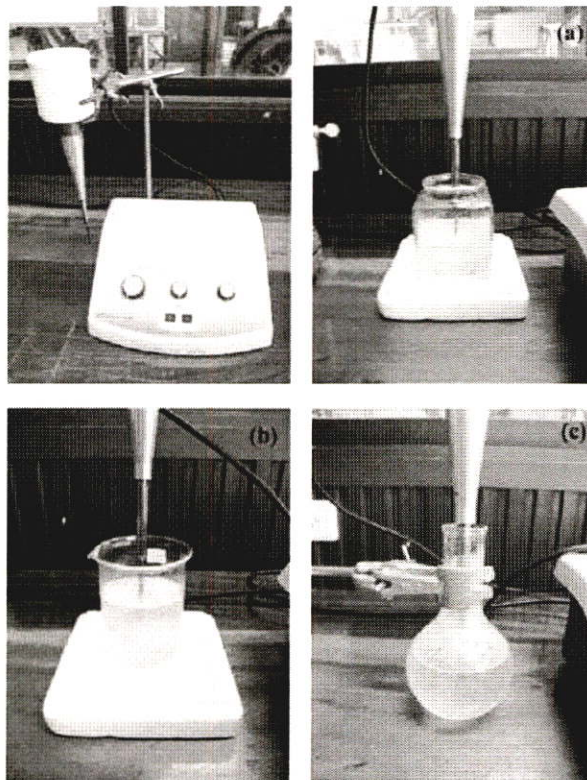


รูปที่ 2.20 ผลจากการตรวจสอบบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

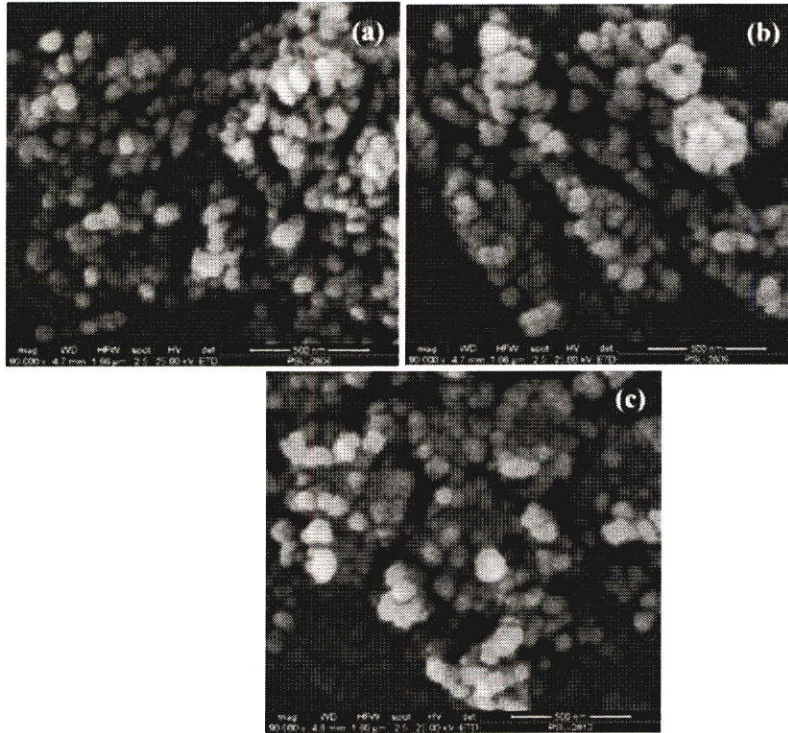


รูปที่ 2.21 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

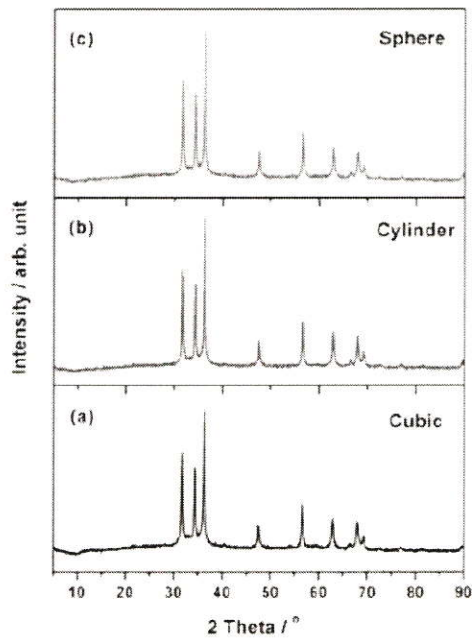
Chat Pholnak และ คณะ [23] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรซ์ กำลัง 45 วัตต์ ซึ่งมีเงื่อนไขในการใช้อุปกรณ์ในการบรรจุสารละลายที่แตกต่างกัน โดยบรรจุสารละลายในภาชนะแก้วที่เป็นทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และทรงกลมดั่งแสดงในรูปที่ 2.22 การทดลองจะเริ่มจากการทำสารละลายซิงค์ไนเตรดความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ที่ละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยการเติมสารละลายเอทิลอะซิเตตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ พร้อมกับปั่นกวนไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้บรรจุในภาชนะแก้วที่ได้กำหนดข้างต้น จากนั้นทำการจุ่มโพรบอัลตราโซนิกเป็นเวลา 60 นาที และนำตะกอนที่ได้จากกระบวนการนี้ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง การวิเคราะห์ผลเริ่มจากการวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยภาพ SEM ดังรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่า การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการนี้จะได้โครงสร้างที่เป็นอนุภาคนาโนซึ่งขนาดประมาณ 70 นาโนเมตร จากทุกๆ เงื่อนไข ดังนั้นการใช้ภาชนะบรรจุสารละลายในกระบวนการโซโนเคมีจึงไม่ค่อยมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น) ส่วนผลที่ได้จากโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าเกิดความเข้มสัญญาณที่สอดคล้องกับสารซิงค์ออกไซด์โดยปรากฏสัญญาณเด่นที่มุม 2θ เท่ากับ 31.76° , 34.42° และ 36.25° ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกระนาบ (100), (002) และ (101) อ้างอิงจากกราฟมาตรฐาน JCPDF No. 01-079-2205 ดังรูปที่ 2.24 จากนั้นทำการคำนวณหาขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์จากพิกัดสัญญาณหลักที่มุม 2θ เท่ากับ 36.25° พบว่าในแต่ละเงื่อนไขมีขนาดผลึกเท่ากับ 34 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยภาพ SEM ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า รูปร่างของภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายในกระบวนการโซโนเคมีไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์การทดลองโซโนเคมี (ก) โพรบอัลตราโซนิก และภาชนะแก้วที่เป็นทรง (ข) ลูกบาศก์ (ค) ทรงกระบอก และ (ง) ทรงกลม



รูปที่ 2.23 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีที่ใช้ภาชนะบรรจุแก้วที่เป็นรูปทรง (ก) ทรงลูกบาศก์ (ข) ทรงกระบอก และ (ค) ทรงกลม



รูปที่ 2.24 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีที่ใช้ภาชนะบรรจุแก้วที่เป็นรูปทรงแตกต่างกัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

- ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรท (Zinc Nitrate Hexanhydrate : $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)
- กรดไตรไอโซโพรพิลโบเรท (Triisopropyl borate : $C_9H_{21}BO_3$)
- แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium Fluoride : NH_4F)
- เอทานอล (Ethanol : C_2H_5OH)
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide : NH_4OH)
- น้ำปilotประจุ

3.1.2 อุปกรณ์

- เครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง
- เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ กระจกตวง
- เครื่องปั่นกวนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็ก
- โพรบโซโนเคมี
- ปิเปตอัตโนมัติ
- หลอดบรรจุสารเพื่อใช้ในการปั่นเหวี่ยงตะกอน
- เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน
- ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- คูชิเบล
- เตาอบความร้อน
- เตาเผา
- ครกบด

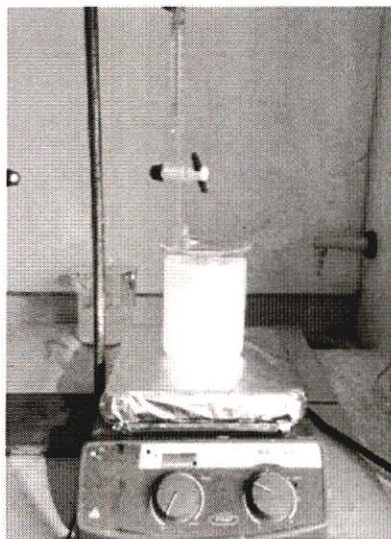
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

การเตรียมสารละลายโดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นของซิงค์ออกไซด์และสารละลายกรดไตรไอโซโพรพิลโบเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เป็นสารตั้งต้นสารเจือ มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

- 1) ทำการผสมน้ำปราศจากไอออน 190 มิลลิลิตร และเอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เข้าด้วยกันโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวนสาร
- 2) นำสารละลายเอทานอลมา 150 มิลลิลิตร ใส่ซิงค์ไนเตรตปริมาณ 0.2 โมลาร์ และปริมาณการเจือกรดไตรไอโซโพรพิลโบเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เท่ากับ 1-9 โมลเปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการปั่นกวนจนสารละลายใส แล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายด้วยการเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องปั่นกวนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที
- 3) นำสารละลายที่ปรับปริมาตรในข้อ 2) มาใส่ภาชนะเพื่อสำหรับการทำการตกตะกอนร่วม ด้วยการเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายพร้อมกับการปั่นกวนด้วยแม่เหล็กจนมีค่า pH

เท่ากับ 9 จากนั้นทำการปั่นจนอย่างต่อเนื่องเครื่องปั่นจนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการการตกตะกอน

- 4) ทำการล้างสารละลายคอลลอยด์ด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน คนสารละลายคอลลอยด์ให้เข้ากัน แล้วนำมาใส่หลอดบรรจุสารเพื่อใช้ในการปั่นเหวี่ยงตะกอนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งค่าที่ความเร็วรอบ 6000 รอบ เป็นเวลา 6 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เทน้ำปลอดประจุใส่ที่แยกชั้นกับตะกอนทิ้ง วัดค่า pH ด้วยยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ของสารละลายที่เททิ้ง แล้วเติมน้ำปลอดประจุ ทำซ้ำในข้อ 4) จนได้ค่า pH 7 หรือมีค่าเท่ากับค่า pH ของน้ำปลอดประจุ
- 5) นำตะกอนในข้อ 4) ที่ปรับ pH เรียบร้อยแล้วเข้าเตาอบเพื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) นำผงที่ได้ในข้อ 5) มาใส่ภาชนะสำหรับเผา เพื่อทำการเผาสารโดยตั้งค่าเตาเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้อัตราการขึ้นอุณหภูมิเป็น 5 องศาต่อนาที ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการตกตะกอนร่วม

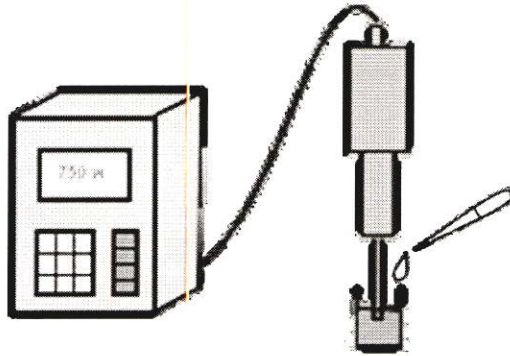
3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

ส่วนการเตรียมสารละลายโดยใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งของซิงค์ออกไซด์และสารละลายกรดไตรโอโซ-โพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เป็นสารตั้งต้นสารเจือด้วยกระบวนการโซโนเคมี มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

- 1) ทำการผสมน้ำปราศจากไอออน 190 มิลลิลิตร และเอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เข้าด้วยกันโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวนสาร
- 2) นำสารละลายเอทานอลมา 150 มิลลิลิตร ใส่ซิงค์ไนเตรตปริมาณ 0.2 โมลาร์ และปริมาณการเจือกรดไตรโอโซโพรพิวบอเรทหรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์เท่ากับ 1-9 โมลเปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการปั่นจนจนสารละลายใส แล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายด้วยการเติมน้ำกลั่นให้ได้สารละลายปริมาตร

200 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องปั่นกวนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที

- 3) นำสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วมาใส่ภาชนะเพื่อสำหรับการทำโซโนเคมี ด้วยโพรบโซโนเคมี เป็นเวลา 10 นาที 750 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการโซโนเคมี

- 4) เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลาย ขณะทำโซโนเคมีจนมีค่า pH เท่ากับ 9
- 5) ทำการล้างสารละลายคอลลอยด์ด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน คนสารละลายคอลลอยด์ให้เข้ากัน แล้วนำมาใส่หลอดบรรจุสารเพื่อใช้ในการปั่นเหวี่ยงตะกอนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งค่าที่ความเร็วรอบ 6000 รอบ เป็นเวลา 6 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เติมน้ำปลอดประจุใส่ที่แยกชั้นกับตะกอนทั้ง วัดค่า pH ด้วยยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ของสารละลายที่เททิ้ง แล้วเติมน้ำปลอดประจุ ทำซ้ำในข้อ 4) จนได้ค่า pH 7 หรือมีค่าเท่ากับค่า pH ของน้ำปลอดประจุ
- 7) นำสารละลายคอลลอยด์ที่ปรับค่า pH เรียบร้อยแล้ว เข้าเตาอบเพื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการโซโนเคมี

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวอย่าง

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(X- ray diffractometer; XRD)

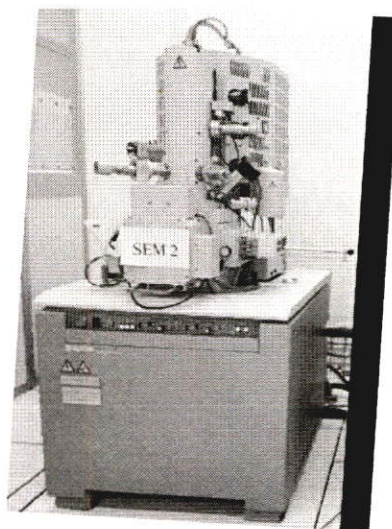
ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ พร้อมกับตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ที่ทำการเจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนยังคงมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับซิงค์ออกไซด์หรือไม่ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ โดยนำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงใส่ในแผ่นวิเคราะห์ชิ้นงานพร้อมทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือของบริษัท Rigaku รุ่น SmartLab ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้ $\text{Cu K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีความยาวคลื่น 1.504 อังสตรอม ในโหมด theta-2-theta ตั้งแต่มุม 20 ถึง 80 องศา ด้วยความละเอียด 0.02 องศา



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของบริษัท Rigaku รุ่น SMARTLAB

3.3.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

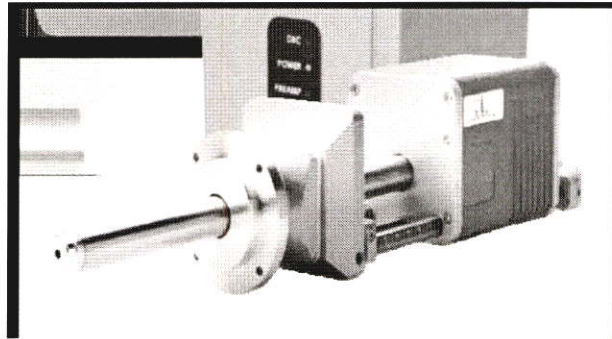
สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยโบรอนหรือฟลูออรีน จะทำการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น Hitachi S-4700 โดยใช้กำลังขยายที่ 10k และ 100k ดังแสดงในภาพที่ 3.4 จากวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถประมาณขนาดของอนุภาคได้ ขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวอย่างสามารถทำได้โดยเทสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงลงบนแผ่นคาร์บอนเทป (Carbon tape) แล้วนำแผ่นคาร์บอนเทปที่มีสารตัวอย่างติดอยู่มาติดลงบนฐานรองรับชิ้นงานที่สำหรับใส่ในเครื่อง แล้วนำไปเคลือบด้วยโมเลกุลแพลททินัมด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า



รูปที่ Error! No text of specified style in document..4 เครื่อง Field-emission Scanning Electron Microscopy ของบริษัท Hitachi รุ่น s 4700

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

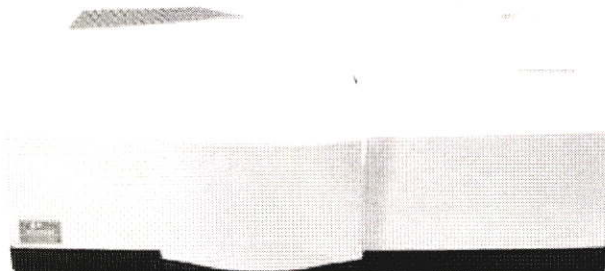
การตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างสามารถใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ได้ โดยเครื่องมือชนิดนี้จะมีการติดตั้งอยู่กับเครื่องวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิว Scanning Electron Microscopy ซึ่งจะวัดปริมาณอะตอมของธาตุที่เจอเข้าไป และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของบริษัท IXRF systems รุ่น 550i ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ Error! No text of specified style in document..5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ของบริษัท IXRF systems รุ่น 550i

3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติการกระเจิงแสงและการสะท้อนของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy

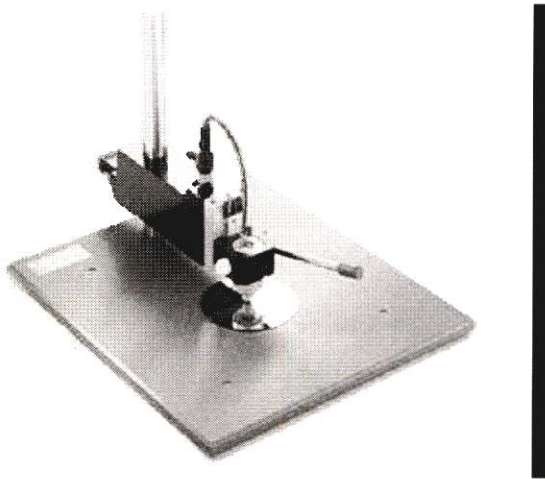
การตรวจสอบสมบัติการสะท้อนแสงของผลิตภัณฑ์ซึ่งคือออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยนำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงใส่ในฐานรองรับให้เต็มและวิเคราะห์ด้วยโหมดการทำงานการสะท้อนแสง



รูปที่ Error! No text of specified style in document..6 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสงของวัสดุ UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy ของบริษัท PerkinElmer รุ่น LAMBDA 950

3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุจากการวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4 point probe

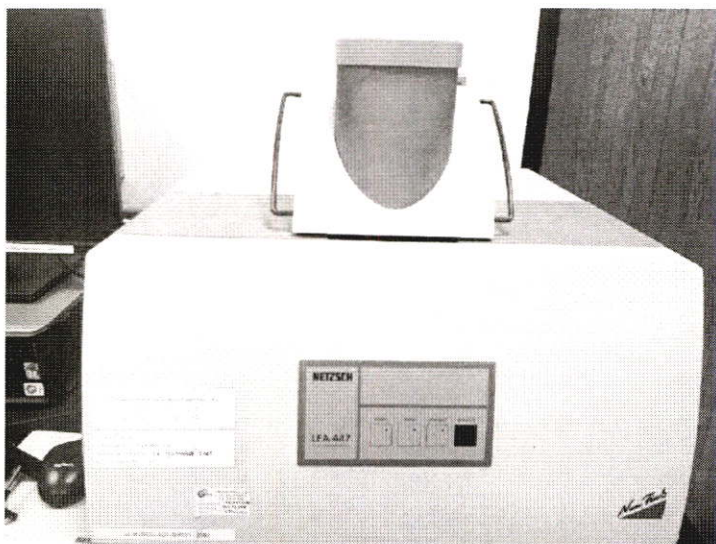
การตรวจสอบสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง สามารถทำได้ด้วยการอัดเม็ดสารตัวอย่างด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ด้วยการผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol : PVA) ในสารตัวอย่างเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการไล่สารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ออก แล้วจึงนำไปวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4 point probe ของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ Error! No text of specified style in document..7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุด้วยวิธี 4 point probe ด้วยเครื่องมือของบริษัท Jandel รุ่น SE no 82500

3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงไฟฟ้าของวัสดุจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser flash analysis

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนเชิงไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง สามารถทำได้ด้วยการอัดเม็ดสารตัวอย่างด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ด้วยการผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol : PVA) ในสารตัวอย่างเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการไล่สารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ออก แล้วจึงนำไปวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ของบริษัท Nano Hans รุ่น Netzsch LFA 447 ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ Error! No text of specified style in document..8 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงไฟฟ้าของวัสดุด้วยเทคนิค Laser flash analysis จากเครื่องมือของบริษัท Nano Hans รุ่น Netzsch LFA 447

