

ผลกระทบจากการเจือปน และเกลเลียม
ลงในโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซโนเคมี



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF BORON AND GALLIUM-DOPED ZINC OXIDE
NANOPARTICLES SYNTHESIZED BY SONOCHEMICAL-ASSISTED
PROCESS



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

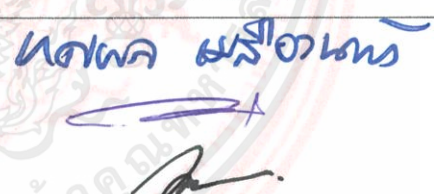
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลกระทบจากการเจือโบรอน และแกเลียมลงในโครงสร้าง
ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซโนเคมี

Special Project Title EFFECT OF BORON AND GALLIUM-DOPED ZINC OXIDE NANOPARTICLES
SYNTHESIZED BY SONOCHEMICAL-ASSISTED PROCESS

นักศึกษา นางสาว พรชนก ศิริจตุรพร
รหัสประจำตัว 56110025
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วณิชยา เมฆประสาท
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ทศพล	เมธีองนนท์	
รศ.ดร.วิชณู	เพชรภา	
ผศ.ดร.วณิชยา	เมฆประสาท	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

๑๕ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๐

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุติไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่.....๕.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	ผลกระทบจากการเจือโบรอนและแกลเลียมลงในโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซโนเคมี
นักศึกษา	นางสาว พรชนก ศิริจตุรพร
เลขประจำตัว	56110025
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วณิชยา เมฆประสาธ

บทคัดย่อ

วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี โดยโครงการพิเศษนี้ได้สนใจที่จะพัฒนาและปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ด้วยการศึกษาผลกระทบจากการเจือธาตุหมู่ IIIA ได้แก่ โบรอน และแกลเลียม ลงในโครงสร้างอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ โดยจะทำการศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์สารต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาในการโซโนเคมี ค่า pH ของสารละลายในปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารเจือธาตุหมู่ IIIA (0-7%) ลงในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ โดยกระบวนการโซโนเคมี จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดอนุภาค และองค์ประกอบของธาตุ วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง และเทคนิคการตรวจวัดธาตุเชิงปริมาณ สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและไฟฟ้า วิเคราะห์โดยเครื่องวัดการสะท้อนแสง และการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทำได้สำเร็จที่ค่า pH ของสารละลายในปฏิกิริยา คือ pH9 และเวลาการให้คลื่นเหนือเสียง 10 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากวัฏภาคของซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ ในขณะที่อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคขนาดเล็กที่ pH และเวลาที่เหมาะสมดังแสดงในผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในส่วนของการเจือธาตุอื่นลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ พบว่าซิงค์ออกไซด์มีขนาดผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโบรอน ในส่วนของการเจือแกลเลียมทำให้ขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์ลดลงที่ความเข้มข้น 1% ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเจือโบรอนมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่การเจอแกเลียมมีลักษณะเป็นแท่งที่ความเข้มข้นของการเจอเข้มข้น 3-7% ในส่วนของปริมาณของธาตุซิงค์และแกเลียมปรากฏอย่างชัดเจนในสเปกตรัมของการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามปริมาณของธาตุโบรอนในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไม่สามารถตรวจจับได้ เนื่องจากน้ำหนักอะตอมของธาตุโบรอนต่ำ และความเข้มของสัญญาณต่ำ สำหรับสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการปรับปรุงโดยการเจอแกเลียมซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานและการนำไฟฟ้า นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของสารตั้งต้นที่หลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาและวัฏภาคปนเปื้อนที่เกิดขึ้น เป็นอิทธิพลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของแกเลียม ในขณะที่สมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของการเจอโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : กระบวนการโซโนเคมี; ซิงค์ออกไซด์; การเจอโบรอน/แกเลียม; อนุภาคนาโน



Special Project Title	Effect of Boron and Gallium Doped Zinc Oxide Nanoparticles Synthesized by Sonochemical-Assisted Process
Student	Miss Pornchanok Sirijaturaporn
Student ID	56110025
Degree	Bachelors of Engineering
Major	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Wanichaya Mekprasart

ABSTRACT

Zinc oxide (ZnO) nanomaterial is one of promising material for optoelectronic device due to good electrical and optical properties. To improve ZnO properties, doping technique with metal group has been attractively studied for its mechanism. In this work, boron (B) and gallium (Ga) as IIIA metal group were chosen as guest materials in ZnO structure. The crucial parameters such as reaction time, pH and guest doping concentration (0-7%) were investigated by sonochemical assisted process. Chemical and crystalline structures were analyzed by Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) and X-ray diffractometer (XRD). Morphology, particle size and element composition were monitored by scanning electron microscope (SEM), particle size analyzer and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). For optical and electrical properties, UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy (DRS) and four-point probe method were investigated. Pure ZnO nanoparticles were successfully obtained at pH 9 and sonicated time at 10 min corresponding to purity ZnO phase in XRD patterns. Meanwhile, ZnO nanoparticles were in ultrafine particle and small particle size at this optimized pH and time as shown in SEM results. In case of guest material doping, ZnO crystallite size was increased by the addition of B concentration. For Ga doping, ZnO crystallite size was reduced at 1% Ga concentration. B doped ZnO was in round-shape particle at each doping level, meanwhile, Ga doped ZnO was in rod-shape as Ga doping at 3-7%. The content of Zn

and Ga atoms are obviously observed in EDS spectra corresponding to weight ratio of the precursor. However, the amount of B content in ZnO cannot detect due to light atomic weight and low signal intensity. The optical and electrical properties of ZnO nanoparticle were mostly improved by the presence of Ga doping relating to the increase of band gap energy and high electrical conductivity. Moreover, the increase of residual precursor and contaminated phase were obtained by the influence of high Ga addition. While, the optical and electrical properties by B doped ZnO were insignificantly enhanced.

KEYWORDS : Sonochemical Process; Zinc Oxide; Doped B/Ga; Nanoparticles



กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วณิชยา เมฆประสาธ สำหรับแนวทางในการทำงานวิจัย และคำปรึกษาที่มีส่วนสำคัญในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ตลอดจนความกรุณา และความดูแลเอาใจใส่ สนับสนุนการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ เพชรภา สำหรับแนวทางการทำงานและคำปรึกษา ตลอดจนการอุปการะทุนสนับสนุน และขอขอบคุณอาจารย์ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลองตลอดจนการอบรมสั่งสอน ปลุกฝังวิชาความรู้ให้ข้าพเจ้า ขอขอบคุณห้องทดลอง Nano Material Research Laboratory (NMRL Lab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อำนวยความสะดวก อุปกรณ์และสารเคมีในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกคน สำหรับคำปรึกษาต่างๆ พร้อมทั้งคอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีให้กันตลอดมา และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดา และมารดา ที่ข้าพเจ้าเคารพยิ่งที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและกำลังใจที่สำคัญแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนวิชาแก่ข้าพเจ้า

พรชนก ศิริจตุรพร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี.....	4
2.2 สมบัติพื้นฐานของสารที่ใช้.....	5
2.2.1 ซิงค์ออกไซด์.....	5
2.2.2 โบรอน.....	6
2.2.3 แกลเลียม.....	6
2.3 คลื่นเหนือเสียงและเทคนิคการใช้คลื่นเหนือเสียง.....	7
2.4 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก.....	10
2.4.1 อ่างอัลตราโซนิก.....	10
2.4.2 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ.....	11
2.4.3 ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน.....	12
2.4.4 ระบบการสั่นตามแนวรัศมี.....	12
2.5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน.....	13
2.5.1 วัสดุนาโนศูนย์มิติ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแลVIห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 วัสดุนาโนหนึ่งมิติ.....	13
2.5.3 วัสดุนาโนสองมิติ.....	13
2.5.4 วัสดุนาโนสามมิติ.....	13
2.6 กระบวนการโซโนเคมี.....	14
2.6.1 หลักการโซโนเคมีและปรากฏการณ์คาวิตีชัน.....	14
2.6.2 ผลของกระบวนการโซโนเคมี.....	17
2.7 ทฤษฎีการเติมสารเจือ.....	17
2.7.1 การเจือแบบการเข้าแทนที่ช่องว่าง.....	17
2.7.2 การเจือแบบการแทรกตัว.....	17
2.7.3 การเจือแบบการเข้าแทนที่.....	17
2.7.4 การเจือสารในวัสดุไอออนิก.....	17
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง.....	19
2.8.1 เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วย หลักการฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	19
2.8.2 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	22
2.8.3 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	25
2.8.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ ธาตุเชิงพลังงาน.....	26
2.8.5 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง.....	27
2.8.6 เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการวัด การกระเจิงของแสง.....	28
2.8.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วย เข็มวัด 4 จุด.....	29
2.9 ทบทวนวรรณกรรม.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	42
3.3.1 การเตรียมสารละลาย-เจือสารละลาย.....	42
3.3.2 ขั้นตอนการโซโนเคมี.....	42
3.3.3 การล้างตะกอน.....	42
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาค.....	44
3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยเครื่อง ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	44
3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	44
3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	45
3.4.4 การวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบของธาตุบนพื้นผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ ธาตุเชิงพลังงาน.....	45
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง.....	46
3.4.6 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการวัด การกระเจิงของแสง.....	47
3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วย เข็มวัด 4 จุด.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	48
4.1 การวิเคราะห์ผลของเวลาในการโซโนเคมีลงในโครงร่างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	48
4.1.1 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	49
4.2 การวิเคราะห์ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ของซิงค์ออกไซด์.....	50
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	50
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	52
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต.....	53
4.3 การวิเคราะห์ผลจากการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-7%).....	53
4.3.1 ผลจากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วย เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	53
4.3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	54
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	56
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน.....	57
4.3.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต.....	58
4.3.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการสะท้อนแสง.....	59
4.3.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดค่าความต้านทานทานไฟฟ้า.....	62
4.4 การวิเคราะห์ผลจากการเจือแกลเลียมที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-7%).....	63
4.4.1 ผลจากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วย เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	63
4.4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	64
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	66
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ X ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