บทที่ 4 ผลการวิจัย

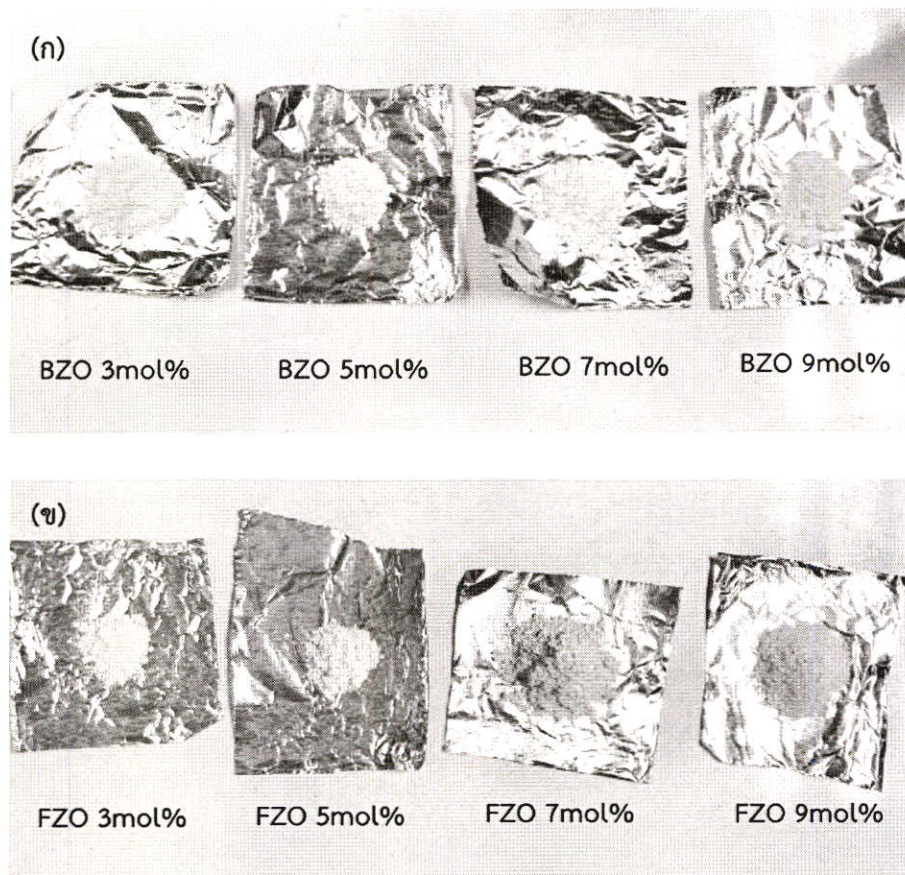
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์และวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนที่มีอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องนั้นจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอน ซึ่งในการเจืออะตอมของธาตุโบรอนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของธาตุซิงค์ทำให้พาหะข้างน้อยสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และการเจือธาตุฟลูออรีนให้เข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของธาตุออกซิเจน คาดว่าเพื่อทำให้สารที่ได้นั้นมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอนที่มากขึ้น ด้วยวิธีการสังเคราะห์พื้นฐานโซล-เจลที่ร่วมกับ 1) วิธีการตกตะกอนร่วม และ 2) วิธีโซโนเคมี โดยวิธีการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ง่ายและทำได้อย่างรวดเร็วโดยการเติมเบสเข้าไปเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในสารละลาย แต่ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านกระบวนการเผา และสำหรับวิธีโซโนเคมีซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ใช้กระบวนการเผาและความดันสูง ซึ่งใช้การเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นเสียงทำให้ช่องว่างเกิดการบีบอัดและขยายตัวในฟองอากาศแล้วเกิดการสลายตัวเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แล้วเกิดการชนกันของฟองอากาศทำให้เกิดเป็นตะกอนขึ้นในการสังเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่มีสารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate) และมีตัวทำละลายคือ น้ำปอลดประจุและเอทานอล โดยใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้สารละลายตกตะกอนที่มีความเป็นเบส pH 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่ให้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอนุภาคมากที่สุด เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนการเจือที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุประเภทออกไซด์ในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และใช้งานทางด้านตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งผลการสังเคราะห์และการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างเบื้องต้นของผลผลิตภัณฑ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือธาตุโบรอนและฟลูออรีนจะได้มีการอธิบายดังนี้

4.1 ผลและการอภิปรายจากสมบัติต่างๆ ของผลผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

ลักษณะผลผลิตภัณฑ์ทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนและฟลูออรีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ซึ่งผงที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีเฉดสีของผลผลิตภัณฑ์ที่ระบุในตารางที่ 4.1 โดยผลผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีสีเหลือง สีขาว ไปจนถึงสีชมพูซึ่งเปลี่ยนไปตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเจือ ซึ่งสีที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขจะมีสีที่ไม่เหมือนกันซึ่งอาจจะเกิดการสลายตัวของสารอื่นในขั้นตอนการเผาไปไม่หมด

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างผลึกของผลผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

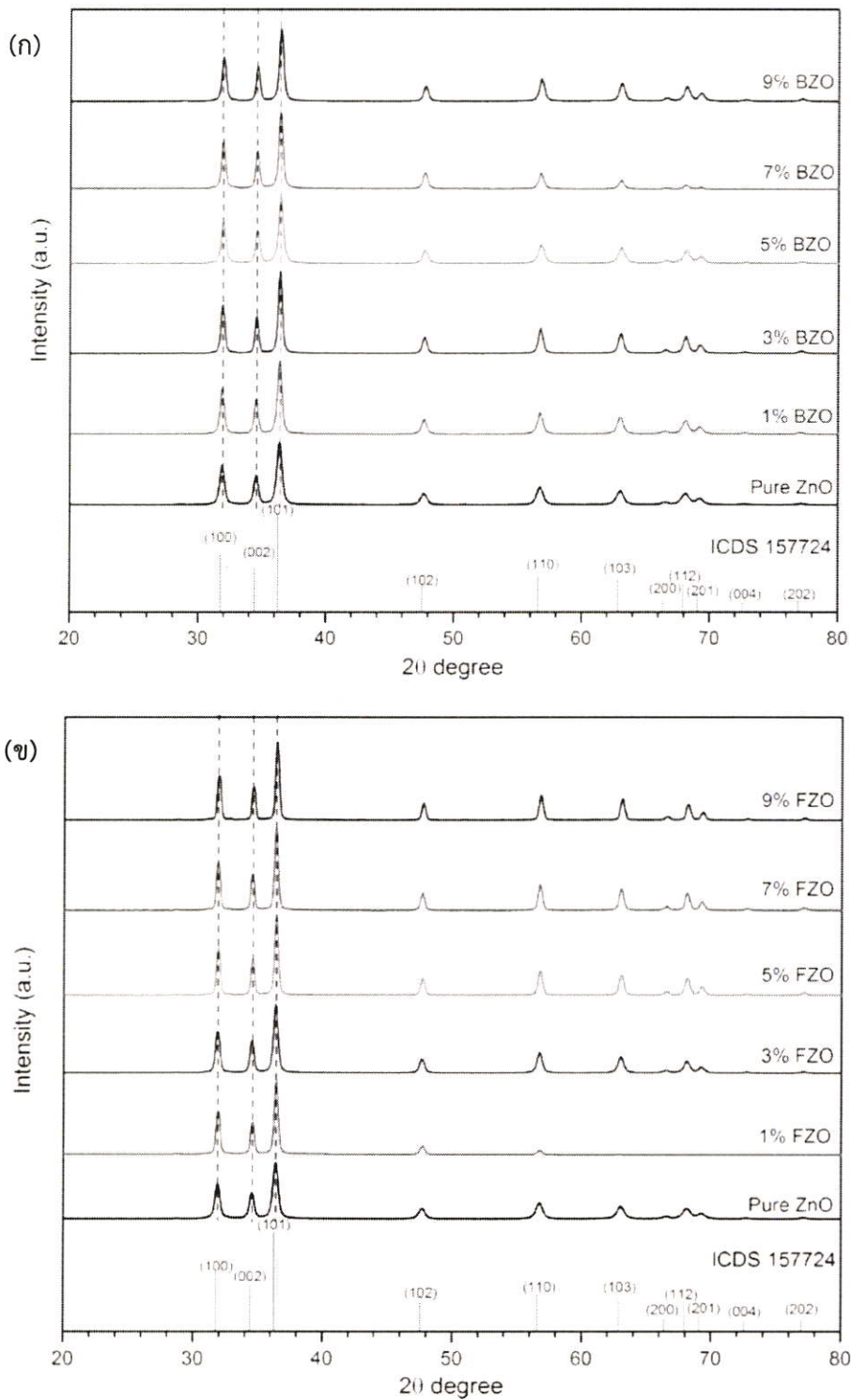
เมื่อทำการเจือโบรอนและฟลูออรีนลงในซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนที่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม พร้อมกับผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผลผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในเงื่อนไขการเจือโบรอนและฟลูออรีนลงในซิงค์ออกไซด์กับฐานข้อมูลโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์หมายเลข ICDS 157724 จะตรงกับโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบโครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีมุม 2θ เท่ากับ 31.8 34.4



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีนด้วยวิธีตกตะกอนร่วมที่โมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ร่วมกับการเผาผลิที่ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 สีของผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยวิธีตกตะกอนร่วมที่โมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ร่วมกับการเผาผลิที่ 500 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	สีของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์	
	การเจือด้วยโบรอน	การเจือด้วยฟลูออรีน
3	เหลือง	เหลืองอ่อน
5	เหลือง	ขาว
7	เหลืองอ่อน	เหลืองอ่อน
9	ชมพูอ่อน	ชมพูอ่อน



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีน ในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

36.3 47.656.6 62.9 66.4 68.0 69.1 72.6 และ 77.0 องศา ซึ่งตรงกับระนาบเป็น (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) และ (202) ตามลำดับ ในทุกอัตราส่วนที่ทำการเจือโบรอน และฟลูออรีนจะไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนยังคงสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์เฮกซะโกนอล และยังไม่มีความสำคัญของการเลี้ยวเบนของฟลูออรีนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 เปอร์เซ็นต์โมล จากนั้นได้ทำการคำนวณขนาดของผลึกเมื่อมีการเจือโบรอนและฟลูออรีนที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 เปอร์เซ็นต์โมล จากนั้นได้ทำการคำนวณขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนโดยคำนวณจากสมการ Scherrer [24] ที่ใช้ 3 พีคหลักของรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ได้แก่ ระนาบ 100, 002 และ 101 ในการคำนวณขนาดผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า จะพบว่า สำหรับขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม เมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปจะทำให้มีขนาดผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากการที่กระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ผลิตภัณฑ์จึงทำให้ผลึกของซิงค์ออกไซด์นั้นเกิดการรวมตัวกันส่งผลทำให้ขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น และคาดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากการที่โบรอนไอออนสามารถที่จะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้จึงทำให้เกิดการขยายของโครงสร้างผลึก เนื่องจากขนาดไอออนของโบรอนเป็น 41 พิโคเมตรและขนาดของไอออนซิงค์เป็น 74 พิโคเมตร โดยสามารถที่จะยืนยันการเข้าไปอยู่ในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ของโบรอนไอออนได้จากสมบัติทางแสง [25,26]

ส่วนในเงื่อนไขที่มีการเจือฟลูออรีนในซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมพบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งให้ผลที่เหมือนกันกับในกรณีการเจือด้วยธาตุโบรอน ส่วนขนาดผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิม 20 นาโนเมตร มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 25, 24, 27, 31 และ 29 นาโนเมตร เมื่อมีอัตราส่วนการเจือฟลูออรีนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 9 โมล เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งขนาดผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ใหญ่ขึ้นนั้นคาดว่า เกิดจากการรวมตัวกันของผลึกจากการได้รับความร้อนเนื่องจากการที่กระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นต้องมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกันกับในกรณีของการเจือโบรอนในซิงค์ออกไซด์และอีกหนึ่งเหตุผลประกอบซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเข้าไปแทรกของไอออนฟลูออรีนในโครงสร้างหลักของซิงค์ออกไซด์ [27] โดยฟลูออรีนมีขนาดไอออนเท่ากับ 134 พิโคเมตร เข้าไปในตำแหน่งของอะตอมออกซิเจนที่มีขนาดของไอออนเป็น 140 พิโคเมตร โดยสามารถยืนยันการมีอยู่ของฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างได้จากสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า

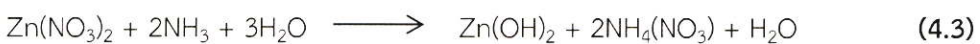
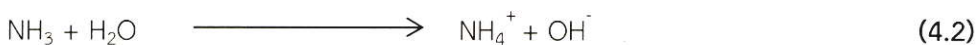
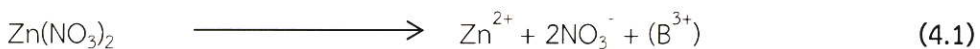
ตารางที่ 4.2 ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมร่วมกับการเผาผลิภัณฑ์ที่ 500 องศาเซลเซียส

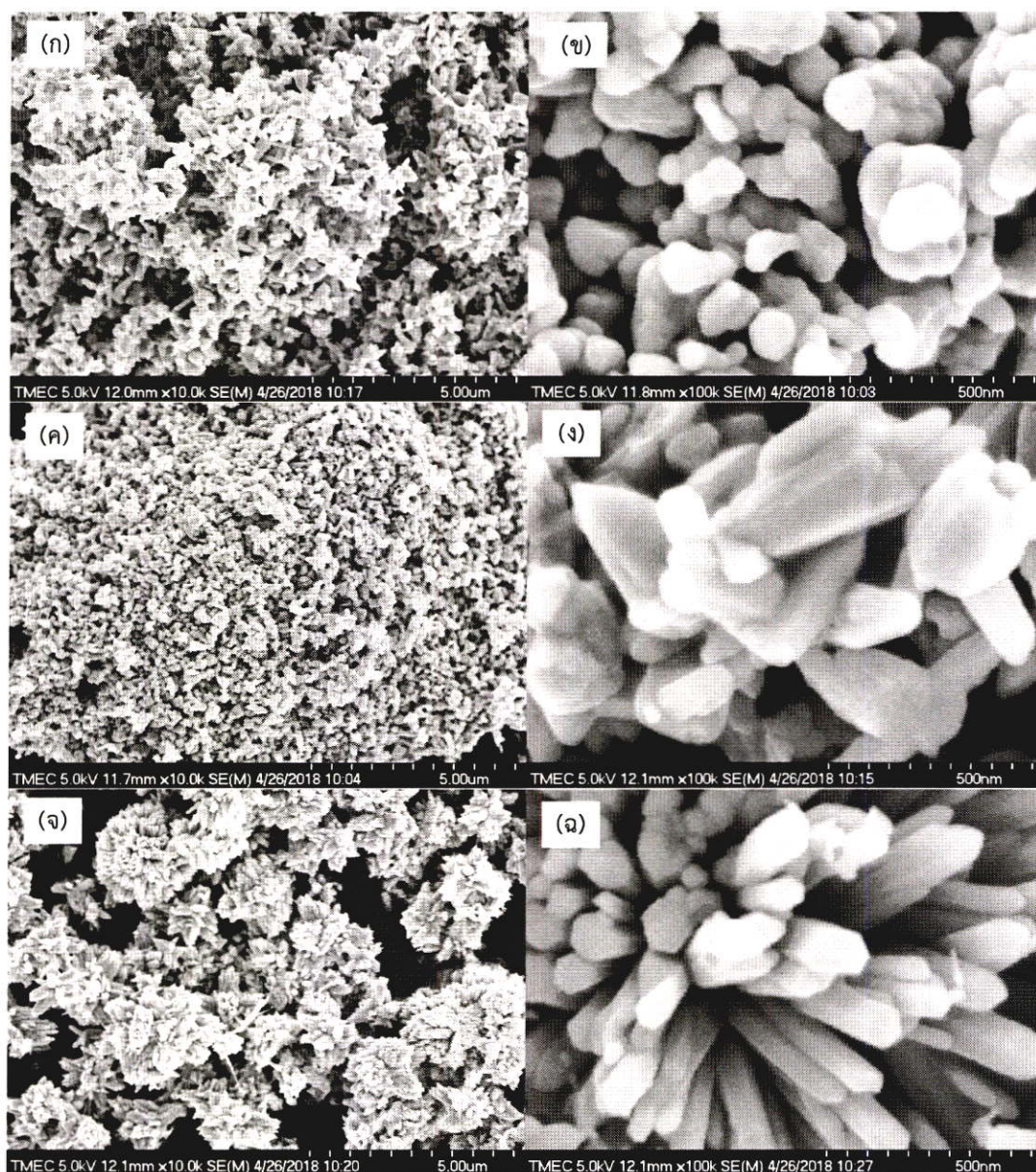
อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ (นาโนเมตร)	
	การเจือด้วยโบรอน	การเจือด้วยฟลูออรีน
0	20	20
1	22	25
3	25	24
5	22	27
7	24	31
9	24	29

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่การเจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในรูปที่ 4.3(ก) และ 4.3(ข) เป็นการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมซึ่งมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลม (Spheres-like structure) ที่รวมตัวกันโดยมีขนาดของอนุภาคประมาณ 143.3 นาโนเมตร ส่วนรูปที่ 4.3(ค) และ 4.3(ง) เป็นสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่เจือไนท์ที่เจือด้วยโบรอน 1 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปทำให้ลักษณะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปมีลักษณะเป็นแท่งที่รวมตัวกันมีความยาวของแท่งประมาณ 507.2 นาโนเมตร และรูปที่ 4.3(จ) และ 4.3(ฉ) เป็นสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่เจือไนท์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเจือโบรอนเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ได้ลักษณะที่เป็นแท่งหกเหลี่ยมที่รวมกันเป็นกลุ่มคล้ายดอกไม้ (Flower-like structure) ที่มีความยาวของแท่งที่ประมาณ 701.0 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดของแท่งซิงค์ออกไซด์ที่ใหญ่ขึ้นสอดคล้องกับขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้น เหตุผลประกอบการก่อตัวของอนุภาคหรือแท่งซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นมาจากการที่ซิงค์ไนเตรตที่เป็นสารตั้งต้นมีการแตกตัวได้เป็นซิงค์ไอออนและไนเตรตไอออนในสารละลาย ส่วนไตรโอโซไฟรทิวบอ-เรทแตกตัวได้เป็นโบรอนไอออนในสารละลายตามสมการที่ 4.1 และแอมโมเนียที่ผสมกับน้ำมีการแตกตัวเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนในสมการที่ 4.2 เมื่อสารละลายซิงค์ไนเตรตและสารละลายแอมโมเนียผสมกันดังสมการที่ 4.3 จะทำให้ซิงค์ไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์และเกลือไนเตรตที่ละลายน้ำ โดยถ้ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของโบรอนมากขึ้นทำให้ในระบบเกิดโบรอนไอออนมากขึ้น โดยโบรอนไอออนชอบเกาะที่ระนาบ (10-10) ส่งผลทำให้ซิงค์ไอออนไปจับซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่ระนาบ (0001) ได้มากขึ้นทำให้เกิดเป็นแท่งที่ยาวขึ้นดังตามรูปที่ 4.3 ซึ่งในกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้น เมื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแตกตัวและรวมตัวกันใหม่ของไอออนตามสมการที่ 4.3 จะต้องให้ความร้อนเพื่อไล่ไฮดรอกไซด์ไอออนออกเพื่อให้เกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ดังสมการที่ 4.4 [28] จากผลการเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์จากการเพิ่มปริมาณการเจือด้วยโบรอนสามารถอธิบายเสริมได้จากเหตุผลดังนี้ การที่ไอออนของโบรอนนั้นสามารถที่จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ซึ่งคาดว่าโบรอนไอออนจะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างแบบแทรกระหว่างช่องว่างของซิงค์ไอออนและออกซิเจนไอออนที่เป็นโครงสร้างหลัก โดยมีขนาดไอออนของโบรอนเป็น 41 พิโคเมตร ขนาดไอออนของซิงค์เป็น 74 พิโคเมตร และออกซิเจนมีขนาดไอออนเป็น 140 พิโคเมตร ทำให้โครงสร้างผลึกนั้นเกิดการขยายตัวออกได้เมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อขนาดผลึกที่ขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะเป็นแท่งเพิ่มมากขึ้น

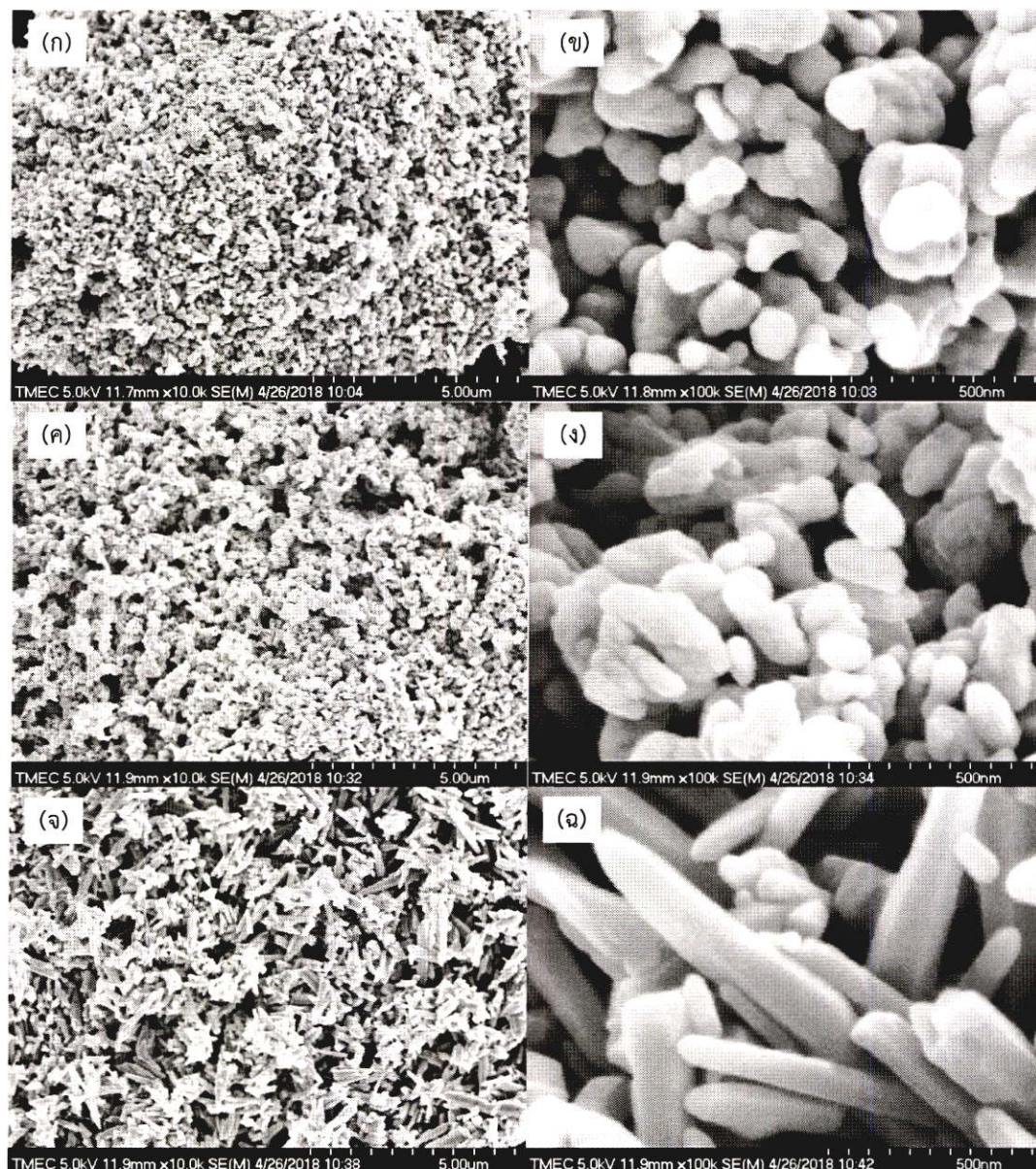
สมการแสดงการเกิดกระบวนการตกตะกอนร่วมที่เจือด้วยโบรอน [43]





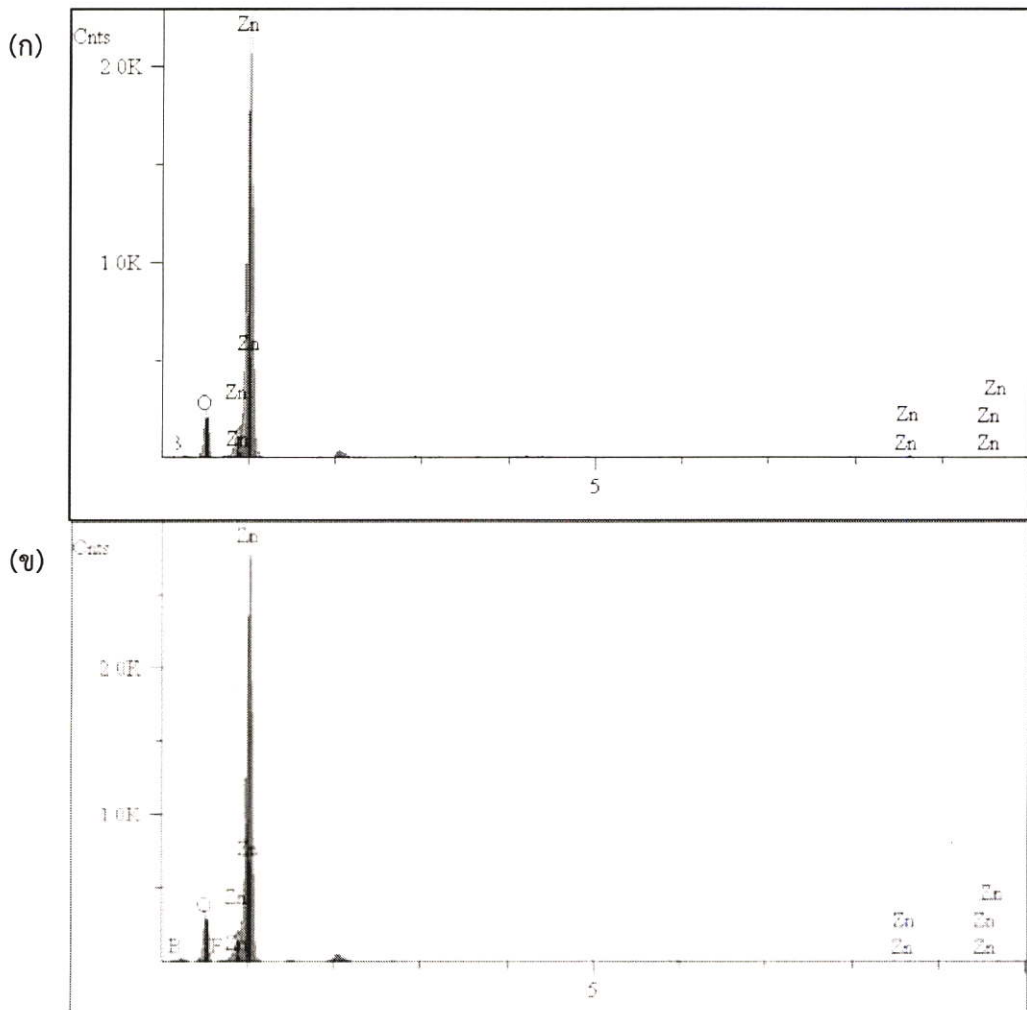
รูปที่ 4.3 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม
 (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า
 (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า
 (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า

ส่วนการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่การเจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) เป็นสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือฟลูออรีนจะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลมที่รวมตัวกันที่มีขนาดประมาณ 143.3 นาโนเมตร และเมื่อมีการเจือฟลูออรีนที่ 1 โมลเปอร์เซ็นต์ในซิงค์ออกไซด์จะมีสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็นอนุภาคที่กระจายตัวอยู่กับแท่งดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) และ 4.4(ง) ส่วนการเจือฟลูออรีนที่



รูปที่ 4.4 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า

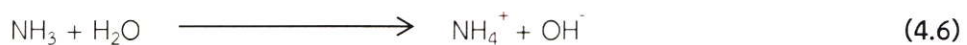
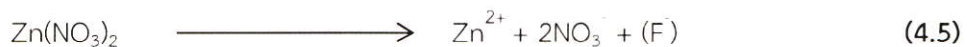
เงื่อนไข 5 โมลเปอร์เซ็นต์ในซิงค์ออกไซด์มีความยาวของแท่งประมาณ 225.8 และ 760.8 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(จ) และ 4.4(ฉ) โดยสาเหตุในการเกิดเป็นอนุภาคหรือแท่งซิงค์ออกไซด์ได้นั้น เกิดจากการแตกตัวของสารละลายซิงค์ไนเตรต (สารตั้งต้น) เกิดเป็นซิงค์ไอออนและไนเตรตไอออนและสารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ได้เป็นฟลูออรีนไอออนดังแสดงในสมการที่ 4.5 ส่วนแอมโมเนียในสารละลายตามสมการที่ 4.6 จะเกิดการแตกตัวกลายเป็นแอมโมเนียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน สารละลายซิงค์ไนเตรตและสารละลายแอมโมเนียมจะผสมกันดังสมการที่ 4.7 จะเกิดการรวมตัวกันของซิงค์ไอออนและไฮดรอก-



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณธาตุต่างๆ ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอนและ (ข) ฟลูออรีนที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

ไซด์ไอออนได้เป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์และเกลือไนเตรตที่ละลายน้ำหลังจากนั้นต้องนำซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการรวมตัวกันของไอออนในสารละลายแล้วต้องนำมาผ่านการให้ความร้อนเพื่อไล่ไฮดรอกไซด์ไอออนออกตั้งสมการที่ 4.8 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ออกไซด์ โดยการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของฟลูออรีนนั้นจะทำให้เกิดปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีจำนวนของไฮดรอกไซด์ไอออนเกาะพื้นผิวระนาบ (0001) มากขึ้นทำให้ซิงค์ไอออนมาจับเกิดเป็นแท่งที่ยาวขึ้นดังตามรูปที่ 4.4 [28]

สมการแสดงการเกิดกระบวนการตกตะกอนร่วมที่เจือด้วยฟลูออรีน [43]

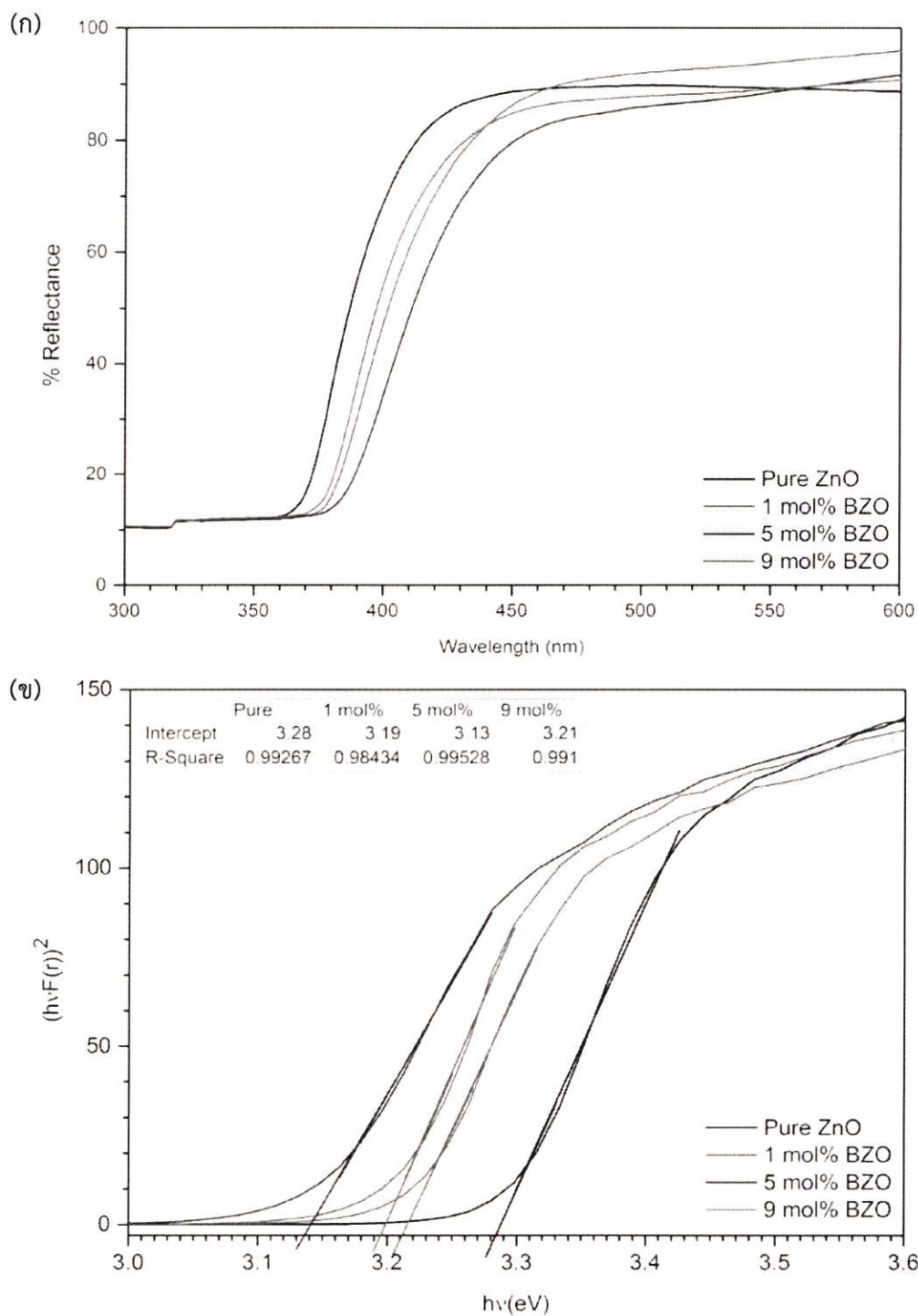


4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ในผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

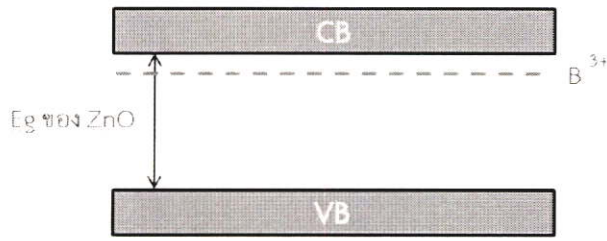
การตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อทำการยิงรังสีเอกซ์จะทำให้ตรวจพบธาตุซิงค์จากพลังงานชั้น L_{α} ออกซิเจนจากชั้น K_{α} โบรอนจากชั้น K_{α} และฟลูออรีนจากชั้น K_{α} จากรูปที่ 4.5(ก) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจะพบพีคของซิงค์ร้อยละ 74.14 ออกซิเจนร้อยละ 18.73 และโบรอนร้อยละ 7.91 ส่วนรูปที่ 4.5(ข) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจะพบพีคของซิงค์ร้อยละ 62.55 ออกซิเจนร้อยละ 27.19 และฟลูออรีนร้อยละ 10.23

4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยโหมตการสะท้อนของแสงด้วยโหมตการวัดการสะท้อนแสงและการคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยโบรอนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมที่อัตราส่วน 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยกราฟการสะท้อนแสงของการเจือโบรอนในซิงค์ออกไซด์ได้แสดงรูปที่ 4.6(ก) พบว่า จะมีขอบการดูดกลืน (Absorbance edge) ที่เลื่อนไปทางที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น (red shift) เมื่อมีการเจือโบรอนลงในซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้าม (Bandgap energy: E_g) ด้วยการคำนวณฟังก์ชันของ Kubelka Munk แล้วนำไปเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(h\nu F(R))^{-2}$ และ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ซึ่งจะสามารถหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามได้จากการหาความชันของเส้นกราฟที่มีความชันสูงสุดแล้วลากเส้นความชันนั้นตัดกับแกน x จะได้ค่าแถบพลังงานต้องห้ามดังรูปที่ 4.6(ข) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 0, 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะได้ค่าแถบพลังงานต้องห้ามเป็น 3.28, 3.19, 3.13 และ 3.21 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ จากผลการคำนวณค่าแถบพลังงานต้องห้ามจะพบว่าที่อัตราส่วน 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่แคบกว่าที่กรณีที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอนหรือมีแต่เพียงซิงค์ออกไซด์ ซึ่งการเลื่อนของขอบการดูดกลืนไปทางด้านที่มีพลังงานลดลงแสดงถึงการมีอยู่ของโบรอนในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จากการที่แถบพลังงานของอะตอมสารเจือโบรอนประพฤติตัวเป็นแถบบกพร่อง (Defect level) ที่ใกล้กับแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของซิงค์ออกไซด์ จึงส่งผลให้มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์-ออกไซด์นั้นที่แคบลง [29,30] ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และอีกหนึ่งเหตุผลที่ช่วยสนับสนุนการลดลงของแถบพลังงานต้องห้ามเป็นผลจากลักษณะสัญญาณวิทยาที่มีลักษณะเป็นแท่งดังแสดงในผลการวิเคราะห์สัญญาณวิทยาดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.2

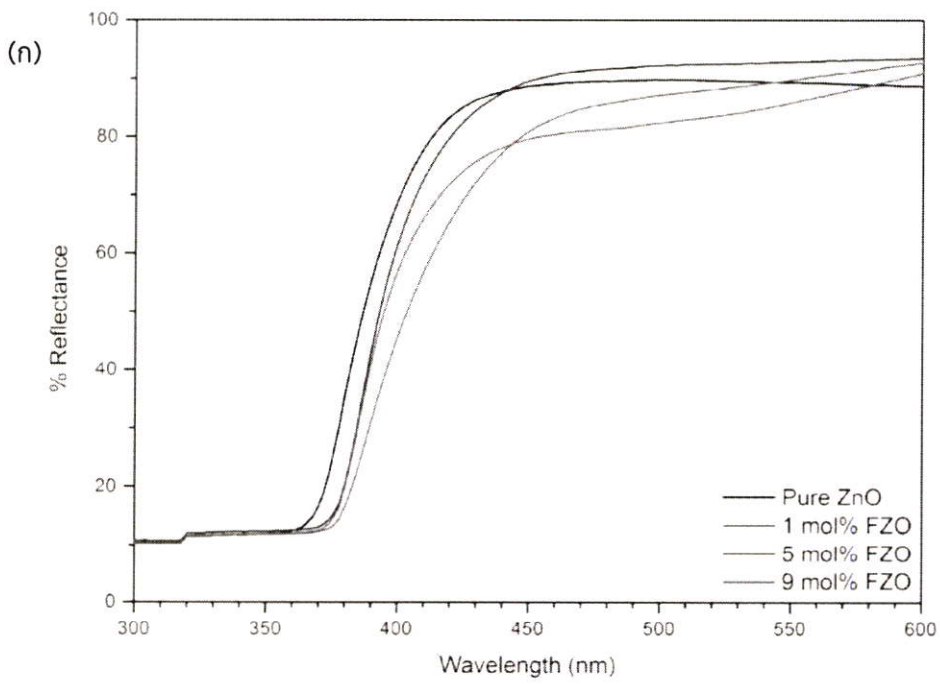


รูปที่ 4.6 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

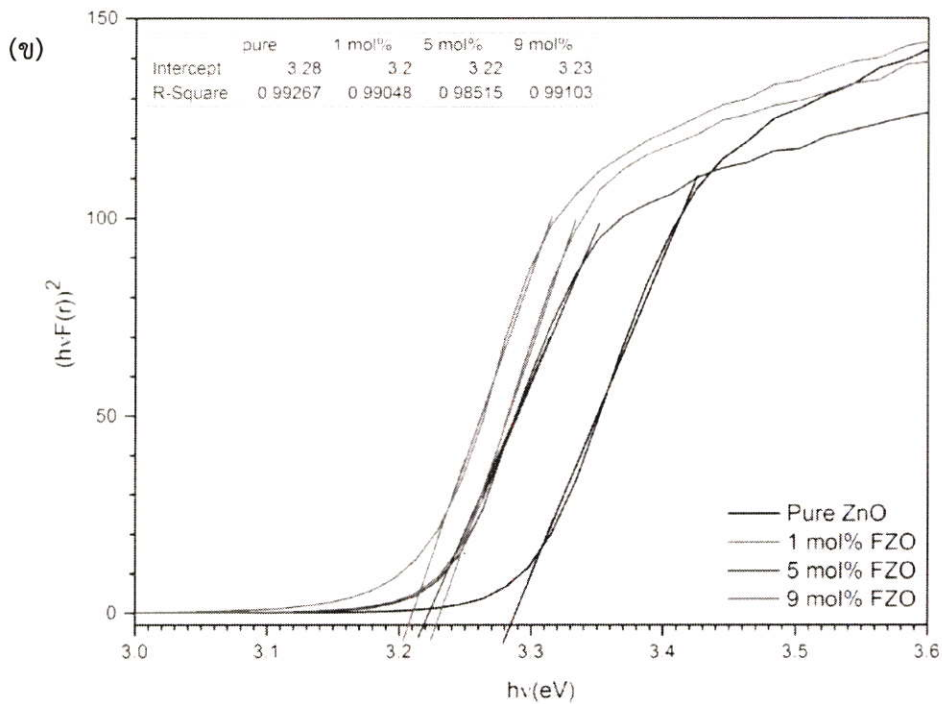


รูปที่ 4.7 แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์เมื่อเจือด้วยโบรอน

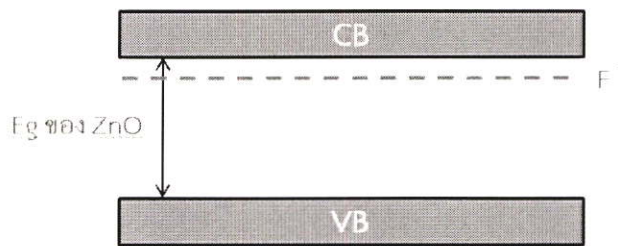
ส่วนการตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการวัดการสะท้อนแสงและการคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 กราฟการสะท้อนแสงของการเจือฟลูออรีนลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมจะมีขอบการดูดกลืนที่เลื่อนไปทางที่มีพลังงานต่ำลง ดังรูปที่ 4.8(ก) และจากกราฟการสะท้อนแสงสามารถนำไปคำนวณหาค่าแถบพลังงานช่องว่างจากการคำนวณสมการของ Kubelka Munk จะได้ค่าแถบพลังงานช่องว่างดังรูปที่ 4.8(ข) จะได้ค่าแถบพลังงานช่องว่างเป็น 3.28, 3.20, 3.22 และ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าแถบพลังงานช่องว่างที่แคบลงในเงื่อนไขที่มีการเจือด้วยฟลูออรีนเนื่องจากเกิดตำหนิภายในผลึกจากการเข้าไปแทรกของฟลูออรีนไอออนที่มีขนาดไอออน 134 พิโคเมตร ในตำแหน่งของอะตอมออกซิเจนทำให้เกิดเป็นการเคลื่อนที่ของตำหนิและอาจเกิดจากการแทรกของไอออนฟลูออรีนส่งผลทำให้ขนาดผลึกมีค่าที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งการมีอยู่ของฟลูออรีนในโครงสร้างหลักและลักษณะพื้นฐานวิทยาที่เป็นแบบแท่งนั้นทำให้สมบัติทางแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปคือเกิดแถบบกพร่องในแถบพลังงานต้องห้ามจากอิทธิพลของฟลูออรีนไอออนส่งผลให้ค่าแถบพลังงานช่องว่างที่แคบลงดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม



รูปที่ 4.8 (ต่อ) (ก) กราฟการสะท้อนสมบัตินทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

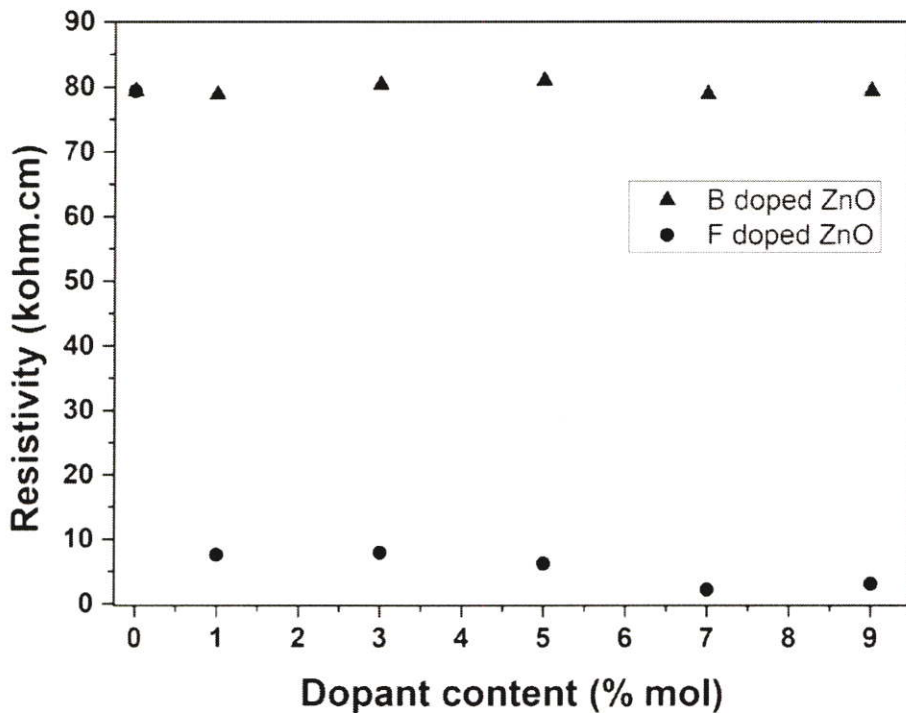


รูปที่ 4.9 แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์เมื่อเจือด้วยฟลูออรีน