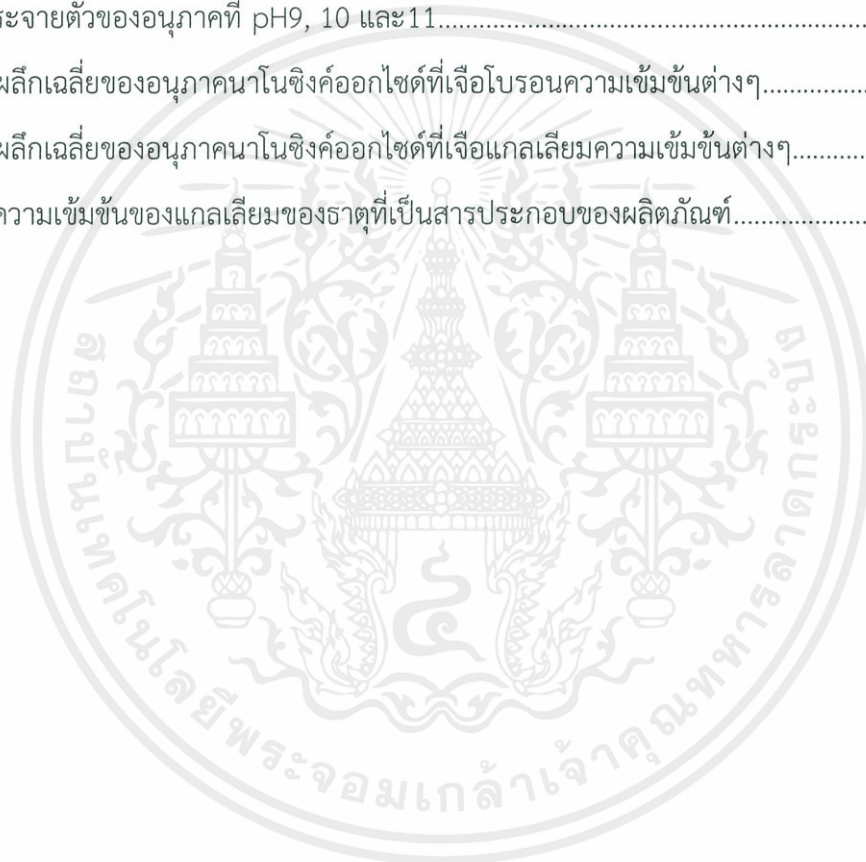
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต.....	69
4.4.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการสะท้อนแสง.....	70
4.4.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดค่าความต้านทานทานไฟฟ้า.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	75
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์.....	5
2.2 สมบัติพื้นฐานของโบรอน.....	6
2.3 สมบัติพื้นฐานของแคลเซียม.....	6
4.1 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	51
4.2 การกระจายตัวของอนุภาคที่ pH9, 10 และ 11.....	53
4.3 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนความเข้มข้นต่างๆ.....	56
4.4 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือแคลเซียมความเข้มข้นต่างๆ.....	65
4.5 แสดงความเข้มข้นของแคลเซียมของธาตุที่เป็นสารประกอบของผลิตภัณฑ์.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแลXIต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ก) เฮกซะโกนอลเวิร์ตไซด์ (ข) ซิงค์เบลนด์.....	5
2.2 การจำแนกช่วงความถี่ของคลื่นเสียงที่ความถี่ต่างกัน.....	7
2.3 โครงสร้างภายในของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ และวัสดุที่ใช้จริง.....	8
2.4 อัลตราโซนิกฟลอตเทคเตอร์.....	9
2.5 หลักการเกิดปรากฏการณ์ดอปเปอร์.....	9
2.6 อ่างอัลตราโซนิก (ก) แบบทั่วไป และ(ข) แบบคัพฮอร์น.....	10
2.7 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ (ก) ลักษณะของฮอร์นแบบต่างๆ และ(ข) ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบโดยภาพรวม.....	11
2.8 ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (ก) ลักษณะของการสั่นภายใน และ(ข) ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน.....	12
2.9 มิติของวัสดุนาโนแบบต่างๆ.....	13
2.10 การให้คลื่นเสียงเป็นจังหวะทำให้ฟองอากาศถูกบีบอัด คลายตัว และแตกออก.....	14
2.11 กระบวนการคาวิเทชันการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง.....	15
2.12 โดเมนที่แตกต่างกันภายในฟองอคูสติคคาวิเทชัน.....	15
2.13 ระบบการโซโนเคมี และส่วนประกอบต่างๆของเครื่องโซโนเคมี.....	16
2.14 การเจือสาร (ก) การเจือแบบการเข้าแทนที่ช่องว่าง (ข) การเจือแบบการแทรกตัว (ค) การเจือแบบอะตอมเล็กเข้าแทนที่ (ง) การเจือแบบอะตอมใหญ่เข้าแทนที่ (จ) การเจือสารแบบแฟรงเคิล (ฉ) การเจือสารแบบซ็อตก็.....	18
2.15 ลักษณะการสั่นในโมเลกุลการสั่นแบบยืด และการสั่นแบบงอ.....	19
2.16 หลักการของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์โหมด Attenuated total reflection (ATR)..	20
2.17 แสดงหมู่ฟังก์ชันสามัญที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	21
2.18 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัม.....	21
2.19 กฎของแบรกก์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในระนาบผลึก.....	23
2.20 การเกิดรังสีเอกซ์.....	23
2.21 ระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ส่วนประกอบ และ(ข) การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	25
2.23 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงพลังงาน.....	26
2.24 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน.....	26
2.25 การเดินทางของแสงผ่านสารตัวอย่าง.....	27
2.26 แบบจำลองการจัดเรียงเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงแบบลำแสงคู่.....	28
2.27 แบบจำลองเครื่องวัดสภาพการต้านทานของไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด.....	29
2.28 แผนผังการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์รูปร่างต่างๆ โดยวิธีการโซโนเคมี.....	30
2.29 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่รูปร่างต่างๆ.....	30
2.30 (ก,ข,ค,ง,จ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ(ฉ,ช,ซ,ฅ,ญ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	31
2.31 (ก,ข,ค) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และ (ง,จ,ฉ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารละลายไอโซโพรพานอล เอทานอล และเมทานอล.....	32
2.32 ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ลดลงโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกันของซิงค์ออกไซด์.....	33
2.33 ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่ความเข้มข้นของโบรอน (ก)0% (ข)5% (ค)7% (ง)11%.....	34
2.34 (ก) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ข) ขยายภาพ(ก).....	34
2.35 ผลวิเคราะห์การดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นความเข้มข้นต่างๆ.....	35
2.36 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์.....	35
2.37 .ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	36
2.38 ผลกระทบของเวลาที่ดูดซับแคดเมียม(II) และโครเมียม(VI)จากสารละลายแกลเลียม1%.....	36
2.39 ผลกระทบจากการเจือแกลเลียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ในการดูดซับแคดเมียม(II) และโครเมียม(VI)จากสารละลาย.....	36
2.40 ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ความเข้มข้นของแกลเลียม (ก) ไม่มีการเจือ (ข) 1% (ค) 3% (ง) HRTEM ของภาพของภาพ(ข) และ(จ)5%.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.41 (ก,ข,ค) ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของรอยต่อของแท่งนาโน (ง) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นนาโนชนิดเอ็น และ (จ) ผลการเปล่งแสงจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อทำเป็นอุปกรณ์ไดโอด.....	38
2.42 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของกระแสของอุปกรณ์จากผลการทดลอง เป็นไปตามลักษณะจำเพาะของไดโอดชนิดเปล่งแสง.....	38
2.43 ผลการเปล่งแสงจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อทำเป็นอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสง.....	39
2.44 (ก) ผลการวิเคราะห์เปล่งแสงจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ และ(ข) ผลการวิเคราะห์ความเสถียรของของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เวลา 100 วินาที.....	39
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต (ข) บอริกแอซิด (ค) แกลเลียมไนเตรด (ง) ปีเปตอิลีกทรอนิกส์ (จ) เครื่องซั่งสาร (ฉ) เอทานอล บริสุทธิ์ 99.9% (ช) เครื่องกวนสารละลาย (ซ) ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (ณ) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์.....	41
3.2 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์เจือโบรอน/แกลเลียมด้วยกระบวนการโซโนเคมี..	43
3.3 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) บริษัท PerkinElmer.....	44
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของบริษัท ZEISS รุ่น EVO MA10.....	45
3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของบริษัท Oxford Instrument รุ่น X-Max ^N	46
3.6 เครื่องวัดการทะลุผ่านของแสงของบริษัท Perkin-Elmer รุ่น λ -35.....	46
3.7 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของบริษัท Delsa TM NanoS รุ่น PN A54412.....	47
3.8 เครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของบริษัท Quatek รุ่น QT-50.....	47
4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ โดยวิธีการโซโนเคมีที่เวลา 0, 10, และ 20 นาที.....	48
4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยรูป (ก) โซโนเคมีที่เวลา 0 นาที (ก1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก2) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) โซโนเคมีที่เวลา 10 นาที (ข1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข2) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) โซโนเคมีที่เวลา 20 นาที (ค1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ค2) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการโซโนเคมีที่ pH 9, 10 และ 11.....	51
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการโซโนเคมีที่เวลา 10 นาที (ก) pH 9 (ข) pH 10 และ (ค) pH 11.....	52
4.5 พูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	54
4.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	55
4.7 รุขขยายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	55
4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น (ก) 1, (ข) 3, (ค) 5 และ (ง) 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	57
4.9 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	58
4.10 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	58
4.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	59
4.12 สเปกตรัมการสะท้อนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	60
4.13 การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	60
4.14 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ภาพขยายช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk.....	61
4.16 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	62
4.17 พูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	63
4.18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	64
4.19 รูปขยายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	65
4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น (ก) 1, (ข) 3, (ค) 5 และ (ง) 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	66
4.21 ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	67
4.22 ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	67
4.23 ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	67
4.24 ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	68
4.25 ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	68
4.26 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	69
4.27 สเปกตรัมการสะท้อนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk.....	71
4.29 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	71
4.30 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากประชากร และความต้องการของมนุษย์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้การดำรงชีวิตสะดวกสบายและมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ดังนั้นงานด้านวัสดุศาสตร์จึงเป็นศาสตร์ที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการพัฒนา ปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งคือออกไซด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องมาจากสมบัติที่โดดเด่น คือ มีสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่ดี มีความเสถียรทางความร้อน, ทางเคมี, และฟิสิกส์ มีราคาต่ำ มีแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง มีอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนสูง มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การสังเคราะห์ซึ่งคือออกไซด์มีหลากหลายวิธี ได้แก่ การสังเคราะห์โดยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ตัวอย่างเช่น การบดแบบใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball-milling) การสังเคราะห์โดยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เนื่องจากมีขั้นตอนการเผาสารที่อุณหภูมิสูง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ขนาดของสารที่สังเคราะห์มีขนาดใหญ่กว่าวิธีการสังเคราะห์ทางเคมี และมีความบริสุทธิ์ต่ำ เนื่องจากเกิดการปนเปื้อนได้ง่ายในระหว่างกระบวนการทดลอง [1] การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) โดยทั่วไปใช้สารละลายที่มีความเป็นเบสสูงเพื่อให้ตกตะกอนเป็นผงและใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนนาน [2] การสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว (Molten salt method) [3] การสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal synthesis) สามารถเตรียมสารได้ในขั้นตอนที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสารที่ได้ มีความสม่ำเสมอ อนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโน แต่ขั้นตอนการเตรียมต้องใช้อุณหภูมิสูง และต้องควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ [4] การสังเคราะห์โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave irradiation) ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์น้อย แต่ผู้ทดลองมีความเสี่ยงสูง [5] และต่อมามีการนำกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemical processing) [6-8] มาใช้ในการสังเคราะห์สาร โดยโซโนเคมีหลักการคือใช้คลื่นเหนือเสียงกับปฏิกิริยา และกระบวนการทางเคมี ภายในตัวกลางที่เป็นสารละลายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อของเหลวได้รับคลื่นเหนือเสียงจึงเกิดวัฏจักรของการบีบอัด และการขยายตัวทำให้เกิดการดึงโมเลกุลออกจากกัน ในระหว่างรอบการขยายตัวคลื่นเสียง ถ้าความเข้มคลื่นเสียงเพียงพอที่สามารถเกิดโพรงอากาศ (Cavity) กลไกนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ อะคูสติกคาวิตชัน (Acoustic cavitation) คือ การเกิดการชนกันอย่างรุนแรงของฟองอากาศในของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการปลดปล่อยความร้อนและความดัน ทำให้เกิดสารที่มีลักษณะเป็นตะกอน ซึ่งกระบวนการโซโนเคมีใช้ระยะเวลาสั้น วิธีเตรียมไม่ซับซ้อน ไม่ต้องทำการทดลองในสภาวะสุญญากาศ สารที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถสังเคราะห์อนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวของอนุภาคดี [9]