4.1.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

การตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนพบว่า เมื่อเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็น 79.44, 78.93, 80.44, 81.03, 78.85 และ 79.43 กิโลโอห์มเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการที่โบรอนไอออนเข้าไปแทรกในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จะทำให้มีไอออนของโบรอนที่มากเกินไประหว่างในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ทำให้เป็นการเคลื่อนที่ของตำหนิ (Dislocation) หรือทำให้เกิดการแบ่งแยกที่ของเกรน (Grain Boundary) ส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลง [31,32] ส่วนสัญลักษณ์วงกลมเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมพบว่า มีค่าความต้านทานทาง

ไฟฟ้าที่ลดลงมากเมื่อเทียบกับซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วน 1, 3, 5, 7 และ 9 สอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 7.61, 7.93, 6.16, 2.22 และ 3.08 กิโลโห์ม-เซนติเมตร ตามลำดับ โดยการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเกิดจากการเข้าไปแทรกตัวของฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างหลักซิงค์ออกไซด์ทำให้เกิดเป็นตำหนิภายในผลึกและแถบระดับพลังงานบกพร่องในแถบพลังงานต้องห้าม ส่งผลให้ค่าของแถบพลังงานต้องห้ามลดลงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น [33] จึงเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนมีค่าลดลง



รูปที่ 4.10 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

4.1.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

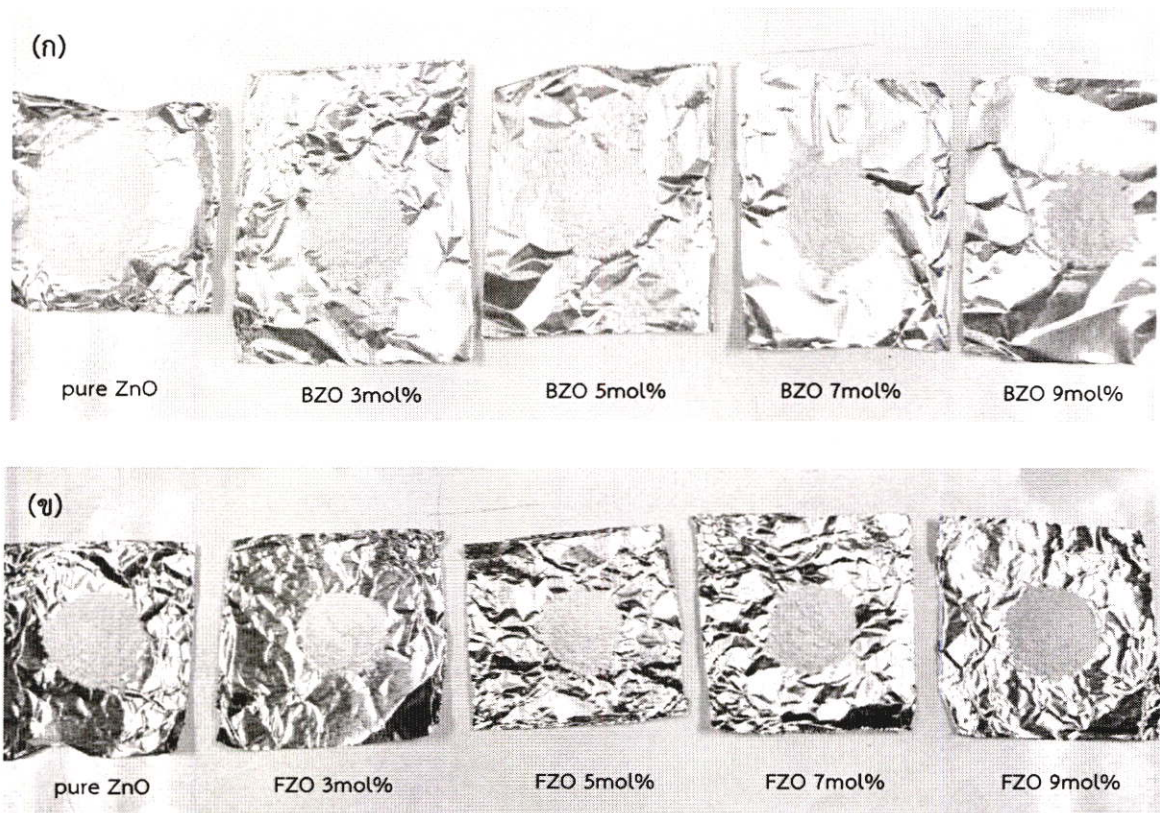
การตรวจวัดสมบัติทางความร้อนด้วยกระบวนการวิเคราะห์ laser flash ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม โดยเลือกตัวอย่างการเจือสารที่เปอร์เซ็นต์โมลเท่ากับ 1, 5 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนในซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 1 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โมล จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น การวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้เมื่อทำการวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเทียบปริมาณการเจือสารที่ 9 เปอร์เซ็นต์โมล ตัวอย่างที่เจือด้วยโบรอนจะมีค่าการนำไฟฟ้าเชิงความร้อนเท่ากับ $2.163 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ส่วนตัวอย่างที่เจือด้วยฟลูออรีนจะมีค่าการนำไฟฟ้าเชิงความร้อนเท่ากับ $3.438 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ดังนั้นการเจือด้วยโบรอนหรือฟลูออรีนลงในซิงค์ออกไซด์จะทำให้การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเหมาะในการนำไปทำวัสดุในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ลดลงในขณะที่มีการทำงาน ณ อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้าเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ตกตะกอนร่วม

อุณหภูมิ ในการ วิเคราะห์ (องศา เซลเซียส)	ค่าการนำไฟฟ้าเชิงความร้อน (W/m·K)						
	ZnO	B doped ZnO			F doped ZnO		
		1%	5%	9%	1%	5%	9%
25	1.031	1.468	1.643	2.163	1.534	4.259	3.438
50	0.956	1.384	1.523	2.027	1.396	3.847	3.068
100	0.906	1.266	1.368	1.847	1.265	3.363	2.721
150	0.871	1.127	1.265	1.722	1.184	2.984	2.491
200	0.840	1.163	0.915	1.573	0.896	2.706	2.208
250	0.802	1.134	1.051	1.496	1.030	2.495	2.063

4.2 ผลและการอภิปรายจากสมบัติต่างๆ ของผลึกภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

ลักษณะทางกายภาพมีลักษณะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนและฟลูออรีนเป็นผงละเอียด และมีสีขาวดังแสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนร่วมและโซโนเคมีพบว่า ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซโนเคมีนั้นให้ผงผลึกภัณฑ์ที่ละเอียดและมีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาที่ใช้ความร้อนสูงแบบวิธีตกตะกอนร่วมและให้สีของสารที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.11(ก) และ 4.11(ข)

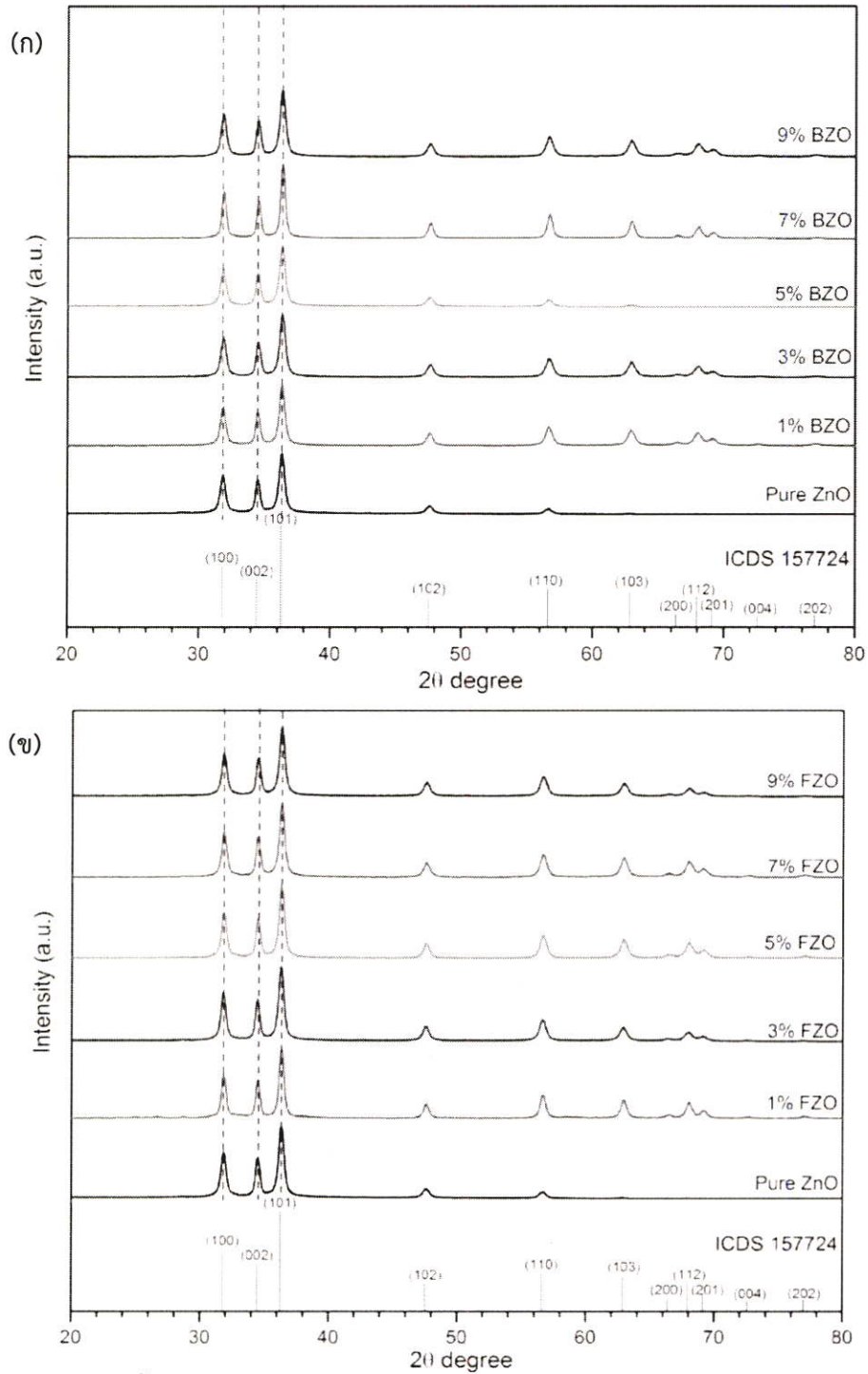


รูปที่ 4.11 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีนด้วยวิธีด้วยวิธีโซโนเคมีซึ่งปราศจากกระบวนการเผาผลึกภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.4 สีของผงซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยวิธีโซโนเคมีซึ่งปราศจากกระบวนการเผาผลึกภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง

อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	สีของผลึกภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์	
	การเจือด้วยโบรอน	การเจือด้วยฟลูออรีน
0	ขาว	ขาว
3	ขาว	ขาว
5	ขาว	ขาว
7	ขาว	ขาว
9	ขาว	ขาว

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี



รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอน และ (ข) ฟลูออรีน ในอัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการโซโนเคมี ซึ่งมีเงื่อนไขในการเจือโบรอนและฟลูออรีนลงในซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนเท่ากับ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์เหมือนกันกับการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี โดยผลได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งผลิตภัณฑ์การเจือซิงค์ออกไซด์ด้วยโบรอนแสดงในรูปที่ 4.12(ก) ส่วนผลิตภัณฑ์การเจือซิงค์ออกไซด์ด้วยฟลูออรีนแสดงในรูปที่ 4.12(ข) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนในเงื่อนไขต่างๆ ทั้งที่เป็นการเจือด้วยโบรอนและฟลูออรีน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล ICDS 157724 จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ตรงกับโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์แบบเฮกซะโกนอล มีระนาบผลึกเป็น (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) และ (202) ซึ่งสอดคล้องกับมุม 2θ เท่ากับ 31.8 34.4 36.3 47.5 56.6 62.9 66.4 68.0 69.0 72.7 และ 77.0 องศา ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลองที่ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม แต่กระบวนการโซโนเคมีจะมีข้อดีกว่าการตกตะกอนร่วมนั่นคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยโซโนเคมีจะเกิดเป็นอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ทันที ไม่จำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการเผาที่อุณหภูมิเข้าไปหลังจากการสังเคราะห์ และในทุกอัตราส่วนที่ทำการเจือโบรอนและฟลูออรีนในซิงค์ออกไซด์ไม่พบเฟสแปลกปลอม มีความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ค่อนข้างสูง ไม่เกิดการเลื่อนของพีคทั้งในซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีน ส่วนการคำนวณขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนที่มากขึ้นจะให้ขนาดผลึกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และผลที่ได้จะสอดคล้องกับขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนด้วยเช่นกัน ซึ่งขนาดผลึกที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันกับขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ยกเว้นเงื่อนไขการเจือโบรอน 7 โมลเปอร์เซ็นต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเงื่อนไขที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอน 19 นาโนเมตร เป็น 23 นาโนเมตร คาดว่าอาจจะเป็นผลจากที่มีลักษณะของสัญญาณวิทยาที่แตกต่างจากที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆหรืออาจเกิดการรวมตัวของผลึกในขั้นตอนการสังเคราะห์จึงทำให้มีขนาดของผลึกมีขนาดที่แตกต่างไปจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและขนาดของผลึกแสดงให้เห็นว่า กระบวนการโซโนเคมีเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคให้อยู่ในระดับนาโนเมตรได้ โดยไม่เกิดการรวมตัวกันของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ไม่ต้องผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเหมือนในกระบวนการตกตะกอนร่วมจึงไม่เกิดการรวมกันของผลึกจากพลังงานความร้อนอย่างเช่นในกระบวนการตกตะกอนร่วม

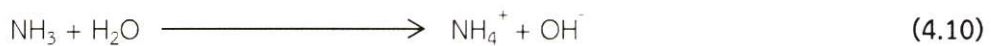
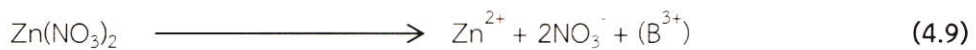
ตารางที่ 4.5 ขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

อัตราส่วนการเจือ (โมลเปอร์เซ็นต์)	ขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ (นาโนเมตร)	
	การเจือด้วยโบรอน	การเจือด้วยฟลูออรีน
0	19	19
1	19	21
3	19	20
5	19	19
7	23	20
9	19	19

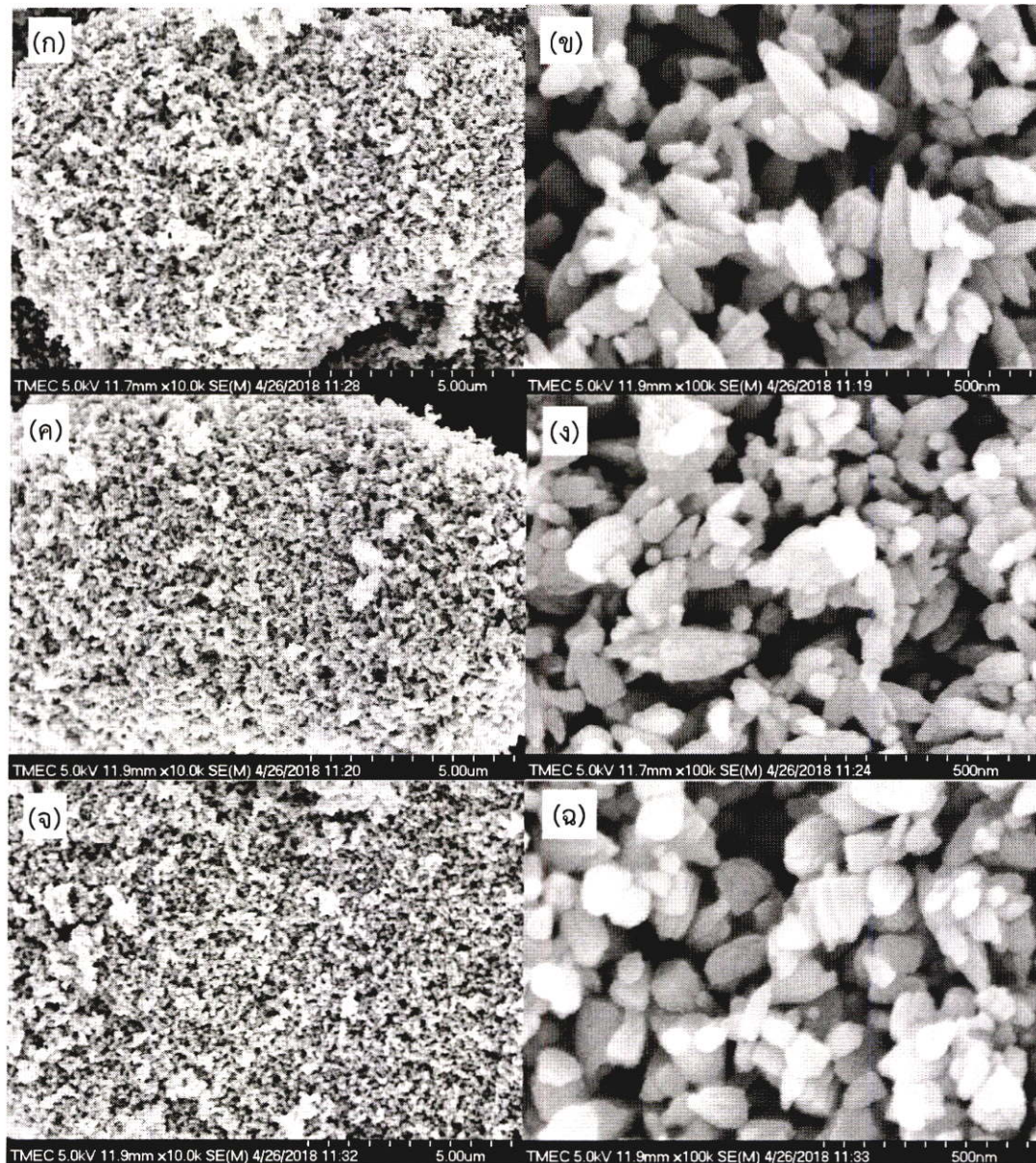
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่มีความเข้มข้นต่างๆ จากกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะได้ว่าขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์เมื่อทำการเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนมากขึ้น จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เพียงเล็กน้อยซึ่งพบว่า มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 86.4, 81.4 และ 78.7 นาโนเมตร สอดคล้องกับการเจือโบรอนที่ปริมาณ 0, 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 4.13(ก) ถึง 4.13(ง) และมีบางส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งในซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 1 และ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ มีความยาวของแท่งประมาณ 148.2 และ 134.0 นาโนเมตร ตามลำดับ การเกิดเป็นอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในกระบวนการโซโนเคมีนั้นจะคล้ายกับกระบวนการตกตะกอนร่วม โดยเกิดจากการแตกตัวของสารละลายซิงค์ไนเตรต สารละลายไตรไอโซโพรพิลวอแรทและสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์จากการรวมตัวของซิงค์ไอออนกับไฮดรอกไซด์ไอออนและได้เกลือไนเตรตที่ละลายน้ำ ซึ่งกระบวนการโซโนเคมีเป็นการให้คลื่นเหนือเสียงแก่ระบบทำให้เกิดผลทางเคมีกับสารละลายที่เกิดจากปรากฏการณ์อะคูสติก คาวิตชัน ส่งผลทำให้เกิดเป็นฟองอากาศที่มีการขยายและแตกออกภายในสารละลาย ซึ่งการแตกของฟองอากาศทำให้เกิดพลังงานและมีอุณหภูมิสูงขึ้นภายในระบบทำให้พลังงานที่สูงนี้เป็นไอน้ำไฮดรอกไซด์ไอออนออกจากซิงค์ไฮดรอกไซด์เกิดซิงค์ออกไซด์ ดังสมการที่ 4.9 ถึง 4.12 จากการที่อัตราส่วนการเจือโบรอนมากขึ้นทำให้เกิดแท่งซิงค์ออกไซด์ได้เนื่องจากมีโบรอนไอออนในระบบมากขึ้น โดยโบรอนไอออนจะไปขัดขวางการโตในระนาบ (10-10) ส่งผลให้มีปริมาณซิงค์ไอออนไปจับซิงค์ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ระนาบ (0001) ได้มากขึ้นทำให้เกิดเป็นแท่งได้แต่การให้คลื่นเหนือเสียงเป็นการไปรบกวนการก่อตัวเป็นแท่งของซิงค์ออกไซด์จากการได้รับพลังงานของคลื่นเหนือเสียงในทุกทิศทางจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเหมือนในกระบวนการตกตะกอนร่วม [28]

สมการแสดงการเกิดกระบวนการโซโนเคมีที่เจือด้วยโบรอน [34]

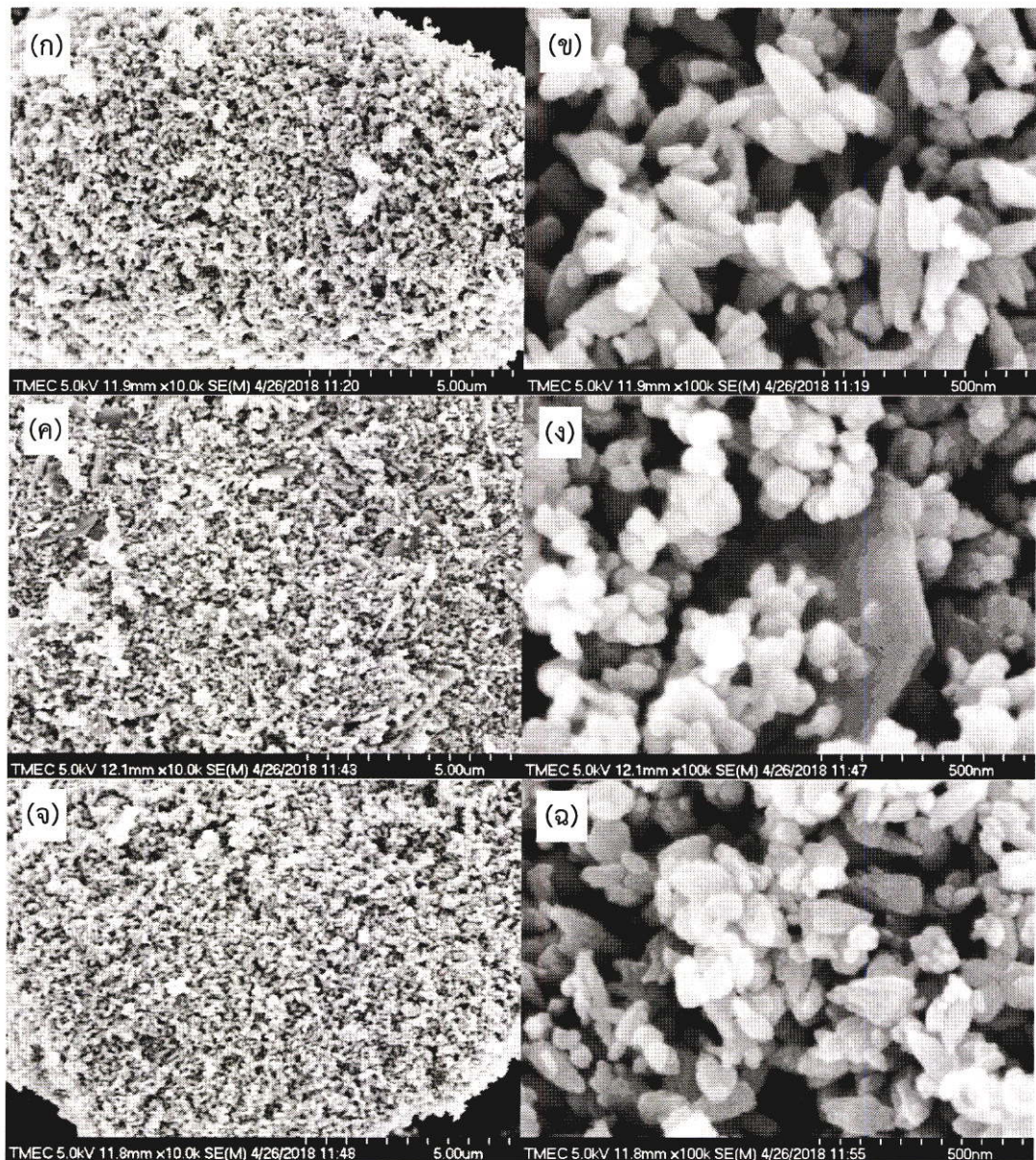


ส่วนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยการเจือฟลูออรีนจากกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการเจือฟลูออรีนที่ 1 โมลเปอร์เซ็นต์ดังแสดงรูปที่ 4.14(ค) และ 4.14(ง) จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือ (รูปที่ 4.14(ก) และ 4.14(ข)) และยังประกอบด้วยลักษณะสัณฐานวิทยาแบบดิส (Nanodisks) เล็กน้อยปนกันไปกับอนุภาค ซึ่งการเกิดลักษณะสัณฐานวิทยาแบบดิสเนื่องจากที่บริเวณนั้นอาจมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่น้อยจึงส่งผลต่อการก่อตัวขึ้นและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานพื้นผิวที่ระนาบ (0001) ทำให้มีการก่อตัวเป็นแท่งที่น้อยลง [35,36] และที่เจือฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 4.14(จ) และ 4.14(ฉ) จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคที่เล็กกว่าซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือเช่นเดียวกับที่เจือด้วยฟลูออรีน 1 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่วนขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 เมื่อเจือด้วย



รูปที่ 4.13 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี
 (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า
 (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า
 (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า

ฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 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

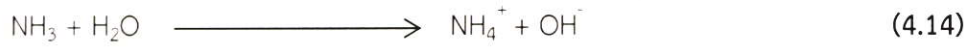
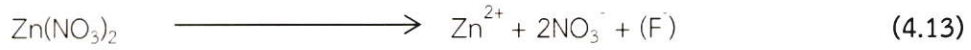


รูปที่ 4.14 อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (ก) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) 0 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (ค) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ง) 1 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า (จ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ฉ) 5 โมลเปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า

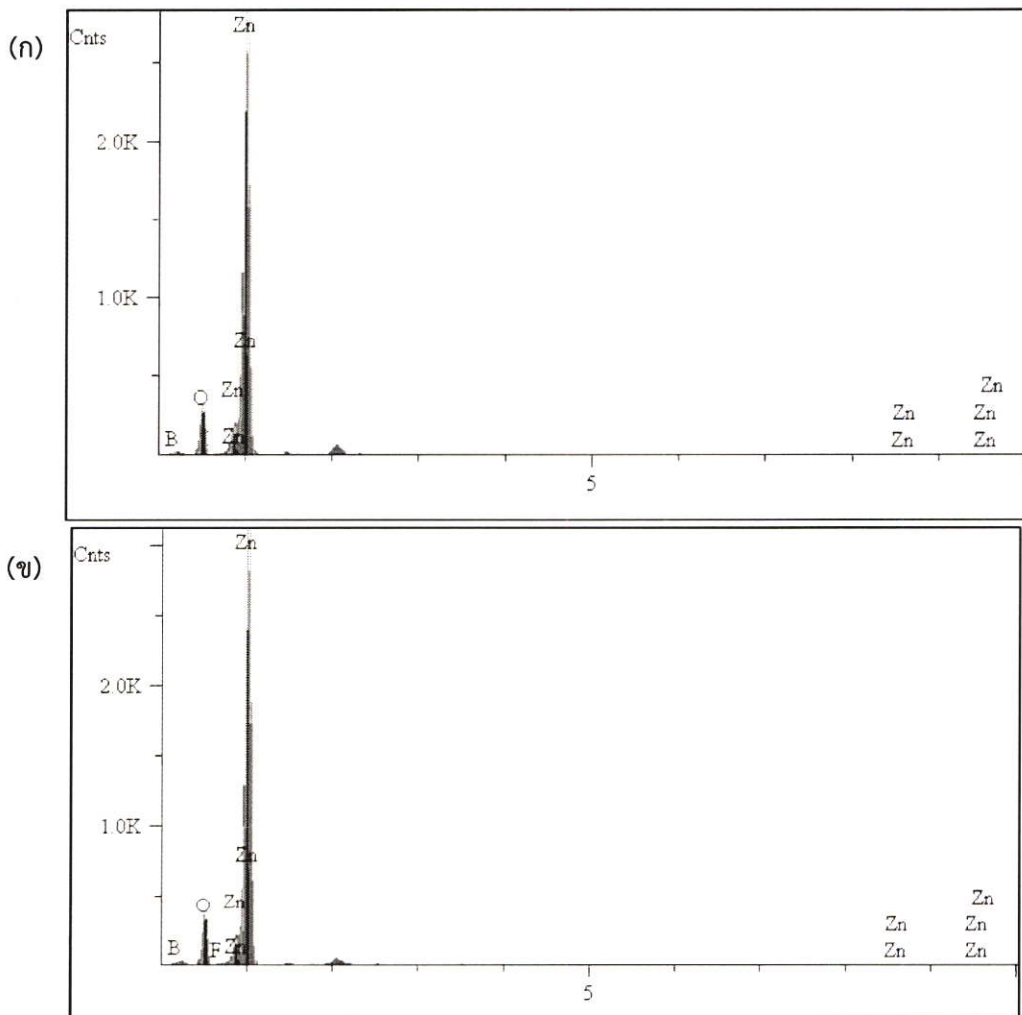
ควาเว้ซึ้นนั้ น สั่ผลต่อปลั้้งงานภายในระบบและอุณหภูมิที่สู้งั้ขึ้นจากการแตกออกของฟองอากาศเป็นการไล้ไฮดรอกไซด์ไอออนออกจากโมเลกุลซิงค์ไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นซิงค์ออกไซด์ตามสมการที่ 4.16 ปริมาณที่มากขึ้้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบทำให้ซิงค์ออกไซด์เกิดเป็นแท่งที่ยาวขึ้้นเมื่อซิงค์ไอออนมาจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกาะอยู่ที้ระนาบ (0001) แต่การให้คลื่นเหนือเสียงจะไปรบกวนการก่อตัวเป็นแท่ง

ซิงค์ออกไซด์จากการเกิดพลังงานให้ทุกทิศทางจึงทำให้มีลักษณะเป็นแท่งที่น้อยกว่าในกระบวนการตกตะกอนรวม [28]

สมการแสดงการเกิดกระบวนการโซโนเคมีที่เจือด้วยฟลูออรีน [34]



4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ในผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงปริมาณธาตุต่างๆ ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย (ก) โบรอนและ (ข) ฟลูออรีนที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

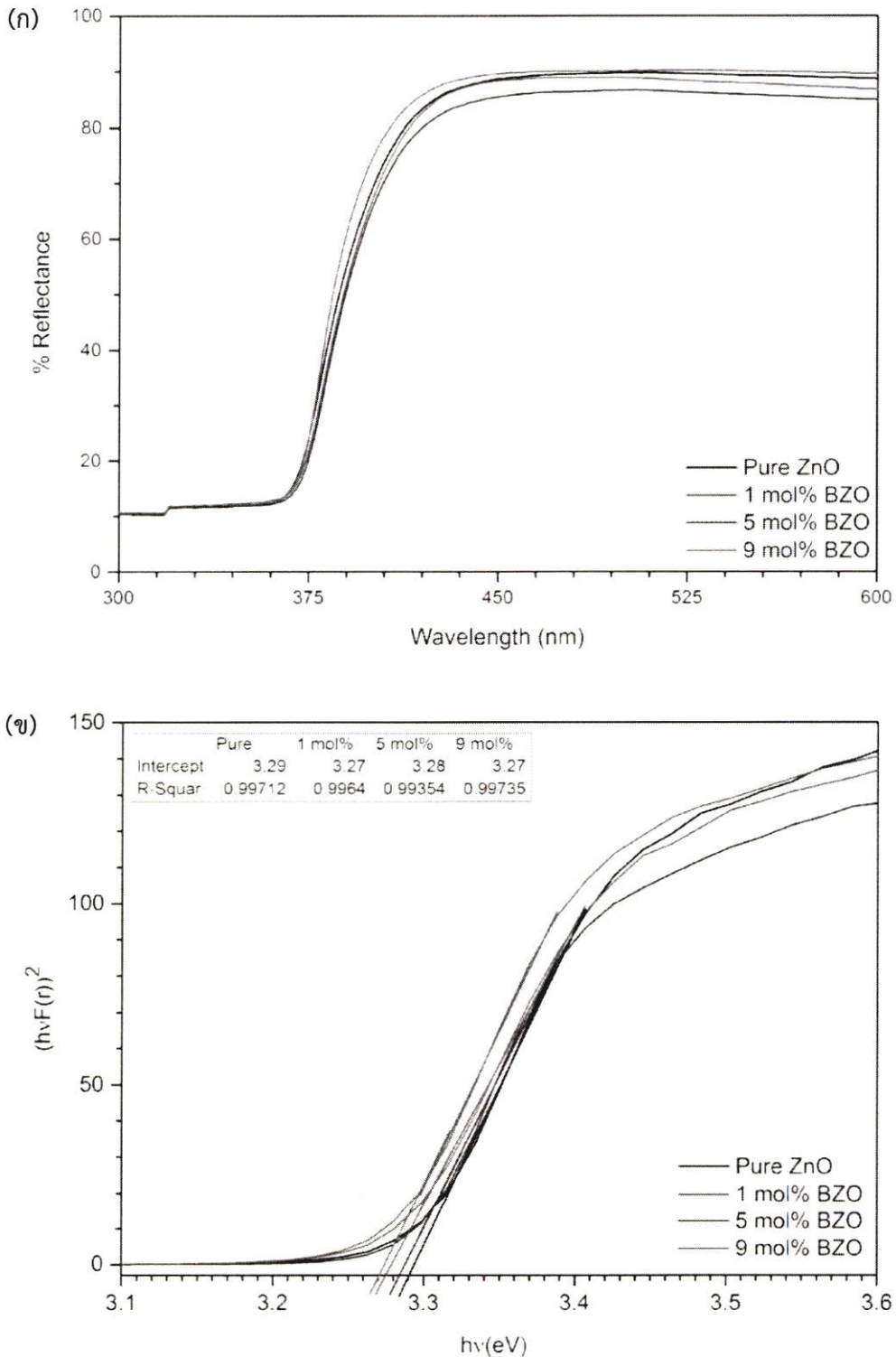
การตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องประกอบและปริมาณธาตุของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์โดยสังเคราะห์จากกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อทำการยิงรังสีเอกซ์จะทำให้ตรวจพบธาตุซิงค์จากพลังงานชั้น L_{α} ออกซิเจนจากชั้น K_{α} โบรอนจากชั้น K_{α} และฟลูออรีนจากชั้น K_{α} จากรูปที่ 4.15(ก) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจะพบพีคของซิงค์ร้อยละ 52.31 ออกซิเจนร้อยละ 17.28 และโบรอนร้อยละ 30.38 ส่วนรูปที่ 4.15(ข) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจะพบพีคซิงค์ร้อยละ 60.22 ออกซิเจนร้อยละ 28.68 และฟลูออรีนร้อยละ 11.08 ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการโซโนเคมีนั้นพบองค์ประกอบของธาตุโบรอนที่มากกว่าในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.3) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยโซโนเคมีใช้เวลาเพียง 10 นาทีในการให้คลื่นเหนือเสียงแก่ระบบนั้น ทำให้ไอออนของสารตั้งต้นยังคงเหลืออยู่ในระบบและไอออนของสารเจือเหล่านั้นจะจับกลุ่มกันและเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ หรือสารตั้งต้นของโบรอนคือ กรดไตรไอโซโพรพิลโบเรท ยังไม่สามารถเข้าไปก่อตัวอยู่ในระบบของซิงค์ออกไซด์ได้ จึงทำให้เมื่อทำการตรวจวัดองค์ประกอบของธาตุด้วยรังสีเอกซ์นั้นพบธาตุโบรอนที่เป็นสารเจือได้มากกว่าในกระบวนการตกตะกอนร่วมที่ไอออนของโบรอนนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ [37,38] แต่ในกรณีของการเจือฟลูออรีนลงในซิงค์ออกไซด์ การตรวจพบธาตุฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีจะไม่แตกต่างกันมาก แต่กระบวนการสังเคราะห์ด้วยโซโนเคมีจะพบปริมาณธาตุฟลูออรีนมากกว่า ซึ่งเหตุผลประกอบจะเหมือนกับในกรณีการเจือโบรอนลงในซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นในกรณีการเติมสารเจือลงในสารหลักด้วยกระบวนการโซโนเคมีอาจจะต้องเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ให้มากขึ้น เพื่อให้สารตั้งต้นได้ทำปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่และทั่วถึงภายในระบบ

4.2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

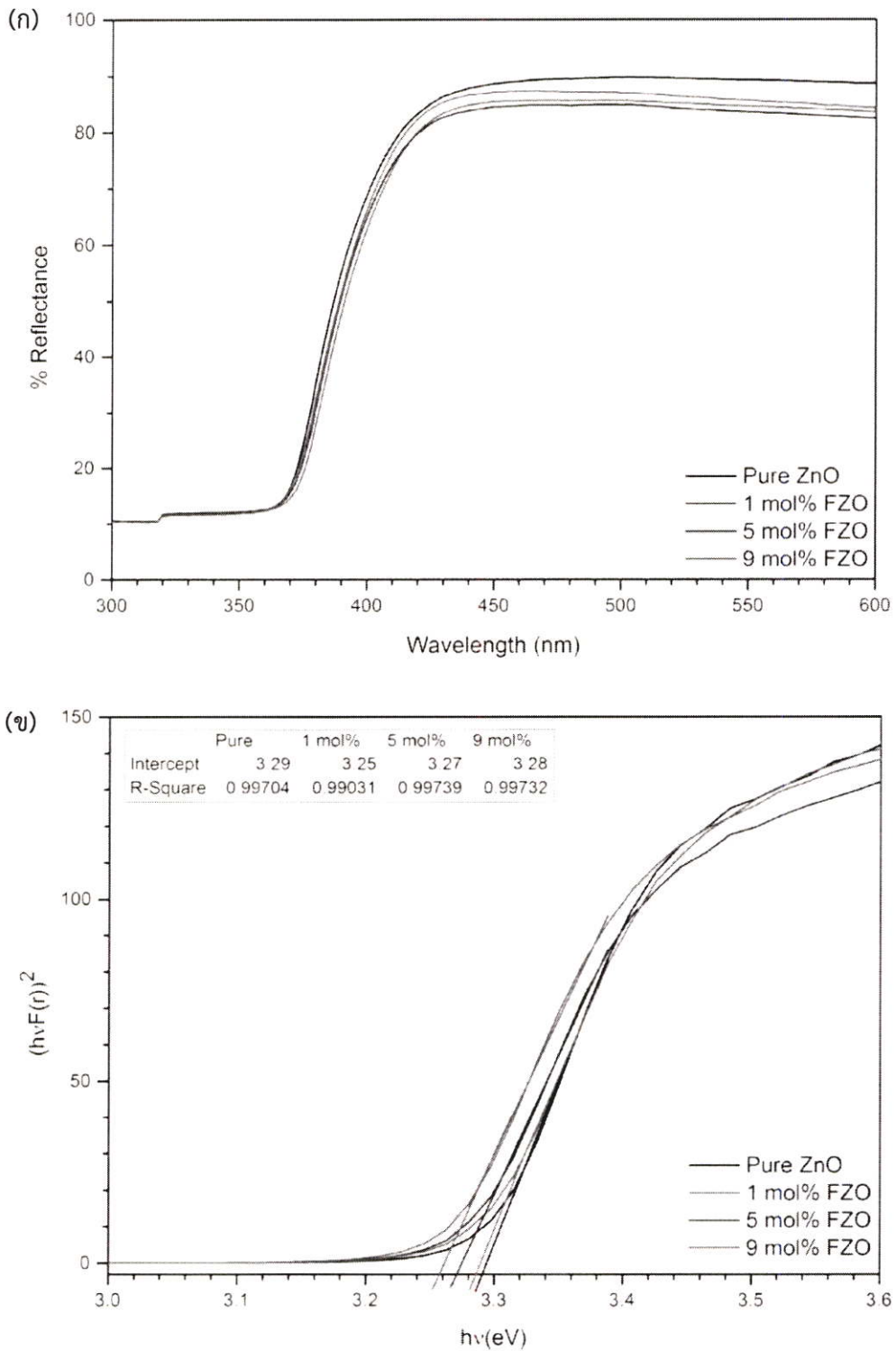
การตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการวัดการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วน 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ขอบการดูดกลืนพลังงานแสงของกราฟที่ได้จะมีแนวโน้มที่เหมือนกัน ไม่พบความแตกต่างกันของขอบการดูดกลืนพลังงานแสงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเจือโบรอนดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก) ส่วนในรูปที่ 4.16(ข) เป็นการคำนวณค่าแถบพลังงานช่องว่างของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการโซโนเคมี ซึ่งคำนวณค่าแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 3.29, 3.27, 3.28 และ 3.27 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเห็นได้ว่า ค่าแถบพลังงานช่องว่างไม่ต่างกันมาก เนื่องจากมีลักษณะสัญญาณที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นอนุภาคและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบอื่นๆ และคาดว่าไอออนของโบรอนอาจจะไม่ได้เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์เนื่องจากมีขนาดผลึกตามตารางที่ 4.4 (หัวข้อ 4.2.1) ที่มีขนาดไม่แตกต่างเมื่อไม่ได้เจือด้วยโบรอน ซึ่งสามารถที่จะยืนยันได้จากผลการตรวจวัดองค์ประกอบของธาตุที่พบปริมาณของโบรอนในกระบวนการโซโนเคมีที่มากกว่าในกระบวนการตกตะกอนร่วม

ส่วนการตรวจวัดสมบัติทางแสงด้วยโหมดการวัดการสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วน 1, 5 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ขอบการดูดกลืนพลังงานแสงของกราฟที่ได้จะมีแนวโน้มที่เหมือนกัน ไม่พบความแตกต่างกันของขอบการดูดกลืนพลังงานแสงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเจือฟลูออรีนดังแสดงในรูปที่ 4.17(ก) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับในกรณีการเจือด้วยโบรอนในซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี ส่วนคำนวณค่าแถบพลังงานช่องว่างของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการโซโนเคมีตามรูปที่ 4.17(ข) พบว่า จะให้ค่า

แถบพลังงานช่องว่างของที่ไม่แตกต่างกันโดยมีค่าเท่ากับ 3.29, 3.25, 3.27 และ 3.28 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าแถบพลังงานช่องว่างมีค่าไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นอนุภาคและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอื่นๆและอาจไม่เกิดการเข้าไปในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

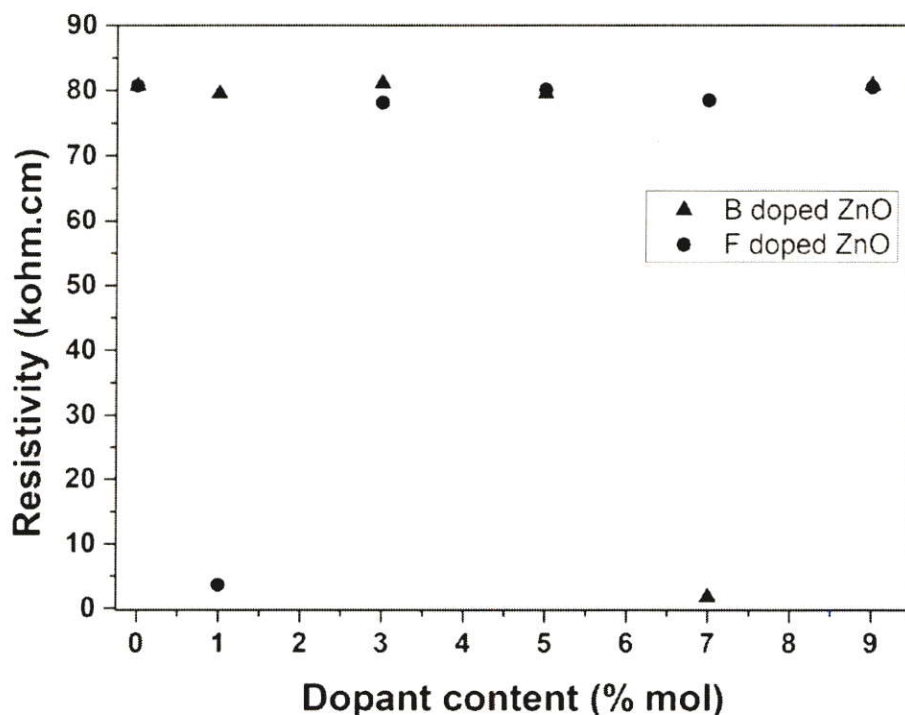


รูปที่ 4.16 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี



รูปที่ 4.17 (ก) กราฟการสะท้อนสมบัติทางแสง และ (ข) การคำนวณหาแถบพลังงานช่องว่างของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนจากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี