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการโซโนเคมีในการสังเคราะห์สารเชิงซ้อนออกไซด์ การนำอนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ตัวอย่างเช่น เพียโซอิเล็กทริก เซนเซอร์ทางเคมี เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อม และไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น ในปัจจุบันวัสดุระดับนาโน (1-100 นาโนเมตร) เป็นที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนสมบัติขึ้นอยู่กับขนาด ลักษณะโครงสร้าง เมื่อวัสดุขนาดเล็กระดับนาโนส่งผลให้สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติทางโครงสร้างเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์ โดยการนำธาตุหมู่ IIIA ได้แก่ โบรอน และแกลเลียม มาเจือลงในโครงสร้างของเชิงซ้อนออกไซด์ เพราะเป็นธาตุหมู่ที่มีความต้านทานต่ำ และสารเจือจะให้อิเล็กตรอนแก่เชิงซ้อนออกไซด์ ทำให้เชิงซ้อนออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเพิ่มขึ้น [10] จากนั้นศึกษาผลของระยะเวลาที่ให้คลื่นเหนือเสียง (Sonicate time) ที่มีผลต่อการสังเคราะห์สารเชิงซ้อนออกไซด์อย่างสมบูรณ์ จากสารตั้งต้นคือ ซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate) โดยใช้ตัวทำละลาย คือน้ำปลอดประจุ (Deionized water) และเอทานอล (Ethanol) เนื่องจากเอทานอลเป็นตัวทำละลายที่ทำให้สารตั้งต้นกระจายตัวดี และช่วยให้ควบคุมขนาดอนุภาคของเชิงซ้อนออกไซด์ให้ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยมีความเสถียรภาพสูง [11] และใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเป็นกรดเบสระหว่าง pH 9-11 ในการตกตะกอนสารเพื่อหาค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชิงซ้อนออกไซด์เจือด้วยโบรอนและแกลเลียม ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-7 เปอร์เซ็นต์) เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติโครงสร้างผลึก ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์เจือด้วยโบรอนและแกลเลียม เพื่อนำมาพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์เจือด้วยโบรอนและแกลเลียมด้วยกระบวนการโซโนเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์เจือด้วยโบรอนและแกลเลียม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อใส่สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลาที่ให้คลื่นเหนือเสียง และปริมาณของสารเจือ

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพโครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนเชิงซ้อนออกไซด์เจือโบรอนและแกลเลียมด้วยกระบวนการโซโนเคมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ค้นคว้าและทบทวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

1.3.2 ทราบผลกระทบจากปริมาณสารเจือของโบรอนและแคลเซียม ที่มีผลต่อลักษณะทางโครงสร้าง สัณฐานวิทยา สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนและแคลเซียม

1.3.3 ทราบผลกระทบของค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อใส่สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อลักษณะทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

1.3.4 ทราบผลกระทบของระยะเวลาที่ให้คลื่นเหนือเสียง ที่มีผลต่อลักษณะทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือโบรอนและแคลเซียม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความรู้และทักษะที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนและแคลเซียมด้วยกระบวนการโซโนเคมี

1.4.2 สามารถอธิบายผลกระทบของปริมาณสารเจือ ค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อใส่สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาที่ให้คลื่นเหนือเสียงต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือโบรอนและแคลเซียม

1.4.3 มีทักษะในการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สัณฐานวิทยา สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยหลักการฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์, เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวด้วยการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน, เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติการกระเจิงของแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง, เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง และเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องข้องกับการจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์วัสดุในระดับของอะตอม โมเลกุลหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่างๆ มีหน้าที่ใหม่ๆ และมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ, เคมี, และชีวภาพ ทำให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

คำว่า “นาโน (Nano)” เป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากคำในภาษากรีกว่า Nanos ซึ่งแปลว่า แคระหรือเล็ก เมื่อนำคำว่า “นาโน” มาใช้นำหน้าหน่วยวัดทางวิทยาศาสตร์หรือคณิตศาสตร์ หมายถึงขนาดเศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหน่วยวัด คำว่า “นาโนเมตร” มาจากคำมารวมกัน คือ “นาโน” กับ “เมตร” ดังนั้นคำว่านาโนเมตร หมายถึง หน่วยวัดที่มีขนาดเท่ากับ “เศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร” นั่นคือ หนึ่งนาโนเมตร (1 nm) = เศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร = 10^{-9} [12]

ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) บุคคลที่ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาของนาโนเทคโนโลยี ซึ่งเขาได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ระหว่างการบรรยายทางวิชาการเรื่อง "There's plenty of room at the bottom" ณ สมาคมฟิสิกส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กล่าวว่า "ที่ความเล็กระดับนาโนเมตร เราจะค้นพบแรงชนิดใหม่ๆ ปรากฏการณ์ใหม่ๆ และความเป็นไปได้รูปแบบใหม่ๆ" ทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความสำคัญของนาโนศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยีไม่ได้จำกัดอยู่เพียงแค่การที่เราสามารถสร้างสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเท่านั้น แต่รวมถึงการที่เราสามารถนำสมบัติใหม่ และปรากฏการณ์ใหม่ ที่เกิดขึ้นเฉพาะในระดับนาโนเท่านั้น มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุ, อุปกรณ์, และระบบที่มีขนาดในระดับนาโน มีสมบัติทางไฟฟ้า, สมบัติทางแม่เหล็ก, สมบัติเชิงแสง, สมบัติเชิงกล, และสมบัติเชิงเคมีแตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่าเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้ [13]

ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี

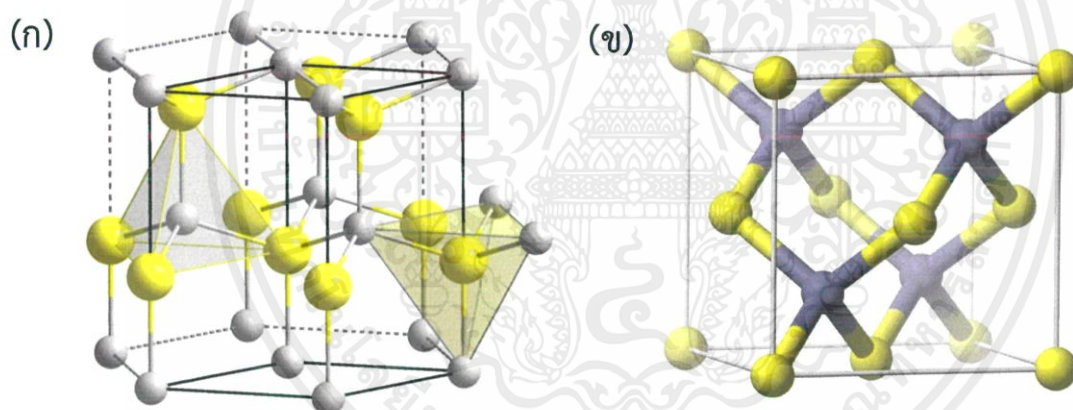
เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เพื่อการติดต่อสื่อสารของผู้คนทั้งโลกอย่างทั่วถึง, ทัดเทียม, และพอเพียง และการใช้นาโนเทคโนโลยีในการถนอมและผลิตภัณฑ์อาหาร ในด้านการแพทย์ใช้เทคโนโลยีในการประกอบและทำสำเนาตัวเองซ่อมแซมตัวเอง ตัวอย่างเช่น การสร้างอวัยวะเทียม สร้างหุ่นยนต์นาโนที่สามารถซ่อมแซมความบกพร่องของเซลล์เม็ดเลือดแดง คอยทำลายเซลล์แปลกปลอมต่างๆ เพื่อทำให้มนุษย์สุขภาพแข็งแรงและอายุยืนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติพื้นฐานของสารที่ใช้

2.2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เป็นออกไซด์ของโลหะ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ZnO สมบัติของซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง มีอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนสูง มีความเสถียรทางความร้อน, ทางเคมี, และทางฟิสิกส์ สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าที่ดีแต่ยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีสภาพการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 0.1×10^{-1} โอห์ม·เซนติเมตร แต่มีราคาต่ำ ซิงค์ออกไซด์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น เลเซอร์, เซนเซอร์ทางเคมี, เซนเซอร์ทางแสง, เซลล์แสงอาทิตย์, ไดโอดเปล่งแสง, และชั้นเคลือบกันการแสงสะท้อน ซิงค์ออกไซด์มีค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) $a = b = 3.24982 \text{ \AA}$ และ $c = 5.20661 \text{ \AA}$ ลักษณะโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ เฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ (Hexagonal wurtzite) และ ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ก) เฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ (ข) ซิงค์เบลนด์ [23]

ตารางที่ 2.2.1 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์

สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.408 กรัม/โมล
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีขาว
ความหนาแน่น	5.606 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1975 องศาเซลเซียส
ค่าแถบพลังงานต้องห้าม	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โบรอน (Boron; B)

โบรอนเป็นธาตุกึ่งโลหะ หมู่ IIIA มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ B พบมากในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน เป็นสารที่ละลายน้ำได้ยาก สารที่ทนทานต่อการกัดกร่อน พบเป็นสารประกอบออกไซด์และไฮไลด์ ตัวอย่างการนำโบรอนไปใช้งานเช่น ใช้ผสมในโลหะเจือที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงหรือใช้งานพิเศษ ใช้เป็นกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ใช้เป็นตัวดูดนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อควบคุม ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ใช้เป็นเส้นใยของโบรอนใช้ผสมกับโลหะทำให้โลหะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ใช้ผสมในเชื้อเพลิงขี้นจรวด เป็นต้น

ตารางที่ 2.2.2 สมบัติพื้นฐานของโบรอน

สมบัติ	
สัญลักษณ์ธาตุ	B
มวลอะตอม	10.811 กรัม/โมล
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีน้ำตาลดำ
ความหนาแน่น	2.34 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2076 องศาเซลเซียส
รัศมีอะตอม	0.88 อังสตรอม

2.2.3 แกลเลียม (Gallium; Ga)

แกลเลียมเป็นธาตุกึ่งโลหะ หมู่ IIIA มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Ga พบธาตุแกลเลียมในธรรมชาติ จากแร่บอไซด์และสังกะสี เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เป็นของแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ มีสีเงิน สภาพอ่อนนุ่ม ตัวอย่างการนำแกลเลียมใช้งานเช่น สารประกอบของแกลเลียมใช้เป็นกึ่งตัวนำ และการใช้งานเฉพาะบางอย่างในการวิเคราะห์ออกไซด์ของยูเรเนียม โดยวิธีสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy)