4.2.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีน จากกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมี



รูปที่ 4.18 สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนและฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

การตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุโบรอนและฟลูออรีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์โซโนเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.18 สัญลักษณ์สามเหลี่ยมเป็นกราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็น 80.71, 79.49, 81.10, 79.46, 1.84 และ 80.77 กิโลโอห์มเซนติเมตร เมื่อเจือโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้นเท่ากับ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มค่าความต้านทานไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการที่โบรอนไอออนอาจจะไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้เนื่องจากเวลาในการโซโนเคมีน้อยเกินไป จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ [39] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในหัวข้อที่ 4.2.3 และสมบัติทางแสงในหัวข้อที่ 4.2.4 ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าแถบพลังงานต้องห้ามแต่ในเงื่อนไขการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอน 7 โมลเปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นพบว่า มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าการเจือโบรอนในอัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆ อาจจะเป็นผลมาจากการที่มีลักษณะสัญญาณวิทยาที่ไม่เหมือนกับเงื่อนไขอื่น ๆ โดยคาดว่าอาจเกิดเป็นลักษณะที่เป็นแผ่นหรือแท่งมากกว่าแบบอนุภาค [32] จึงส่งผลให้มีค่าความต้านทานที่ลดต่ำลง

ส่วนผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกระบวนการโซโนเคมีดังรูปที่ 4.18 ด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมพบว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือและเจือด้วยฟลูออรีนนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ต่างกันเท่ากับ 80.71, 3.64, 78.05, 80.14, 78.53

และ 80.51 กิโลโหม์เซนติเมตร ตามการเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วน 1, 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ เนื่องจากเวลาและพลังงานในการสังเคราะห์ในระบบยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ฟลูออรีนไอออนเข้าไปอยู่ในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ได้ดึ้นัก แต่จะพบว่าที่เจือฟลูออรีน 1 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ลดลงเป็น 3.64 กิโลโหม์เซนติเมตร จากการที่มีลักษณะสัณฐานวิทยานั้นมีรูปแบบที่เป็นแผ่นแบบดิสอยู่ด้วยทำให้มีการนำฟ้าได้ดีกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคและแท่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่อิเล็กตรอนอิสระสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปมาบนแบบแผ่นได้ง่ายกว่า [40]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการเจือของธาตุในหมู่ 3A คือ โบรอน และ หมู่ 7A คือ ฟลูออรีน ในอัตราส่วนความเข้มข้นตั้งแต่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองนี้ได้กำหนดให้สารละลายมีค่าเป็นเบสที่ pH 9 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ได้ลักษณะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เป็นอนุภาคมาก พร้อมกับเลือกเปรียบเทียบกระบวนการสังเคราะห์พื้นฐานโซล-เจลร่วมกับกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี

ผลจากการศึกษาศักยภาพการเจือโบรอนลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมีที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นจะมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ และมีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกของโบรอนไอออนในโครงสร้างหลัก ลักษณะสัญญาณวิทยาที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมนั้นเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปทำให้มีลักษณะที่เป็นแท่ง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นที่ 5 โมลเปอร์เซ็นต์จะได้ลักษณะเป็นกลุ่มคล้ายดอกไม้และทำการวัดองค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยโบรอนที่ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและโบรอน ส่วนสมบัติทางแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เมื่อเจือโบรอนทำให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานมีค่าที่ต่ำลงโดยที่อัตราส่วนความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.13 อิเล็กตรอนโวลต์และสมบัติทางไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกันของความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไปไม่แสดงว่าการเจือโบรอนเข้านั้นไม่ส่งผลสมบัติทางไฟฟ้าแต่มีผลต่อสมบัติทางแสงเพียงเท่านั้นและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ แต่ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ นั้นมีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆซึ่งอาจจะเกิดผลมาจากการแทรกของโบรอนไอออนในโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับในกระบวนการตกตะกอนร่วมหรือจากการรวมตัวกันของไอออนในขั้นตอนการสังเคราะห์ ลักษณะสัญญาณวิทยามีลักษณะที่เป็นอนุภาคที่รวมตัวกันและมีบางส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่ง พบองค์ประกอบของธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและโบรอน ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่วนสมบัติทางแสงมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่มีค่าไม่ต่างกันเมื่อมีการเจือและสมบัติทางไฟฟ้าจะมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ จากการที่ขนาดของผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆแสดงว่าลักษณะสัญญาณวิทยาอาจมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลจากการศึกษาศักยภาพการเจือฟลูออรีนลงในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมี โดยมีอัตราส่วนความเข้มข้นตั้งแต่ 0-9 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่การสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมให้โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆเช่นเดียวกับที่เจือด้วยโบรอน ขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเจือฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการแทรกของฟลูออรีนไอออนในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์จากการที่มีลักษณะสัญญาณวิทยาเปลี่ยนจากอนุภาคกลายเป็นแท่งส่งผลต่อสมบัติทาง

แสงทำให้มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำลงโดยที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1 โมลเปอร์เซ็นต์ จะมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์และส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าทำให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำลงเมื่อเจือด้วยฟลูออรีนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ประมาณ 2.22 กิโลโอห์มเซนติเมตร ส่วนการวัดองค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์

ออกซิเจนและฟลูออรีน และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีให้โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆ มีขนาดผลึกที่ไม่ต่างกันจากการที่ไม่เกิดการแทนที่กันระหว่างฟลูออรีนและออกซิเจนไอออนหรือการแทรกในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลทางลักษณะสัญญาณวิทยาว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อทำการเจือฟลูออรีน องค์ประกอบของธาตุที่เจือด้วยฟลูออรีน 5 โมลเปอร์เซ็นต์ จะพบธาตุ ซิงค์ ออกซิเจนและฟลูออรีน ในส่วนของสมบัติทางแสงจะมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ไม่แตกต่างกันและสมบัติทางไฟฟ้าที่มีแนวโน้มของความต้านทานที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเจือฟลูออรีนเข้าไป ยกเว้นที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1 โมลเปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดประมาณ 3.64 กิโลโอห์มเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาว่ามีรูปร่างบางส่วนเป็นรูปแบบดิสทำให้มีความต้านทานที่ต่ำลงได้จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระได้ง่าย

จากการทดลองสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมและกระบวนการโซโนเคมีนั้นพบว่า การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถที่จะทำให้สารที่เจือนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ได้ส่งผลทำให้ลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป แต่การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากซิงค์ไฮดรอกไซด์เป็นซิงค์ออกไซด์ ส่วนในกระบวนการโซโนเคมีนั้นใช้เวลาเพียง 10 นาที อาจจะเพียงพอที่จะทำให้สารที่เจือนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างหลักของซิงค์ออกไซด์ได้หรือมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัญญาณวิทยาจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ แต่เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย ให้ขนาดของอนุภาคที่เล็กและไม่ต้องการเผาที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการที่คลื่นเหนือเสียงเข้าไปจะทำให้ฟองอากาศมีการเกิด โต และแตกออกภายในระบบได้เป็นพลังงานและอุณหภูมิภายในระบบที่สูงเพียงพอกับการทำให้มีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นซิงค์ออกไซด์ได้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

5.2.1 เมื่อใช้งานโพรบโซโนควอร์ที่จะทิ้งระยะเวลาเพื่อให้ตัวโพรบนั่นได้เย็นตัวก่อนที่จะใช้งานต่อไป ป้องกันการหยุดทำงาน (Over load) ระหว่างทำการใช้งาน

5.2.2 สารที่จะทำการอัดเม็ดเกิดความชื้นต้องทำการอบสารก่อนนำไปอัดเม็ดเพื่อไล่ความชื้นหรือใส่ขวดที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการดูดความชื้น

5.2.3 ในการล้างค่า pH ของตะกอนเพื่อให้เป็นกลางนั้น ควรที่จะล้างตะกอนให้มีค่า pH เท่ากับน้ำปัสสาวะที่ใส่ เพื่อให้แน่ใจว่าตะกอนที่ได้นั้นจะไม่เหลือความเป็นเบสตกค้างอยู่

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 นำอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนที่อัตราส่วนความเข้มข้น 7 โมลเปอร์เซ็นต์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีไปตรวจสอบลักษณะทางสัญญาณวิทยาเพื่อยืนยันว่ามีลักษณะทางสัญญาณวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปจึงส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า

5.3.2 ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีนั้นจะต้องทำการเพิ่มเวลาในการให้พลังงานคลื่นเหนือเสียงที่มากกว่า 10 นาที เพื่อให้เกิดพลังงานภายในระบบที่มากพอเพื่อให้เกิดการแทนที่กันของไอออนและต้องลดกำลังของพลังงานคลื่นเหนือเสียงลงเนื่องจากข้อจำกัดในการใช้โพรบโซโนเคมีโดยทำการทดลองซ้ำกับการเจือด้วยโบรอนและฟลูออรีน

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

ในส่วนของสรุปผลผลิตงานวิจัยจะเป็นการรายงานเกี่ยวกับเอกสารผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัยและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่หรือข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องภายในโครงการ “การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน” ซึ่งเป็นโครงการที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาระหว่าง 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561 รวมระยะเวลา 1 ปีตลอดโครงการวิจัย

6.1 การประชุม/สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference)

1) Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart, “Synthesis and characterization of F doped ZnO nanopowders by chemical routes of coprecipitation and sonochemical process”, *International Conference on Science and Technology of Emerging Materials 2018 (STEMa2018)*, July 18-20, 2018, Pattaya, Thailand.

6.2 วารสารระดับนานาชาติ (International Journal)

1) Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart, “Synthesis and characterization of F doped ZnO nanopowders by chemical routes of coprecipitation and sonochemical process”, *AIP Conference Proceedings 2010, 020004 (2018)*; doi: 10.1063/1.5053180

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Ahmed, C. K. Blakely, S. R. Bruno, and V. V. Poltavets, **Synthesis of $M\text{SnO}_3$ ($M = \text{Ba}, \text{Sr}$) nanoparticles by reverse micelle method and particle size distribution analysis by whole powder pattern modeling**, *Materials Research Bulletin* 47, 2282–2287, (2012).
- [2] H.S. Woo, I.S. Hwang, C.W. Na, S.J. Kim, J.K. Choi, J.S. Lee, J. Choi, G.T. Kim, and J.H. Lee, **Simple fabrication of transparent flexible devices using SnO_2 nanowires and their optoelectronic properties**, *Materials Letters* 68, 60–63, (2012).
- [3] X. Wang, H. Fan, and P. Ren, **UV light-assisted synthesis of coral SnO_2 : Characterization and its enhanced photocatalytic properties**, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 402, 53–59, (2012).
- [4] J.W. Leem, and J.S. Yu, **Physical properties of electrically conductive Sb-doped SnO_2 transparent electrodes by thermal annealing dependent structural changes for photovoltaic applications**, *Materials Science and Engineering B* 176, 1207–1212, (2011).
- [5] Ran Liu, Jonathon Duay and Sangbok Lee, **Heterogeneous nanostructured electrode materials for electrochemical energy storage**, *Chemical Communication* 47, 1384-1404. (2011).
- [6] กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel Technology) (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3251>
- [7] Prof. Sunil Khijwania. 2014. [May 2018]. Precipitation and Co-precipitation. [online]. Available from: <http://nptel.ac.in/courses/103103026/7#>
- [8] Gregory Chatel, Liudmila Novikova and Sabine Petit, **How efficiently combine sonochemistry and clay science**, *Applied Clay Science* 119, 193-201, (2016).
- [9] Nimesh Pokhrel, Phani Kiran Vabbina and Nezhil Pala, **Review : Sonochemistry: Science and Engineering**, *Ultrasonics Sonochemistry* 29, 104-128, (2014).
- [10] Intrustrial Sonomechanics. [September 2017]. Ultrasonic horn designs and properties [online]. Available from: http://sonomechanics.com/technology/ultrasonic_horn_designs_and_properties/.
- [11] K. S. Suslick, M. M. Fang, T. Hyeon and M. M. Mdleleni, **Applications of sonochemistry to materials synthesis**, *Sonochemistry and Sonoluminescence*, 291-320, (1999).
- [12] Available URL http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/zinc_oxide#section=Top.
- [13] Available URL <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5818>.
- [14] Available URL <http://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4391796>.
- [15] Available URL <http://phelafel.technion.ac.il/~samirb/ZnO.html>.
- [16] Available URL http://nptel.ac.in/courses/113104005/lecture3/3_8.htm.
- [17] Mathematics. 2013 [September 2017]. Boron [online]. Available from: <http://periodictable.com/Elements/005/index.html>.

- [18] Mathematics. 2013 [September 2017]. Flourine [online]. Available from: <http://periodictable.com/Elements/009/index.html>.
- [19] C.M. Lin, Y.C. Chang, J. Yao, C. Wang, C. Luo and S. Yin, **Multi-step hydrothermally synthesized TiO₂ nanoforests and its application to dye-sensitized solar cells**, *Materials Chemistry and Physics* 135, 723-727, (2013).
- [20] W.Q. Wu, H.S. Rao, H.L. Feng, X.D. Guo, C.Y. Su and D.B. Kuang, **Morphology-controlled cactus-like branched anatase TiO₂ arrays with high light-harvesting efficiency for dye-sensitized solar cells**, *Journal of Power Sources* 260, 6-11, (2014).
- [21] A. Tubtimtae, and M.W. Lee, **ZnO nanorods on undoped and indium-doped ZnO thin films as a TCO layer on nonconductive glass for dye-sensitized solar cells**, *Superlattices and Microstructures* 52, 987-996, (2012).
- [22] M.W. Wu, P.C. Tsai, and Y.C. Huang, **Enhancement of the densification and mechanical properties of aluminum-doped zinc oxide ceramics by hot isostatic pressing**, *Journal of Alloys and Compounds* 650, 514-519, (2015).
- [23] C. Pholnak, C. Sirisathitkul, S. Danworaphong, and D.J. Harding, **Sonochemical synthesis of zinc oxide nanoparticles using an ultrasonic homogenizer**, *Ferroelectrics* 455, 15-20, (2013).
- [24] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ, **การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-ray Diffraction**, *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* 62(194), 34-35, (2557).
- [25] 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).
- [26] Qi Yu, Jia Li, Hongdong Li, Qiliang Wang, Shaoheng Cheng and Luan 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).
- [27] Saliha Ilican, 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).
- [28] 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).
- [29] Saliha Ilican, 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).
- [30] 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).

- [31] 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).
- [32] 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).
- [33] Saliha Ilican, 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).
- [34] 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).
- [35] C.X. Xu, X.W. Sun, Z.L. Dong, and M. B. Yu, **Zinc oxide nanodisk**, *Applied Physics Letters* 85 (17), 3878-3880, (2004).
- [36] 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).
- [37] 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).
- [38] 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).
- [39] J. Steinhauser, S. Fay, 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 Letters* 90, 142107, (2007).
- [40] 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).

ภาคผนวก ก

ในส่วนของภาคผนวก ก จะเป็นการรายงานเกี่ยวกับแผนการดำเนินงานวิจัย ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้จากโครงการนี้ รวมไปถึงเงินงบประมาณของโครงการ “การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน” ซึ่งเป็นโครงการที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาระหว่าง 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561 รวมระยะเวลา 1 ปีตลอดโครงการวิจัย

ก.1 เวลาที่ใช้ในการวิจัย

ตารางแผนงานวิจัย

ปี	กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
2560	ศึกษาการเตรียมสารตัวอย่าง ด้วยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง/ จัดซื้อวัสดุ สารเคมี	X	X										
2560 - 2561	เตรียมวัสดุนาโนมิติต่ำของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-(Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง พร้อมกับศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของวัสดุ เช่น เวลาการสังเคราะห์ อุณหภูมิ ชนิดสารที่ช่วยในการก่อตัว		X	X	X	X	X	X					
2561	ศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง สัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์เชิงลึกของสารที่เตรียมได้				X	X	X	X	X	X			
2561	ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุที่เตรียมได้ทางด้านพลังงาน เช่น วัสดุกักเก็บพลังงาน วัสดุสำหรับชั้นป้องกันแสงสะท้อนในเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น					X	X	X	X	X	X		
2561	เขียนรายงานวิจัย บทความวิชาการ									X	X	X	X

ก.2 งบประมาณเพื่อการวิจัย

ระยะเวลาการดำเนินโครงการ 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2560 ถึง 30 ก.ย. 2561

ปี	ประเภทงบประมาณ	รายละเอียด	จำนวน (บาท)
2561	งบบุคลากร	หมวดค่าจ้างชั่วคราวลูกจ้างชั่วคราว 1 คนวุฒิ ป.ตรี 1 คน อัตราเงินเดือน 10,000 บาท (11 เดือน)	110,000
2561	งบดำเนินการ : ค่าใช้สอย	- ค่าจ้างวิเคราะห์หรือทดสอบ ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD, SEM / EDS, BET, TEM, XPS, XAS และ อื่น ๆ - ค่าเดินทางในการนำตัวอย่างไป ตรวจวิเคราะห์	85,000
2561	งบดำเนินการ : ค่าวัสดุ	- วัสดุสำนักงาน - สารเคมี เช่น $ZnCl_2$, NH_4F , BCl_3 , $NaOH$ เอทานอลและอื่น ๆ - อุปกรณ์ทางเคมีอุปกรณ์ป้องกัน และวัสดุสิ้นเปลือง วัสดุแก้ว สำหรับทดลอง เช่น บีกเกอร์ กระจก มือยาง หน้ากากกันไอสารระเหย กระดาษชำระ กระดาษกรอง กระจกนำไฟฟ้า - อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ	120,000
	รวม		315,000
	รวมตลอดโครงการ		315,000

*หมายเหตุ งบประมาณในแต่ละหมวดสามารถถัวเฉลี่ยได้

ภาคผนวก ข

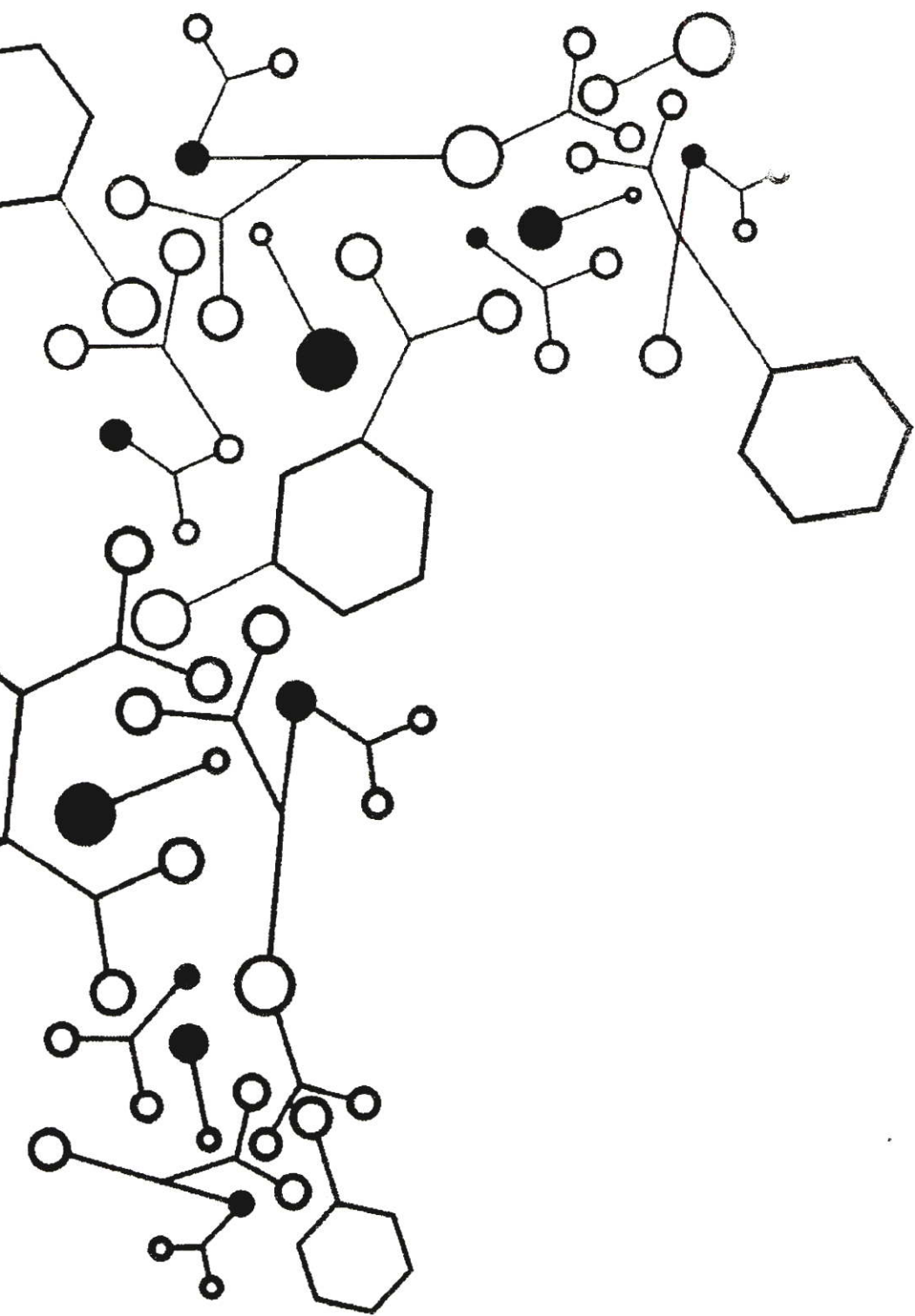
ในส่วนของภาคผนวก ข จะเป็นการรายงานเกี่ยวกับเอกสารผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัยและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่หรือข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องภายในโครงการ “การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน” ซึ่งเป็นโครงการที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาระหว่าง 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561 รวมระยะเวลา 1 ปีตลอดโครงการวิจัย

ข.1 การประชุม/สัมมนา ระดับนานาชาติ (International Conference)

1) Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart, “Synthesis and characterization of F doped ZnO nanopowders by chemical routes of coprecipitation and sonochemical process”, *International Conference on Science and Technology of Emerging Materials 2018 (STEMa2018)*, July 18-20, 2018, Pattaya, Thailand.