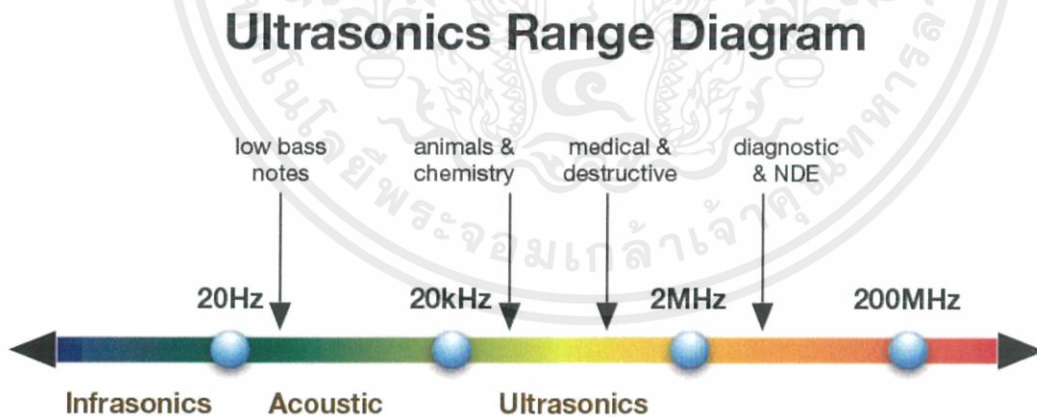
ตารางที่ 2.2.3 สมบัติพื้นฐานของแกลเลียม

สมบัติ	
สูตรโมเลกุล	Ga
มวลอะตอม	69.723 กรัม/โมล
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวสีเงินอ่อนนุ่ม
ความหนาแน่น	5.91 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	29.76 องศาเซลเซียส
รัศมีอะตอม	1.22 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คลื่นเหนือเสียงและเทคนิคการใช้คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic waves) หมายถึง พลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาที (20 กิโลเฮิร์ตซ์, kHz) หรือสูงกว่า (Hoover, 2000) หรือหมายถึง คลื่นความดันที่มีความถี่สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิร์ตซ์, kHz) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปหูของมนุษย์ได้ยินคลื่นเสียงความถี่สูงถึงประมาณ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนอัลตราโซนิก (Ultrasonics) หรือโซนิเคชันส์ (Sonications) หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียงหรือคลื่นเหนือเสียงในช่วงความถี่ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน คลื่นเหนือเสียงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ คลื่นเหนือเสียงกำลังต่ำและความถี่สูง (Low power and high frequencies) ซึ่งใช้ในด้านการวิเคราะห์ (Diagnostic ultrasound) และ การใช้คลื่นเหนือเสียงกำลังสูงและความถี่ต่ำ (High power and low frequencies) หรือที่เรียกว่า พาวเวอร์อัลตราซาวด์ (Power ultrasound) นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ ตัวอย่างเช่น แปรรูปอาหารทำให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกล และทางเคมี เนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตชัน (Cavitation) โดยใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทำทำความสะอาด การทำให้เซลล์แตก หรือการแยกโมเลกุล



ภาพที่ 2.2 การจำแนกช่วงความถี่ของคลื่นเสียงที่ความถี่ต่างกัน [24]

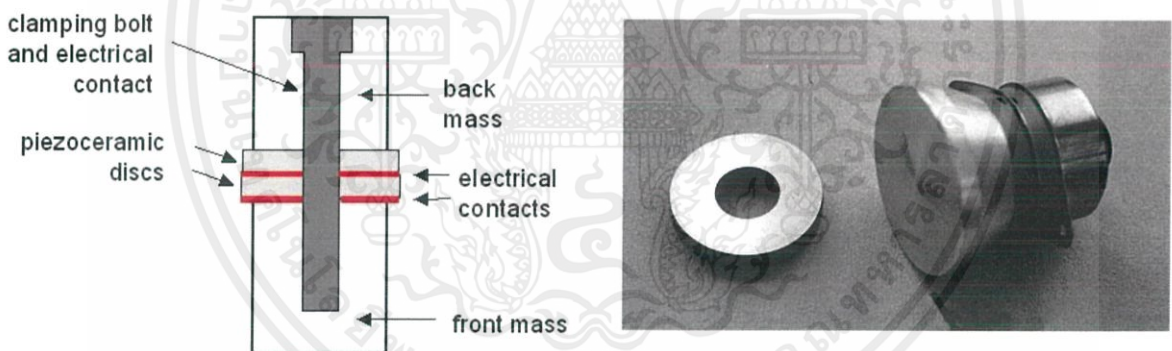
การสร้างคลื่นเหนือเสียง โดยทำให้เกิดคลื่นจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันของคลื่นเหนือเสียง อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจากทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง แบ่งทรานสดิวเซอร์ได้ 3 ประเภท

1. ลิควิดไดรฟ์เวทรานสดิวเซอร์ (Liquid driven transducer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive transducer)

3. เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric transducer) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่นิยมใช้ในการทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียงโดยการใช้เซรามิกส์ที่มีส่วนผสมของสารเพียโซอิเล็กทริก ตัวอย่างเช่น แบเรียมไทแทนเต (Barium Titanate) เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT ceramics) หรือ เลดเมตาไนโอเบต (Lead metaniobate) สารเพียโซเซรามิกใช้ในเครื่องอัลตราซาวด์เพื่อชะสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ให้หลุดออกเพื่อทำความสะอาด หรือใช้กับระบบโพรบ (Probe systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูตรงกลาง ทรานสดิวเซอร์เซรามิกส์นี้จะมีความเปราะและแตกหักง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง ช่วยป้องกันการแตกหักและช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นเพียโซเซรามิกสองชนิด (เรียกว่า Sandwich construction) เนื่องจากรับการสั่นสะเทือนเพิ่มกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ดังแสดงภาพที่ 2.3 โดยทรานสดิวเซอร์นี้มีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นเหนือเสียง (ใช้ในงานวิจัยนี้)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างภายในของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ และวัสดุที่ใช้จริง [25]

เทคนิคในการใช้คลื่นเหนือเสียงสำหรับการใช้ประโยชน์ต่างๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การทำให้เกิดการสั่นสะเทือนโดยตรง

ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหรือในการผสมต่างๆ ใช้่างอัลตราโซนิก

2. เทคนิคพัลสเอคโค (The pulse-echo ultrasound)

ใช้เพื่อตรวจสอบหาตำหนิของโลหะใช้อัลตราโซนิกฟลอตเทคเตอร์ ดังภาพที่ 2.4 หลักการคือให้ทรานสดิวเซอร์สัมผัสกับตัวอย่างจากนั้นปล่อยคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะไปยังตัวอย่าง ถ้าคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยเข้าไปภายในตัวอย่างไปกระทบความหนาแน่น หรือความยืดหยุ่นทำให้ค่าโลหะเปลี่ยนไปจากเดิม เพราะมีพลังงาน บางส่วนสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

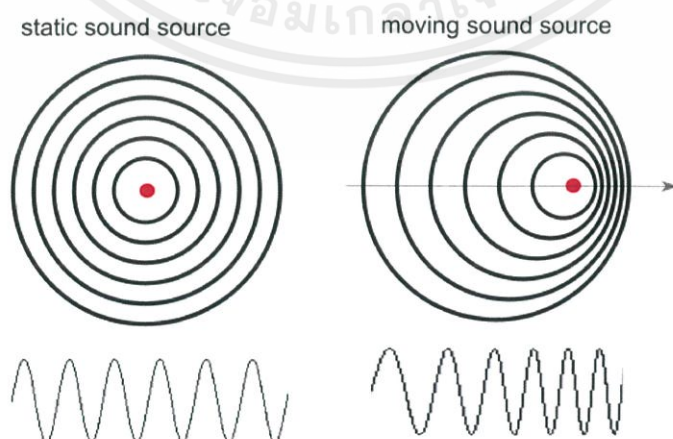
ซึ่งสัญญาณที่ส่งกลับมาจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นจะถูกขยายปรับแต่ง และแสดงภาพ โครงสร้างหรือลักษณะภายในออกมาให้เห็น เทคนิคนี้ใช้ในการควบคุมการไหลของของไหล การวัดความหนาของชั้นไขมัน, วัสดุต่างๆ และใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์



ภาพที่ 2.4 อัลตราโซนิกฟลัดดิเทคเตอร์ [26]

3. การใช้ผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (The Doppler effect)

เทคนิคนี้ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวและทิศทางการเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 2.5 หลักการคือ ใช้ความถี่ของคลื่นเหนือเสียงให้เกิดการสะท้อน ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (The echo) การสะท้อนจากสิ่งทีเคลื่อนที่ก็จะค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณที่ปล่อยออกมาเป็นจังหวะ เนื่องจากระยะทางไปยังจุดหมายเปลี่ยนแปลงไป ทรานสดิวเซอร์ ทำให้ความถี่ที่ตรวจวัดได้ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงกว่าความถี่ที่ส่งผ่าน เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น การตรวจอัลตราการไหลของโลหิต, การตรวจหัวใจและทารกในครรภ์ หรือ การคมนาคมทางน้ำ ตัวอย่างเช่น การหาฝูงปลา



ภาพที่ 2.5 หลักการเกิดปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic reactor)

เครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายชนิด แตกต่างที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่นโดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.4.1 อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic baths)