ข.2 วารสารระดับนานาชาติ (International Journal)

1) Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart, “Synthesis and characterization of F doped ZnO nanopowders by chemical routes of coprecipitation and sonochemical process”, *AIP Conference Proceedings 2010, 020004 (2018)*; doi: 10.1063/1.5053180



Book of Abstracts



STEMa 2018

International Conference on Science
and Technology of Emerging Materials

July 18-20, 2018 Pattaya, Thailand

<http://www.nano.kmitl.ac.th/stema2018>

Synthesis and Characterization of F doped ZnO Nanopowder by Chemical Routes of Co-precipitation and Sonochemical Process

Chatpong Bangbai

Department of Science and Mathematics

Abstract.

Zinc oxide (ZnO) is an n-type semiconductor material at room temperature with good absorber in UV region and used in many applications, such as photocatalyst and sensor. In this work, ZnO nanopowder was synthesized by chemical routes; co-precipitation and sonochemical method. To improve ZnO nanopowder in optical and electrical properties, fluorine (F) was doped with varied concentration from 0-11 mol% atoms. Zinc nitrate and ammonium fluoride were used as precursor material in both processes. Ammonia solution was dropped in the solution relating to white colloidal solution. Crystalline structure in hexagonal structure of F doped ZnO was identified by X-ray diffraction (XRD). Morphology and chemical element in F doped ZnO were monitored by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). For optical and electrical properties, F doped ZnO particles were analyzed by UV-Visible spectroscopy and four point probe method, respectively. The preliminary result revealed that XRD pattern of ZnO structure after F doping with low crystallinity was similar to pure ZnO and obtained by both processes after annealing treatment beyond specific temperature. The influence of fluorine on ZnO structure by both chemical routes will be compared and further discussed with its improved properties.

Keywords: Co-precipitation, Fluorine doped zinc oxide, Sonochemical process

Synthesis and Characterization of F doped ZnO Nanopowder by Chemical Routes of Co-precipitation and Sonochemical Process

Chatpong Bangbai¹, Titarat Thongpradith², Wisanu Pecharapa² and Wanichaya Mekprasart^{2,*}

¹ *Department of Science and Mathematics, Faculty of Agro-Industrial Technology, Kalasin University, Kalasin, 46000, Thailand*

² *College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand*

* *corresponding author, E-mail: wanichya.me@kmitl.ac.th*

Abstract

Zinc oxide (ZnO) is an n-type semiconductor material at room temperature which a good absorber in UV region and used in many applications, such as photocatalyst and gas sensor. In this work, ZnO nanopowder was synthesized by chemical routes; co-precipitation and sonochemical method. To improve ZnO nanopowder in optical and electrical properties, fluorine (F) was doped with varied concentration from 0-11 mol% atoms. Zinc nitrate and ammonium fluoride were used as precursor material in both processes. Ammonia solution was dropped in the solution relating to white colloidal solution. Crystalline structure in hexagonal structure of F doped ZnO was identified by X-ray diffraction (XRD). Morphology and chemical element in F doped ZnO were monitored by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). For optical and electrical properties, F doped ZnO particles were analyzed by UV-Visible spectroscopy and four point probe method, respectively. The preliminary result revealed that XRD pattern of ZnO structure after F doping with high crystallinity was similar to pure ZnO and obtained by both processes after annealing treatment beyond specific temperature. The influence of fluorine on ZnO structure by both chemical routes will be compared and further discussed with its improved properties.

Keywords: Co-precipitation, Fluorine doped zinc oxide, Sonochemical process.

Synthesis and characterization of F doped ZnO nanopowders by chemical routes of co-precipitation and sonochemical process

Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart

Citation: AIP Conference Proceedings **2010**, 020004 (2018); doi: 10.1063/1.5053180

View online: <https://doi.org/10.1063/1.5053180>

View Table of Contents: <http://aip.scitation.org/toc/apc/2010/1>

Published by the American Institute of Physics

Articles you may be interested in

Effects of spin-coating recipe on the transmittance of spin-coated TiO₂ films

AIP Conference Proceedings **2010**, 020002 (2018); 10.1063/1.5053178

Modifications of morphological and physiological characteristics of pigmented-rice seedlings by application of titanium dioxide nanoparticles

AIP Conference Proceedings **2010**, 020003 (2018); 10.1063/1.5053179

Preface: International Conference on Science and Technology of Emerging Materials 2018 (STEMa2018)

AIP Conference Proceedings **2010**, 010001 (2018); 10.1063/1.5053176

Extraction and characterization of nanocellulose from sugarcane bagasse by ball-milling-assisted acid hydrolysis

AIP Conference Proceedings **2010**, 020005 (2018); 10.1063/1.5053181

Transmittance of baked spin-coated poly(methyl methacrylate) films

AIP Conference Proceedings **2010**, 020001 (2018); 10.1063/1.5053177

Characterization of starch granules derived from *Tacca leontopetaloides* by green synthesis

AIP Conference Proceedings **2010**, 020006 (2018); 10.1063/1.5053182

AIP | Conference Proceedings

**Get 30% off all
print proceedings!**

Enter Promotion Code **30OFF** at checkout



Synthesis and Characterization of F doped ZnO Nanopowders by Chemical Routes of Co-precipitation and Sonochemical Process

Chatpong Bangbai^{1, b)}, Titarat Thongpradith^{2, c)}, Wisanu Pecharapa^{2, d)} and Wanichaya Mekprasart^{2, a)}

¹ *Department of Science and Mathematics, Faculty of Agro-Industrial Technology, Kalasin University, Kalasin, 46000, Thailand*

² *College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.*

^{a)}Corresponding author: wanichya.me@kmitl.ac.th

^{b)}offphy@gmail.com

^{c)}naiian.th6@gmail.com

^{d)}kpewisan@gmail.com

Abstract. Zinc oxide (ZnO) is an n-type semiconductor material at room temperature which a good absorber in UV region and used in many applications, such as photocatalyst and gas sensor. In this work, ZnO nanopowders were synthesized by chemical routes: co-precipitation and sonochemical method. To improve ZnO nanopowders in optical and electrical properties, fluorine (F) was doped with varied concentration from 0-9 mol%. Zinc nitrate and ammonium fluoride were used as precursor material in both processes. Ammonia solution was dropped in the solution relating to white colloidal solution. Crystalline structure in hexagonal structure of F doped ZnO was identified by X-ray diffraction (XRD). Morphology and chemical element in F doped ZnO were monitored by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). For optical and electrical properties, F doped ZnO particles were analyzed by UV-Visible spectroscopy and four point probe method, respectively. XRD pattern of ZnO structure after F doping with high crystallinity was similar to pure ZnO and obtained by both processes after annealing treatment beyond specific temperature. F doped ZnO morphologies were formed in rod-like structure by co-precipitation method. The increase of rod length was related by adding F doping concentration in ZnO matrix. Meanwhile, F doped ZnO products were formed in spherical structure with same crystallite size and particle size by sonochemical method due to the effect of ultrasound energy in the system. The improvement of optical and electrical properties in F doped ZnO was drastically obtained by co-precipitation method. The decreases of optical bandgap and electrical resistivity by F doped ZnO with co-precipitation method was occurred at 1 and 5 mol% F dopant. The influence of fluorine on ZnO structure was resulted in the defect level in band diagram and rod-like relating to narrow bandgap energy and good conductivity in ZnO.

INTRODUCTION

In recently, ZnO material is a semiconductor materials used in many applications i.e. piezoelectric, transparent conductive oxide, photodetector, gas sensor, solar cell, antibacterial, photocatalyst [1-4] due to its advantage properties such as direct wide band gap (3.37 eV), non-toxic material, high absorption in ultraviolet (UV) region and strong exciton binding energy [5]. Moreover, ZnO material can be proposed as low resistivity in metal oxide material, facile control in different structures and possible induction in ferromagnetic properties [6]. Various techniques of ZnO nanomaterial synthesis have been proposed in physical techniques and chemical process, for example, ball milling process, spray pyrolysis, sol-gel network and hydrothermal method [7-10]. To improve ZnO properties, doping with metallic and non-metallic elements is one of effective method for enhancing ZnO efficiency in photocatalysis, piezoelectric, electrical and optical properties. O.D. Jayakumar and research group reported that the improvement of ferromagnetism in ZnO material at room temperature was occurred by the substitutional incorporation of manganese (Mn) atoms at Zn-sites [11]. Meanwhile, the presence of copper (Cu) in ZnO structure obviously showed superior antibacterial

action and photocatalytic activity which studied by Tamanna Bhuyan and coworkers [12]. In case of nonmetallic doping, the increase of electrical conductivity and photocatalyst activity can be enhanced by the cooperation of carbon in ZnO host [13]. Fluorine (F) is one of a candidate in non-metallic elements dopant in ZnO structure because fluorine ionic radius (1.36 Å) may be possible to substitute in oxygen (ionic radius 1.40 Å) sites or oxygen vacancy in ZnO structure. This phenomenon is related to the improvement on ZnO conductivity, optical properties and morphological changing by the influence of F doping.

In this work, F doped ZnO was synthesized by chemical route as co-precipitation and sonochemical method. The reaction in co-precipitation method is originated from the ion exchange between zinc salt solution and alkaline solution. The product is obtained in hydroxide precipitate and changed to metal oxide phase by annealing process [14]. For sonochemical process [15], this process is a same reaction without annealing process because of sufficient thermal energy to complete product in form of metal oxide during synthesis. As mentioned above, the products of F doped ZnO from two methods are compared in morphologies, optical properties and electrical properties by the effect of F concentration in ZnO matrix.

EXPERIMENT

Fluorine (F) doped ZnO nanopowders were prepared by co-precipitation and sonochemical (750 Watt 20 kHz) method. For co-precipitation method, 0.2 M of zinc nitrate hexahydrate ($Zn(NO_3)_2$) was dissolved in 200 ml ethanol solution. Ammonium fluoride (NH_4F) as dopant precursor with 0, 1, 3 and 5 mol% was dropped and stirred in zinc precursor solution for 10 min. After that, ammonium hydroxide solution (NH_4OH) was dropped into the solution until pH9 to obtain white colloids in solution. The colloids were washed with DI water until pH7 and dried at 100 °C under hot air oven for 24 h. Finally, F doped ZnO nanopowders by co-precipitation method were obtained after calcination at 500 °C for 2 h. In case of sonochemical process, the precursor solution was prepared with same conditions as co-precipitation method. NH_4F at 0, 1, 3 and 5 mol% was mixed in $Zn(NO_3)_2$ in 200 ml ethanol at 0.2 M and continuously stirred for 10 min. After that the solution was loaded in a chamber with ultrasound probe. During mixing solution, NH_4OH solution was directly dropped under sonication by high intensity ultrasound probe for 10 min. After sonochemical process, as-prepared precipitate was several washed with deionized water and dried in oven for 24 h.

Characterization techniques were proposed to compare material properties with different doping content in ZnO matrix by co-precipitation and sonochemical process. The crystalline structure of F doped ZnO powder was analyzed by X-ray diffraction (XRD; Rigaku Smartlab) with Cu K_{α} ($\lambda = 0.15$ nm). Morphology and element chemical composition of F doped ZnO was investigated by field emission scanning electron spectroscopy (FESEM; Hitachi s4700) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX; IXRF systems 550i). Optical properties of F doped ZnO were measured by UV-Visible diffuse reflectance spectroscopy (PerkinElmer, lambda 950 machine) in the wavelength region of 200-800 nm. Finally, electrical properties were studied by four point probe technique to verify F doped ZnO conductivity at room temperature.

RESULTS AND DISCUSSION

XRD patterns of ZnO and F doped ZnO nanopowders are shown in Figure 1. ZnO products synthesized by co-precipitation and sonochemical method as in Figure 1(a) and 1(b) are in hexagonal wurtzite structure compared with JCPDS No. 157724. The prominence of ZnO peaks is identified at $2\theta = 31.7^\circ, 34.5^\circ, 36.6^\circ, 47.5^\circ, 56.5^\circ, 62.7^\circ, 67.8^\circ,$ and 69.0° relating to 110, 002, 101, 102, 110, 103, 112 and 202 planes, respectively. XRD patterns of F doped ZnO nanopowders were identical to pure ZnO pattern. No significant shift and impurity phase occurred in XRD patterns from both processes. The crystallite sizes of ZnO and F doped ZnO by prominent three peaks at $2\theta = 31.7^\circ, 34.5^\circ$ and 36.6° were calculated by Scherrer's equation: $D = k\lambda/\beta\cos\theta$ where D is the crystallite size, k is a constant at 0.9, λ is the wavelength of radiation, β is the peak full width at half maximum (FWHM) and θ is the diffracting angle [16] as shown Table 1. ZnO crystallite size synthesized by co-precipitation method was slightly increased by increasing dopant concentration due to the interstitial of F ion between zinc and oxygen sites (fluorine radius ions 1.34 Å, zinc radius ions 0.74 Å and oxygen radius ions 1.40 Å) leading to the defect of dislocation in ZnO structure

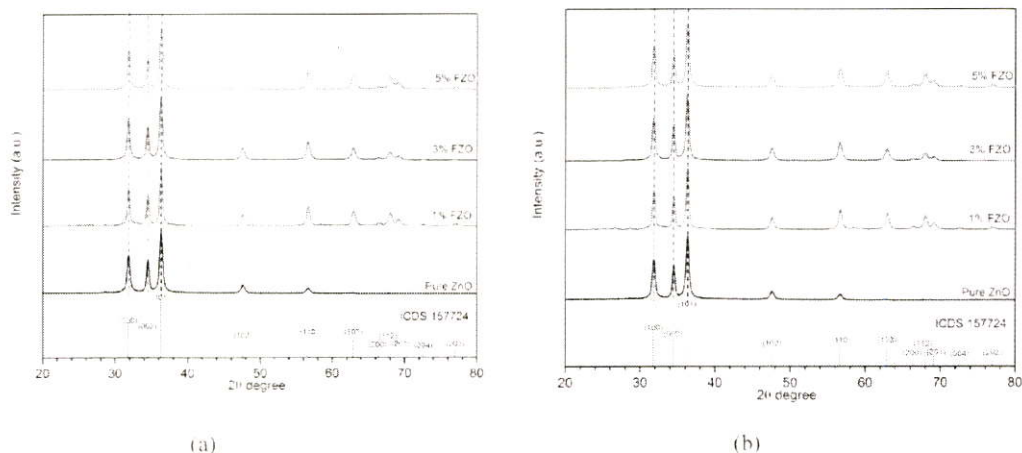


FIGURE 1. XRD patterns of ZnO with various fluorine doping concentrations by (a) co-precipitation method and (b) sonochemical method

TABLE 1. Crystallite size of F doped ZnO nanopowders by co-precipitation and sonochemical method at different F loading.

F content in ZnO (%)	Crystallite size (nm)	
	Co-precipitation	Sonochemical
0	16	17
1	22	18
3	22	16
5	27	17

[17]. Meanwhile, the crystallite size of F doped ZnO via sonochemical method was similar in each condition. This phenomenon is originated from ultrasound wave to control its particle sizes and spherical shape.

FIGURE 2 represents FE-SEM images of ZnO morphologies synthesized by co-precipitation method (the insets: 100k magnification). ZnO nanoparticle in FIGURE 2(a) formed a sphere-like structure with average size at 143.3 nm. Increasing concentration dopant as 1 and 5mol%, they formed rod-like structure and rod length increased from 225.8 to 760.8 nanometers, respectively in FIGURE 2(b)-(c). Owing to ammonium fluoride dissolved in aqueous solution, it presents more hydroxide ions in plane (0001) to forming rod length increased with zinc ions [18]. ZnO morphologies doping concentration 0, 1 and 5 mol% by sonochemical method are shown in FIGURE 3. The morphologies are in aggregated spherical shape due to high energy transfer between the bubbles from sonicated probe. The particle sizes of F doped ZnO (0, 1 and 5 mol%) are approximately 86.4, 77.9 and 80.4 nm, respectively. There are interesting change in FIGURE 3(b) at 1mol% F doped ZnO via sonochemical process. Nanosheet structure had been monitored in this condition was revealed which respected to low concentration of hydroxide group in (001) plane to surface energy changing and decrease rod-like forming [19, 20]. Meanwhile, the chemical element was investigated by EDX is shown in FIGURE 2(d) and FIGURE 3(d). The element compositions of Zn O and F atom were detected by this technique. For F doped ZnO by co-precipitation method, chemical element was detected as Zn 62.55 wt.%, O 27.19 wt.% and F 10.23 wt.% in the product. While, The composition of Zn O and F atom in sonochemical methods was composed of Zn 60.22 wt.%, O 28.68 wt.% and F 11.08 wt.%. The chemical element of F doped ZnO by both methods was significantly changed in F atom. This result might be interpreted that the diffusion of F dopant in ZnO structure by co-precipitation method was easier than sonochemical reaction which detected high F content on ZnO surface.

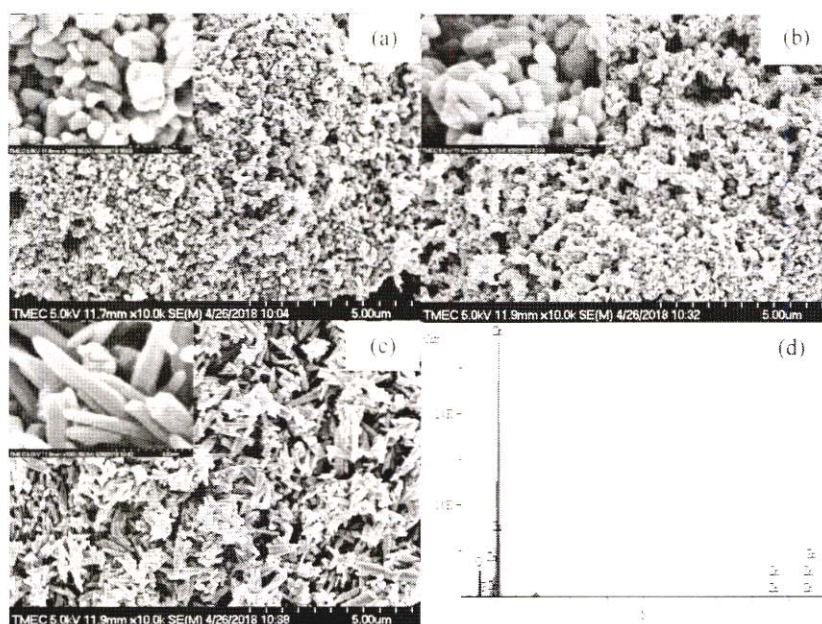


FIGURE 2. FE-SEM images of ZnO morphologies with various fluorine doping concentrations by co-precipitation method (a) 0 mol%, (b) 1 mol%, (c) 5 mol% and (d) EDX spectrum at F 5 mol%

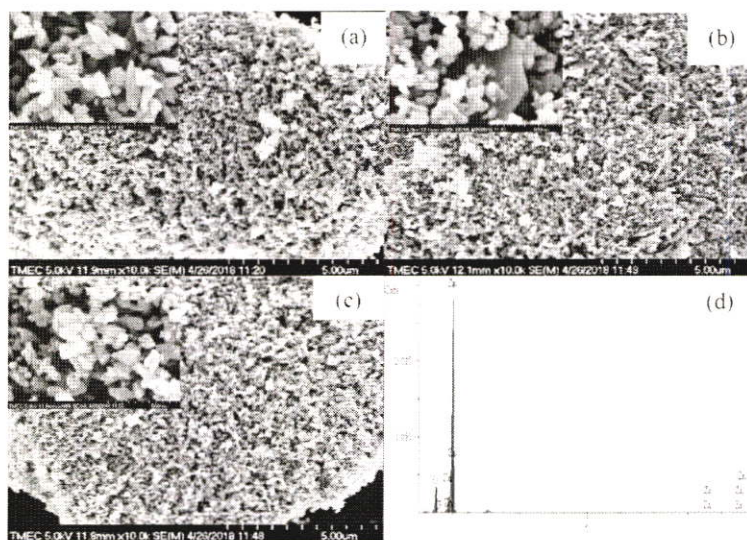


FIGURE 3. FE-SEM images of ZnO morphologies with various fluorine doping concentrations by sonochemical method (a) 0 mol%, (b) 1 mol%, (c) 5 mol% and (d) EDX spectrum at F 5 mol%

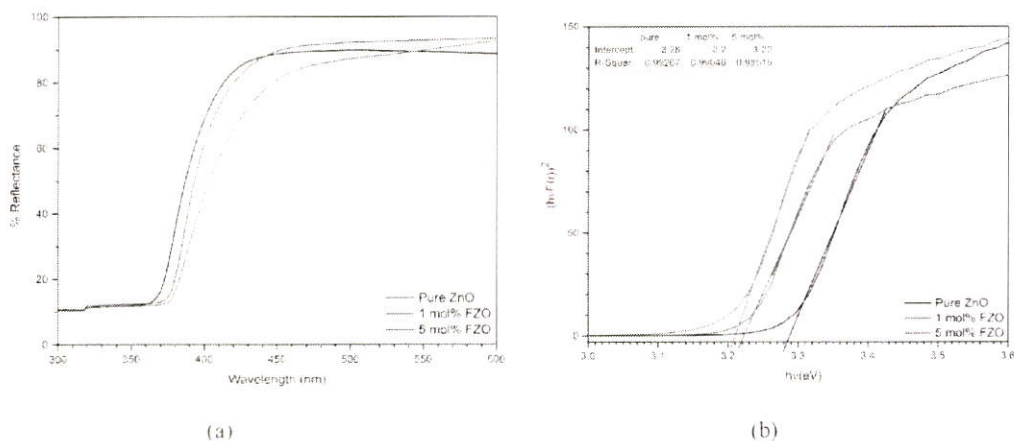


FIGURE 4. (a) Diffuse reflectance spectra and (b) bandgap energy of F doped ZnO nanopowders by co-precipitation method.

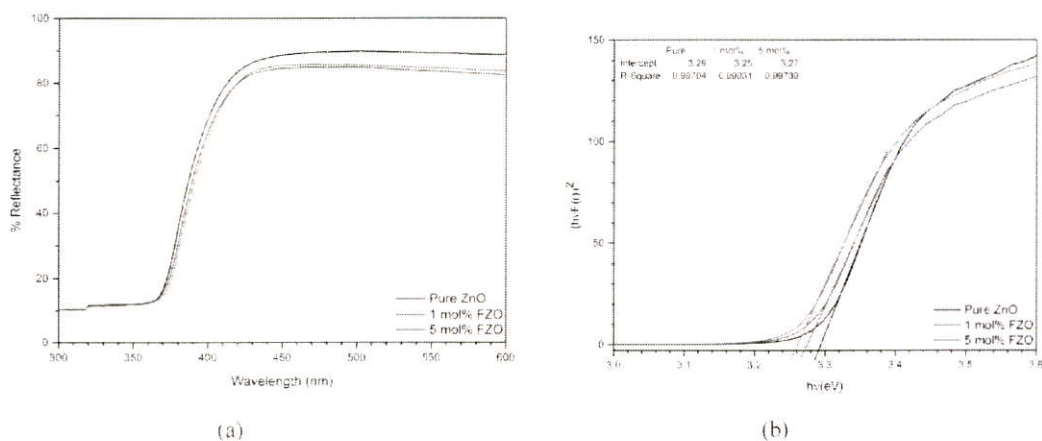


FIGURE 5. (a) Diffuse reflectance spectra and (b) bandgap energy of F doped ZnO nanopowders by sonochemical method.

Measurement of optical properties by UV-Vis diffuse reflectance spectra (DRS) of F doped ZnO at F concentration 0, 1 and 5 mol% are presented in FIGURE 4 and FIGURE 5. In co-precipitation method (FIGURE 4(a)), DRS spectra obviously shifted to lower energy values (red shift) following the increase of F content. Bandgap energy of F doped ZnO was calculated from Kubelka-Munk function [21]. Graph plotting with the relation of $(F(R) h\nu)^2$ and $h\nu$ is shown in FIGURE 4(b). The optical bandgap energy of F doped ZnO by co-precipitation method was reduced to 3.20 eV compared with pure ZnO bandgap energy from 3.28 eV. The optimized condition of F content in ZnO was at 1 mol% by co-precipitation recipe. For sonochemical process, DRS spectra of F doped ZnO as depicted in FIGURE 5(a) showed same absorption edge in range of 360 to 400 nm in each condition owing to similar nanoparticle morphology. However, the calculated optical bandgap of F doped ZnO slightly decreased and obtained at F 1 mol%. The result of narrow optical bandgap from F doped ZnO may be resulted from lattice defect by the influence of doping impurity atoms leading to shifted adsorption edge to red shift [22]. This mechanism was related to the band shrinkage effect by increasing F carrier concentrations.

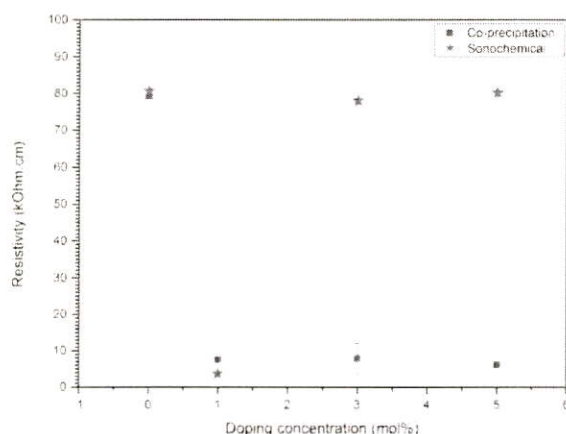


FIGURE 6. Electrical resistivity of F doped ZnO nanopowders at different concentration 0-5 mol%.

Electrical resistivity of F doped ZnO nanopowders synthesized by co-precipitation and sonochemical method is shown in FIGURE 6. The electrical resistivity of pure ZnO powder was approximately 79.44 kΩ-cm. After adding F dopant in ZnO, decreasing resistivity of F doped ZnO nanopowders was evidently occurred especially in co-precipitation method (blue square). Moreover, high conductivity of F doped ZnO product was obtained by the addition of F doping atoms. The electrical resistivity of F doped ZnO were reduced to 7.93, 6.16 and 3.08 kΩ-cm, respectively followed by F concentration at 1, 3 and 5 mol%. Good conductivity of F doped ZnO products due to its rod-shape structure. Therefore, electron carriers can easily move overall the sample due to the decrease of grain boundary scattering [22]. The other method (sonochemical method) in red star, trend of electrical resistivity of F doped ZnO was identical to pure ZnO. Whereas the resistivity of F doped ZnO at 1 mol% drastically decreased to 3.64 kΩ-cm because of sheet-like morphology according to FE-SEM image. This phenomenon was leading to easily free electron movement on sheet plate more than sphere and rod shapes [23].

CONCLUSION

F doped ZnO nanopowders were successfully synthesized by co-precipitation and sonochemical method. For co-precipitation method, F doped ZnO morphologies were formed in rod-like structure. ZnO rod length was increased when adding F doping concentration. The crystallite size of F doped ZnO was enlarged due to thermal energy from annealing process and the interstitial of F atoms between zinc and oxygen sites. The optical bandgap of F doped ZnO at 1 mol% was decreased to 3.20 eV owing to impurity level in bandgap energy resulting to narrower bandgap. The lowest electrical resistivity was obtained at 3.08 kΩ-cm in optimized F 5 mol% doping because of long rod length leading to facile free electron movement. This process can be interpreted that incorporated in ZnO structure leading to increased crystalline size. In case of sonochemical method, F doped ZnO products were formed in spherical structure with same crystallite size and particle size. Therefore, no difference in optical bandgap and electrical resistivity when adding F concentration was increased due to low incorporation of F ionic in ZnO structure.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network. Authors would like to express deep thank to National council of Thailand (Grant No. A118-0361-018) and JASTIP fund for financial support.

REFERENCES

1. A.A. Mosquera, D. Horwat, A. Rashkovskiy, A. Kovalev, P. Miska, D. Wainstein, J.M. Albella and J. L. Endrino, *Sci. Rep.* **3**, 174 (2013).
2. D. Sengupta, B. Mondal, and K. Mukherjee, *J. Solid State Electrochem.* **22**, 227 (2018).

3. Ravichandran, K. Snega, S.J. Begum, N. Swaminathan, K. Sakthivel, B.R. Christena, L. Chandramohan and G.O. Shizuyasu. *Superlattices Microstruct.* **69**, 17-28 (2014).
4. J.P. Carroll, A. Myles, B. Quilty, D. McCormack, R. Fagan, S. Hinder, D.D. Dionysiou, and S. Pillai. *J. Hazard. Mater.* **324**, 39-47 (2017).
5. S.D. Senol, O. Ozturk and C. Terzioğlu. *Ceram. Int.* **41**, 11194-11201 (2015).
6. O.A. Yildirma and C. Durucan. *Ceram. Int.* **42**, 3229-3238 (2015).
7. S. Bazazia , N. Arsalania, A. Khataee and A.G. Tabrizia. *J. Ind. Eng. Chem.* **65**, 265-272 (2018).
8. M. Kumara, B. Singh, P. Yadav, V. Bhatt, M. Kumar, K.Singh, A.C. Abhyankar, A. Kumar and J. Yund, *Ceram. Int.* **43**, 3562-3568 (2017).
9. C. Tsay and W. Hsu, *Ceram. Int.* **39**, 7425-7432 (2013).
10. S. Kerli, U. Alver, H. Yaykasli, B. Avar, A. Tanariverdi and C. kursun. *Asian J. Chem.* **25**, 7539-7542 (2013).
11. O.D. Jayakumar, H.G. Salunke, R.M. Kadam, M. Mohapatra, G. Yaswant and S.K. K. reshtha, *Nanotechnology* **17**, 1278-1285 (2006).
12. T. Bhuyan, M. Khanuja, R. Sharma, S. Patel, M.R. Reddy, S. Anand and A. Varma. *J. Nanopart. Res.* **17**, 288 (2015).
13. X. Zhang, J.Qin, R. Hao, L. Wang, X. Shen, R.Yu, S. Limpanart, M. Ma and R. Liu. *J. Phys. Chem. C.* **119**, 20544-20554 (2015).
14. K. Swaroop and H.M. Somashekarappa. *Res. J. Recent. Sci.* **4**, 197-201 (2015).
15. R.S. Yadav, P. Mishra and A.C. Pandey, *Ultrason. Sonochem.* **15**, 863–868 (2008).
16. Z. Chen, E. Shi, Y. Zheng, W. Li, N. Wu, W. Zhong, *Mater. Lett.* **56** (2002) 601-605.
17. S. Ilcan, Y. Caglar, M. Caglar and F. Yakuphanoglu, *App. Surf. Sci.* **255**, 2353–2359 (2008).
18. J. Joo, B. Y. Chow, M.Prakash, E. S. Boyden and J. M. Jacobson, *Nat. mater.* **10**, 596–601 (2011).
19. C.X. Xu, X.W. Sun, Z.L. Dong, and M.B. Yu, *Appl. Phys. Lett.* **85(17)**, 3878- 3880 (2004).
20. J. Guo, J. Zheng, X. Song and K. Sun, *Mater. Lett.* **97**, 34-36 (2013).
21. C. Aydin, M.S. Abd Ei-sadek, K. Zheng, I.S. Yahia and F. Yakuphanoglu, *Opt. Laser Technol.* **48**, 447-452 (2013).
22. S. Ilcan, Y. Caglar, M. Caglar and F. Yakuphanoglu, *Appl. Surf. Sci.* **255**, 2353–2359 (2008).
23. R. J. Ramalingam, G.S. Chung, *Mater. Lett.* **68**, 247–250 (2012).

ประวัติคณะวิจัย

ข้อมูลเกี่ยวกับคณะผู้วิจัย

- ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ประวัติ

ชื่อ-สกุลนางสาว วณิชยา เมฆประสาธ.....

หน้าที่การงานปัจจุบัน (อาจารย์/เจ้าหน้าที่ /นักวิจัย /นักศึกษาระดับ...../อื่นๆ)

ตำแหน่ง.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์.....

ประวัติการศึกษาสูงสุด

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า-คุณทหารลาดกระบัง	2551
ปร.ด.	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า-คุณทหารลาดกระบัง	2555

สถานที่ติดต่อ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ..... Nanocomposite materials, Metal oxide for photocatalyst, Ball-milling process, Photoluminescence material.....

2. ผลงาน

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์/สิ่งประดิษฐ์/สิทธิบัตร (โปรดระบุให้ชัดเจน)

- งานวิจัย (โปรดระบุชื่อโครงการวิจัย คณะผู้ดำเนินการ แหล่งทุน งบประมาณปีที่ได้รับการสนับสนุนและปีที่แล้วเสร็จ)

โครงการวิจัย	คณะผู้ดำเนินการ	แหล่งทุน	งบประมาณปีที่ได้รับการสนับสนุน	ปีที่แล้วเสร็จ
1. การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติทางแสงของวัสดุนาโน (ZnAl ₂ O ₄) โดยการเจือโลหะทรานซิชัน ด้วยกระบวนการพื้นฐานโซลเจล	- ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (หัวหน้าโครงการ)	ทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่ กองทุนวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2556	2558
2. การสังเคราะห์และการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของวัสดุประกอบออกไซด์เชิงซ้อน M-Zn-O โครงสร้างสปีเนล (M=Sn, Al)	- รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา (หัวหน้าโครงการ) - ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (ผู้ร่วมวิจัย)	ทุนพัฒนานักวิจัย กองทุนวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2558	2559
3. การสังเคราะห์และการเพิ่มประสิทธิภาพของไททานเนียมไดออกไซด์จากแร่ธรรมชาติเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์สำหรับการประยุกต์ทางอุตสาหกรรม	- รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา (หัวหน้าโครงการ) - ผศ.ดร. สรพงษ์ ภาสุปรีย์ (ผู้ร่วมวิจัย) - ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (ผู้ร่วมวิจัย)	ฝ่ายบริหารคัสเตอร์ และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ	2558	2559
4. การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติการเปล่งแสงของวัสดุประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโครงสร้างสปีเนลซิงค์ออกไซด์ (ZnAl ₂ O ₄) โดย	- ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (หัวหน้าโครงการ)	เงินงบประมาณจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2559	2559

การเจือไอออนของธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์”				
5. การย่อยสลายพลาสติกในสถานะของแข็งภายใต้แสงอาทิตย์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโททานีที่สังเคราะห์จากแร่ธรรมชาติ”	- รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา (หัวหน้าโครงการ) - ดร. กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน (ผู้ร่วมวิจัย) - ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (ผู้ร่วมวิจัย)	เงินงบประมาณจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2560	2560
6. การสังเคราะห์วัสดุนาโนของวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้า M-Zn-O (M=F, B) โดยกระบวนการโซลเจลร่วมกับกระบวนการคลื่นเสียงเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงานด้านพลังงาน	- ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (หัวหน้าโครงการ)	เงินงบประมาณจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	2561	2561
7. การพัฒนาวัสดุไฮบริดคอมโพสิตของเซลลูโลสและวัสดุโครงสร้างนาโนที่สกัดจากแร่ธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต	- รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา (หัวหน้าโครงการ) - ดร. กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน (ผู้ร่วมวิจัย) - ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาธ (ผู้ร่วมวิจัย)	เงินงบประมาณจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (มุ่งเป้า)	2561	2561

- ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ (จำแนกระดับชาติและระดับนานาชาติหรือเทียบเท่า)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

1. **W. Mekprasart**, T. Khumtong, J. Rattanak, W. Techitdheera and W. Pecharapa, “Effect of Nitrogen Doping on Optical and Photocatalytic Properties of TiO₂ Thin Film Prepared by Spin Coating Process”, Energy Procedia, (2013) 34, Pp. 746-750.
2. S. Suphankij, **W. Mekprasart**, W. Pecharapa, “Photocatalytic of N-doped TiO₂ Nanofibers Prepared by Electrospinning”, Energy Procedia, (2013) 34, Pp. 751-756.
3. Russameeruk Noonuruk, **Wanichaya Mekprasart**, Narongdet Wongpisutpaisan, Naratip Vittayakorn and Wisanu Pecharapa, “SnO₂ Nanoparticle Synthesized by Ultrasonic-Assisted Process”, Advanced Materials Research, (2013) 770, Pp. 299-302.
4. **Wanichaya Mekprasart**, Wirat Jareenboon, and Wicharn Techitdheera, “Modification of Working Electrode of Dye-Sensitized Solar Cell Using TiO₂ Nanoparticles/TiO₂ Nanofibers/CNT Composite”, Advanced Materials Research, (2013) 802, Pp. 32-36.
5. Jiravat Rattanak, **Wanichaya Mekprasart**, Wisanu Pecharapa, and Wicharn Techitdheera, “Photocatalytic activities under UV light of ball-milled TiO₂ photocatalysts”, Advanced Materials Research, (2013) 802, Pp. 237-241.
6. Sineenart Suphankij, **Wanichaya Mekprasart**, and Wisanu Pecharapa, “Effect of calcinations temperature on structural properties, phase transformation and photocatalytic activity of electrospun TiO₂ nanofibers”, Advanced Materials Research, (2013) 802, Pp. 247-251.
7. R. Noonuruk, **W. Mekprasart**, N. Wongpisutpaisan, N. Vittayakorn, and W. Pecharapa, “SnO₂ Nanoparticle Synthesized by Ultrasonic-Assisted Process”, Advanced Materials Research, (2013) 770, Pp. 299-302.

8. **Wanichaya Mekprasart**, Sineenart Suphankij, Thanit Tangcharoen, Athapon Simpraditpan, and Wisanu Pecharapa, "Modification of Dye-Sensitized Solar Cell Working Electrode Using TiO₂ Nanoparticle/N-doped TiO₂ Nanofiber Composites", *Physica Status Solidi (a)*, (2014) 211, Pp. 1745-1751.
9. R. Noonuruk, **W. Mekprasart**, T. Supparattanasamai, T. Kanyapan, W. Techitdheera, and W. Pecharapa, "Characterization and Phase Formation Study of ZnO:Sn Nanoparticles Synthesized by Co-precipitation Method", *Integrated Ferroelectrics*, (2014) 156, Pp. 209-217.
10. **Wanichaya Mekprasart**, Suchada Worasawat, and Wisanu Pecharapa, "Effect of pH and Temperature on Physical Properties of Zinc Aluminate based Nanostructure Synthesized via Co-precipitation Method", *Advanced Materials Research*, (2015) 1103, Pp. 53-59.
11. **W. Mekprasart**, S. Worasawat, T. Tangcharoen, and W. Pecharapa, "Characterization and Study Effect of Calcination Temperature on Structural Properties of Spinel Zinc Aluminate via Co-precipitation Process", *Physica Status Solidi (c)*, (2015) 12, Pp. 624-627.
12. **Wanichaya Mekprasart**, Puritat Nakhanivej, Thanit Tangcharoen, and Wisanu Pecharapa, "Effect of Precursor Concentration on Physical Properties of Cube-Like Zn₂SnO₄ Powders Synthesized by Co-Precipitation Method", *Integrated Ferroelectrics*, (2015) 165, Pp. 138-145.
13. **Wanichaya Mekprasart**, Suchada Worasawat, Thanit Tangcharoen, and Wisanu Pecharapa, "Effect of Zn:Al ratio and calcination time on structural properties of Zn-Al-O compound", *Key Engineering Materials*, (2016) 675-676, Pp. 535-538.
14. Puritut Nakhanivej, Thanit Tangcharoen, **Wanichaya Mekprasart**, and Wisanu Pecharapa, "Effect of Zn:Sn Ratio and Calcination Temperature on Phase Transformation of Zn-Sn-O Compound", *Key Engineering Materials*, (2016) 675-676, Pp. 539-543.
15. Weerachon Phoohinkong, **Wanichaya Mekprasart**, and Wisanu Pecharapa, "Photocatalytic Performance of Ball-milled Anatase/Rutile Mixed Phase TiO₂ Composite Powders", *Key Engineering Materials*, (2016) 675-676, Pp. 593-596.
16. **Wanichaya Mekprasart**, Thanit Tangcharoen, Puritat Nakhanivej and Wisanu Pecharapa, "Synthesis and Characterization of Cubic-like Zinc Stannate Powders Prepared by Co-precipitation Method", *Chiang Mai Journal of Science*, (2016) 43(2), Pp. 345-350.
17. Russameeruk Noonuruk, Jiruntanin Kanoksinwuttipong, **Wanichaya Mekprasart**, Wicharn Techitdheera, Jaran Sritharathikhun and Wisanu Pecharapa, "Indium Tin Oxide Conductive Nanoparticles Synthesized by Sonochemical Method", *Integrated Ferroelectrics*, (2016) 175, Pp. 155-164.
18. **Wanichaya Mekprasart** and Wisanu Pecharapa, "Transparent Light-guided Plates based on TiO₂/Rhodamine6G Composite Thin Films", *Surface & Coatings Technology*, (2016) 306, pp. 132-139.
19. Weerachon Phoohinkong, Wadwaew Yimwan, **Wanichaya Mekprasart**, and Wisanu Pecharapa, "Preparation of nano FeTiO₃-TiO₂ Catalyst from Ilmenite Ore for Catalytic Degradation of Methylene Blue" *Suranaree Journal of Science and Technology*, 23(4) October-December (2016), pp. 453-459.
20. Weerachon Phoohinkong, Sorapong Pavasupree, Anucha Wannagon, Kanokthip Boonyarattanakalin, **Wanichaya Mekprasart**, Wisanu Pecharapa, "Electrochemical Properties of Nanopowders Derived from Ilmenite and Leucoxene Natural Minerals", *Ceramics International*, (2017) Vol. 43 S1, pp. s717-s722.

21. Weerachon Phoohinkong, Sorapong Pavasupree, Anucha Wannagon, Kanokthip Boonyarattanakalin, **Wanichaya Mekprasart**, Wisanu Pecharapa, "Characterization and X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy of Nanoparticles Derived from Natural Ilmenite Ore via Acid-assisted Mechanical Ball-milling Process", *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 8, (2017) 035012 (8 pages).
22. Weerachon Phoohinkong, Sorapong Pavasupree, **Wanichaya Mekprasart**, Wisanu Pecharapa, "Synthesis of Low-cost Titanium Dioxide-Based Heterojunction Nanocomposite from Natural Ilmenite and Leucoxene for Electrochemical Energy Storage Application", *Current Applied Physics*, (2018) 18, pp. S44-S54.
23. Ammar Ibrahim, Weerachon Phoohinkong, **Wanichaya Mekprasart**, Wisanu Pecharapa, "Anatase/Rutile TiO₂ Composite Thin Films Prepared via Dip Coating Technique and Their Hydrophilicity, Stability and Photocatalytic Activity", *Materials Today: Proceedings*, (2018) 5, pp. 10903–10909.
24. **Wanichaya Mekprasart**, Kanokthip Boonyarattanakalin, Wisanu Pecharapa, Keiichi N. Ishihara, "Optical Characteristics of Samarium Doped ZnAl₂O₄ Nanomaterials Synthesized by Vibrational Milling Process", *Materials Today: Proceedings*, (2018) 5, pp. 14126–14130.
25. Kittiya Plermjai, Kanokthip Boonyarattanakalin, **Wanichaya Mekprasart**, Sorapong Pavasupree, Weerachon Phoohinkong, and Wisanu Pecharapa, "Extraction and Characterization of Nanocellulose from Sugarcane Bagasse by Ball-milling-assisted Acid Hydrolysis", *AIP Conference Proceedings* 2010, 020005 (2018); doi: 10.1063/1.5053181.
26. Chatpong Bangbai, Titarat Thongpradith, Wisanu Pecharapa, and Wanichaya Mekprasart, "Synthesis and Characterization of F doped ZnO Nanopowders by Chemical Routes of Co-precipitation and Sonochemical Process", *AIP Conference Proceedings* 2010, 020004 (2018); doi: 10.1063/1.5053180.
27. Kateryna Zelenska, Volodymyr Gnatyuk, Wanichaya Mekprasart, Wisanu Pecharapa, and Hideki Nakajima, "Synchrotron Radiation X-ray Photoelectron Spectroscopic Study of CdTe-In Structures Formed by Laser-Induced Doping Technique", *AIP Conference Proceedings* 2010, 020011 (2018); doi: 10.1063/1.5053187.