อ่างอัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมายาวนาน เนื่องจากราคาต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบ โดยทั่วไปทรานสดิวเซอร์จะติดอยู่บริเวณฐานด้านล่างของอ่างอัลตราโซนิก ความถี่ที่นิยมใช้ประมาณ 40 KHz พลังงานสูงสุดที่อ่างอัลตราโซนิกสร้างได้อยู่บริเวณระดับความสูงและความลึกค่าหนึ่ง เนื่องจากเกิดคลื่นจากการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกสร้างบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ถ้าระดับน้ำในอ่างลดต่ำคลื่นจะมีผลทำให้ไม่สามารถเกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้ ดังนั้นอ่างอัลตราโซนิกจึงมีอุปกรณ์เสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Thermostatically controlled heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (Frequency sweeps) ทำให้เกิดคาวิตีชันอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงานสวิตช์เปิดปิดแบบจังหวะหรือ นาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตราโซนิกทั่วไปให้พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากการเกิดคาวิตีชันที่เกิดบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนี้ของเหลวที่เติมในอ่างอัลตราโซนิกมักมีปริมาณมากทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง [14]



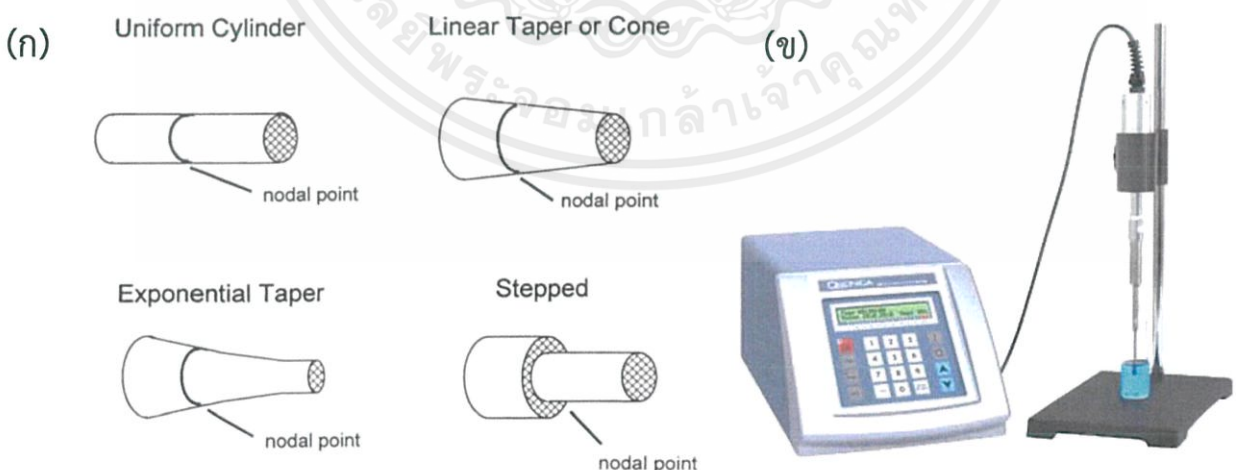
ภาพที่ 2.6 อ่างอัลตราโซนิก (ก) แบบทั่วไป [28] และ(ข) แบบคัพฮอร์น [29]

อ่างอัลตราโซนิกประเภทต่อมา เรียกว่า คัพฮอร์น (Cup horn) เป็นอ่างอัลตราโซนิกที่ให้พลังงานสูงมาก เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นเหนือเสียงติดอยู่กับทรานสดิวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับของเหลวและการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวมีความสำคัญอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ (Ultrasonic probe systems)

ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบเป็นระบบที่ทำให้คลื่นเสียงเกิดจากทรานสดิวเซอร์ โดยนำทรานสดิวเซอร์มาต่อเข้ากับ อุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (Horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 2.7(ก) ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบแสดงดังภาพที่ 2.7(ข) แอมพลิฟิเคชันที่สร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Uniform cylinder) แอมพลิฟิเคชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (Amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าตัดในฮอร์น ระหว่างสองพื้นที่คือ Driven face (D) และ Emitting face (d) สำหรับ ฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น Exponential หรือ Linear tapered จะมีอัตราส่วนเท่ากับ D/d และสำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็น Stepped (ใช้ในงานวิจัยนี้) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ $(D/d)^2$ ฮอร์นแบบนี้มีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่า ขนาดของพลังงานสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ส่วน คือคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตทรานสดิวเซอร์และ พื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น (Emitting surface) ส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตทรานสดิวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดและคืนตัวกลับได้ดี ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียม (Titanium) หรืออะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum alloy) วัสดุทั้งสองชนิดมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล แต่อะลูมิเนียมอัลลอยไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเพราะถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงควรใช้วัสดุพวกไทเทเนียมอัลลอย ในส่วนของพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ที่แอมพลิฟิเคชันสูงจะมีข้อจำกัด เนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาเคมีจะรบกวนการส่งถ่ายของพลังงานไปยังของเหลว [14]



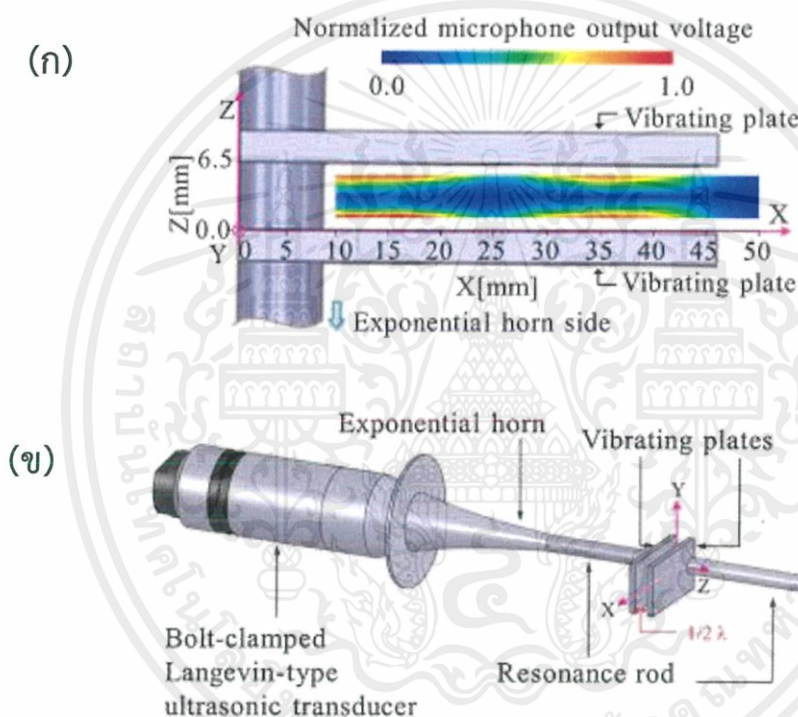
ภาพที่ 2.7 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ (ก) ลักษณะของฮอร์นแบบต่างๆ [14]

และ(ข) ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบโดยภาพรวม [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (Parallel vibrating plates)

ระบบแผ่นคู่ขนานเป็นระบบที่ใช้คลื่นเหนือเสียงในลักษณะต่อเนื่อง โดยสารจะได้รับคลื่นเหนือเสียงอย่างสม่ำเสมอในระหว่างที่เดินทางไปเครื่องอัลตราโซนิก ซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่บริเวณผนังด้านในตัวเครื่องดังภาพที่ 2.8(ก) เมื่อแผ่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้น ทำให้การลดทอนพลังงาน (Attenuation) ของคลื่นเสียง ดังนั้นภายในของเหลวมีค่าต่ำสุดและไม่เกิดคลื่น ระบบแผ่นสั่นคู่ขนานดังภาพที่ 2.8(ข) ที่ติดตั้งในแต่ละด้านของของเหลวให้มีผลดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบแผ่นสั่นแบบแผ่นเดียว คลื่นพลังงานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งหายไปยังของเหลวจะสะท้อนไปยังแผ่นที่สั่นอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดแรงกลมีค่าสูงสุด [14]



ภาพที่ 2.8 ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (ก) ลักษณะของการสั่นภายใน และ(ข) ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน [31]

2.4.4 ระบบการสั่นตามแนวรัศมี (Radial vibrating systems)

ระบบการสั่นตามแนวรัศมีเป็นระบบที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กับของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อเป็นการไขการสั่นของท่อ เพื่อทำให้เกิดคลื่นพลังงานขึ้น ทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น ใช้ได้กับสารความหนืดสูง ลักษณะการตัดขวางของท่อมีความสำคัญโดยท่อทรงกระบอกที่สั่นทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์สูงสุดบริเวณกึ่งกลางของท่อ ถ้าใช้ท่อลักษณะทรงแห่เหลี่ยมจะเกิดพลังงานน้อยกว่า ทำให้ช่วยลดปัญหาจากการ กัดกร่อนตรงกึ่งกลางท่อการนำทรานสดิวเซอร์มาเชื่อมติดกับท่อโลหะโดยตรงทำให้สามารถเกิดคลื่นในแนวรัศมีและเกิดบัพ (Nodes) และปฏิบัพ (Antinodes) เป็นช่วงระยะเท่ากับ $\lambda/2$ ตามความยาวของท่อ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน

วัสดุโครงสร้างนาโนมีขนาดของวัสดุมิติใดมิติหนึ่งอยู่ในหน่วยของนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) วัสดุที่มีขนาดในระดับนาโนถูกจัดให้มีโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (Low-dimensional systems, LDSs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีความแตกต่างกันออกไปจากวัสดุแบบก้อนใหญ่ (Bulk material) สามารถแบ่งวัสดุนาโนออกได้ 4 ประเภทดังภาพที่ 2.9 วัสดุนาโนศูนย์มิติ (Zero-dimension) วัสดุนาโนหนึ่งมิติ (One-dimension) วัสดุนาโนสองมิติ (Two-dimension) และ วัสดุนาโนสามมิติ (Three-dimensional) ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน [15]

2.5.1 วัสดุนาโนศูนย์มิติ (Zero-dimensional nanomaterials)

วัสดุนาโนศูนย์มิติ เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 แกน ตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticle) ควอนตัมดอท (Quantum dot) เป็นต้น

2.5.2 วัสดุนาโนหนึ่งมิติ (One-dimensional nanomaterials)

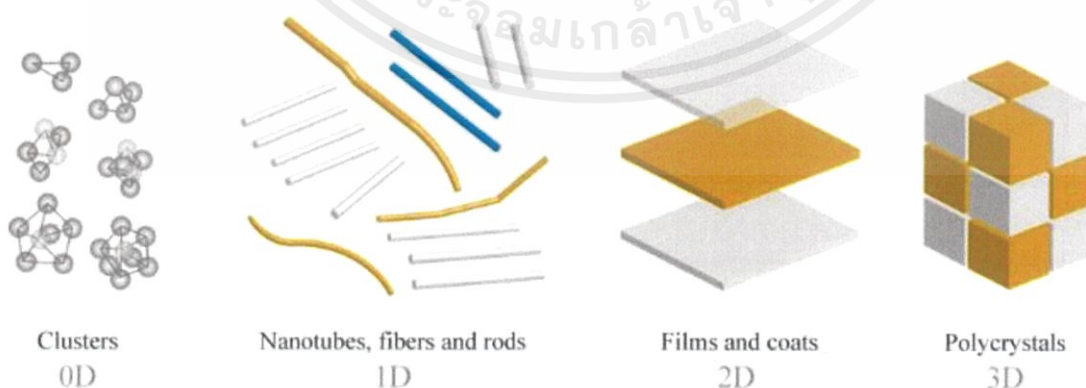
วัสดุนาโนหนึ่งมิติ เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงแค่ 1 ทิศทาง ตัวอย่างเช่น เส้นลวดนาโน (Nanowire) แท่งนาโน (Nanorod) เป็นต้น

2.5.3 วัสดุนาโนสองมิติ (Two-dimensional nanomaterials)

วัสดุนาโนสองมิติ เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ใน 2 ทิศทาง ตัวอย่างเช่น ฟิล์มบาง (Thin film) เป็นต้น

2.5.4 วัสดุนาโนสามมิติ (Three-dimensional nanomaterials)

วัสดุนาโนสามมิติ เป็นวัสดุขนาดใหญ่ที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง ตัวอย่างเช่น วัสดุพหุผลึก (Polycrystalline material) เป็นต้น



ภาพที่ 2.9 มิติของวัสดุนาโนแบบต่างๆ [32]

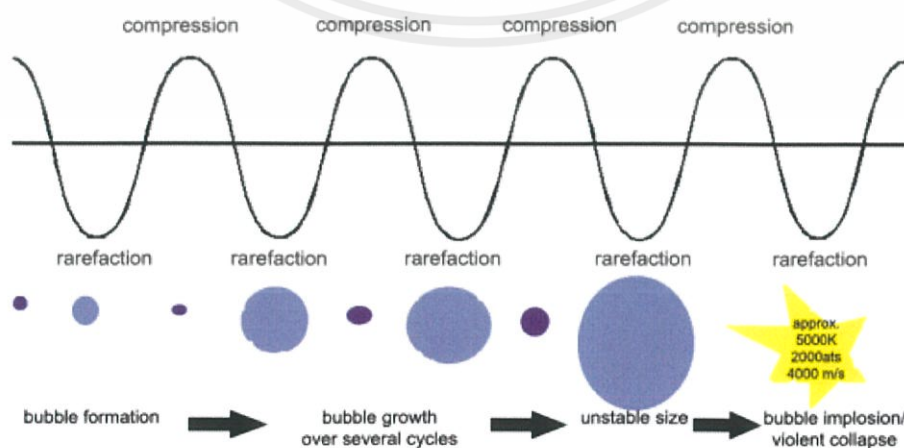
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์วัสดุนาโนศูนย์มิติ หรือในงานวิจัยนี้คืออนุภาคนาโน สามารถทำได้หลากหลายวิธีการ ตัวอย่างเช่น การบดแบบใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball-milling) [1] สเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) [16] กระบวนการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal process) [4] วิธีการโซลเจล (Sol-gel method) [17] และกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemical) [18] เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่จะสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยกระบวนการโซโนเคมี เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการสภาวะสุญญากาศ กระบวนการใช้ระยะเวลาสั้น เตรียมสารละลายไม่ซับซ้อน ไม่มีไอสารเคมีอันตราย เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีปริมาณไม่มาก

2.6 กระบวนการโซโนเคมี

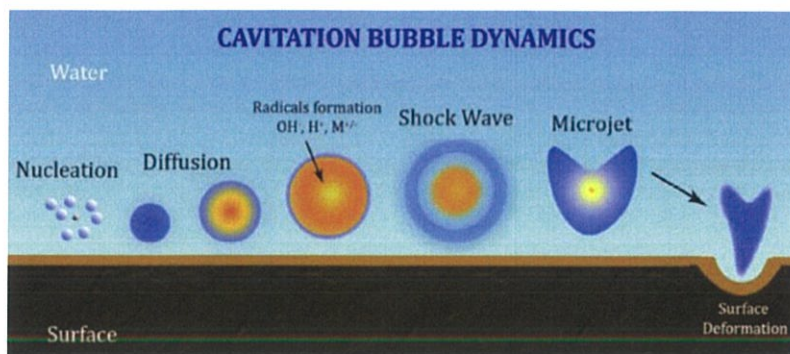
2.6.1 หลักการโซโนเคมีและปรากฏการณ์คาวิตีเทชัน

โซโนเคมีสตีเป็นวิธีการพื้นฐานในการสังเคราะห์วัสดุนาโน คำว่า โซโนเคมี (Sonochemical) มาจากการรวมของคำว่า โซโน (Sono) หมายถึงเสียง และเคมีสตี (Chemistry) หมายถึง วิชาเคมี กระบวนการโซโนเคมี คือ การนำพลังงานเสียงคลื่นเหนือเสียง (คลื่นเสียงพลังงานสูง) มาใช้งานทางเคมีร่วมกับปฏิกิริยาและกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างเช่น การผลิตไบโอดีเซล หรือผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการโซโนเคมีเพื่อจำกัดขนาดของวัสดุในอนุภาคนาโนและทำให้มีการกระจายตัวของสารเจืออย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างผลึก การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงภายในตัวกลางที่เป็นสารละลาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและกายภาพ จึงเกิดช่องว่างฟองอากาศเนื่องจากโครงสร้างของของเหลวได้รับคลื่นเหนือเสียงถูกบีบอัดและคลายตัวด้วยวัฏจักรของเสียงเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน ทำให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดคาวิตีเทชัน คือ ฟองอากาศจะแตกออกปลดปล่อยพลังงานสูงออกมา กลไกนี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์ เรียกว่า อคูสติคคาวิตีเทชัน (Acoustic cavitation process) ดังภาพที่ 2.10

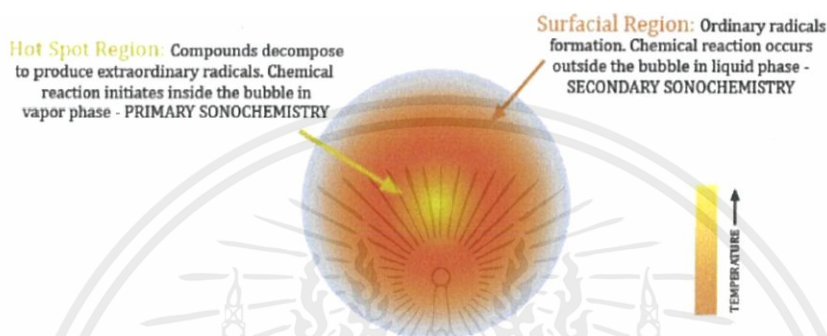


ภาพที่ 2.10 การให้คลื่นเสียงเป็นจังหวะทำให้ฟองอากาศถูกบีบอัด คลายตัว และแตกออก [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 กระบวนการคาวิตชันการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง [6]



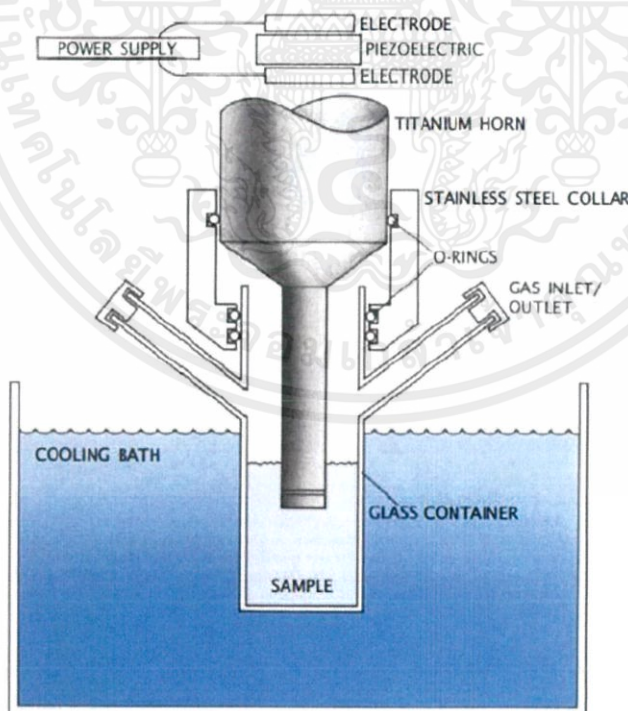
ภาพที่ 2.12 โดเมนที่แตกต่างกันภายในฟองอคูสติคคาวิตชัน [6]

คาวิตชัน (Cavitation) คือ การชนอย่างรุนแรงของฟองในของเหลวแตกออกปลดปล่อยพลังงานสูงในพื้นที่เล็ก คาวิตชันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ คาวิตชันแบบถาวร (Stable cavitation) เมื่อของเหลวได้รับคลื่นเหนือเสียงแต่ไม่เกิดการแตกออกของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศเกิดการสั่นแกว่ง ซึ่งขนาดของฟองอากาศอาจเพิ่มขนาดจนถึงขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นขนาดที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับความถี่ของการสั่นแบบบังคับ และในส่วนของคาวิตชันแบบชั่วคราว (Transient cavitation) เมื่อของเหลวได้รับคลื่นเหนือเสียง ของเหลวเกิดการบีบอัดเกิดเป็นฟองอากาศในของเหลวที่ได้รับความเครียด ขณะเริ่มเกิดการขยายตัวของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศแตกออกอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากฟองอากาศที่สั่นแกว่งและขยายขนาดเพิ่มขึ้นแบบคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะแตกออกอย่างรวดเร็ว เมื่อฟองอากาศขยายขนาดถึงขนาดที่จำเพาะ Pokhrel et al.(2015) รายงานว่าในสภาวะที่ฟองอากาศแตกปลดปล่อยแสงในช่วง 200-800 นาโนเมตร ทำให้เกิดปรากฏการณ์โซโนลูมิเนสเซนส์ (ของเหลวได้รับการกระตุ้นจากทรานสดิวเซอร์ในลักษณะของการสั่นที่มีความถี่สูง) สามารถวิเคราะห์ภายในฟองอากาศ และภายในฟองอากาศปลดปล่อยพลังงานความร้อนประมาณ 5000 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 1000 บรรยากาศ และเกิดไมโครเจ็ตที่ความเร็วประมาณ 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่แกนภายในฟองอากาศ (Hot spot) มีพลังงานจากการชนกันของอนุภาคที่สร้างพลังงานสูงสุด 13 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังภาพที่ 2.12 ฟองอากาศที่เกิดคาวิตชันเป็นฟองของสุญญากาศ โดยฟองสุญญากาศจะเกิดจากการที่พื้นผิวที่เคลื่อนที่เร็ว (Fast moving surface) ด้านหนึ่งสวนทางกับของเหลวเฉื่อยภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย (Inert liquid) ทำให้เกิดผลต่างความดันสูงและสามารถเอาชนะแรงดึงดูดภายในโมเลกุลของของเหลว ปฏิกิริยาการเกิดคาวิตีชันเกิดได้จากหัวฉีดความดันสูงโดยการหมุนอย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยคลื่นเหนือเสียง ในระบบที่กล่าวมาทั้งหมดนี้พลังงานที่ถูกใช้ (พลังงานอินพุท) จะเปลี่ยนเป็นความเสียหาย เกิดความปั่นป่วนของคลื่นและคาวิตีชันภายในสารละลาย พลังงานที่นำเข้ามาถูกเปลี่ยนเป็นคาวิตีชัน โดยจะขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย แต่ความถี่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานคาวิตีชัน เมื่อความถี่สูงจะทำให้เกิดผลต่างความดันสูง ดังนั้นจึงเกิดฟองสุญญากาศมากขึ้นแทนที่จะเกิดการเคลื่อนที่ผ่านของเหลวของคลื่นเหนือเสียง ดังนั้นความถี่สูงส่งผลให้สัดส่วนของพลังงานที่ถูกเปลี่ยนเป็นคาวิตีชันสูง [6-8]

ในเครื่องโซโนเคมีเมื่อตัวให้กระแสไฟฟ้า (Power supply) ให้กระแสกับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) จะเกิดการเหนี่ยวนำกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เกิดการสั่นสะเทือนลักษณะขึ้นลง ทำให้เกิดคลื่นการสั่นสะเทือนของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก คล้ายการเคลื่อนที่ของลูกสูบ คลื่นจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันเป็นลำขนาดเท่ากับขนาดของวัสดุ แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ต่อไประยะหนึ่ง พบว่าการเคลื่อนที่ขึ้นลงของเพียโซอิเล็กทริกแบบลูกสูบ (Piston movement) อ่อนกำลัง คลื่นเริ่มแตกกระจายตัวออกจากกัน ลงสู่ภาชนะบรรจุสารละลายที่ต้องการสังเคราะห์ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ระบบการโซโนเคมี และส่วนประกอบต่างๆของเครื่องโซโนเคมี [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ผลของกระบวนการโซโนเคมี

ผลของกระบวนการโซโนเคมีจากการสังเคราะห์และปฏิกิริยาทางเคมี (เมื่อใช้คลื่นเหนือเสียง)

1. การเพิ่มความเร็วยของปฏิกิริยา
2. การเพิ่มของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยา
3. การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
4. การสวิตซ์ของเส้นทางปฏิกิริยา
5. การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา
6. การหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
7. สารที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไม่ผ่านกระบวนการใด
8. การเกิดการกระตุ้นของโลหะและของแข็ง
9. เพิ่มความเร็วของปฏิกิริยาหรือตัวเร่งปฏิกิริยา
10. ปรับปรุงวิธีสังเคราะห์อนุภาค, ฉาบอนุภาคนาโน

2.7 ทฤษฎีการเติมสารเจือ

การเจือ คือ การเติมอะตอมของสารลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ที่มีผลกระทบกับวัสดุระดับใหญ่ การจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึกไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดสมบัติที่เปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น, แย่ลงหรือเกิดสมบัติใหม่ เรียกว่า การเกิดความบกพร่อง (Defects) งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์วัสดุนาโน ศูนย์มิติ ดังนั้นการเกิดความบกพร่องในผลึก หรือการเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของสารเจือ เป็นแบบศูนย์มิติ (0D, Point defects) มีลักษณะดังนี้

2.7.1 การเจือแบบการเข้าแทนที่ช่องว่าง (Vacancy)

การเจือแบบการแทนที่ช่องว่าง คือ การที่อะตอมของสารเจือเข้าไปแทนที่ในช่องว่างของอะตอมในโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ ดังภาพที่ 2.14(ก)

2.7.2 การเจือแบบการแทรกตัว (Interstitial)

การเจือแบบการแทรกตัว คือ อะตอมของสารเจือมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของสารกึ่งตัวนำ ดังภาพที่ 2.14(ข)

2.7.3 การเจือแบบการเข้าแทนที่ (Substitute)

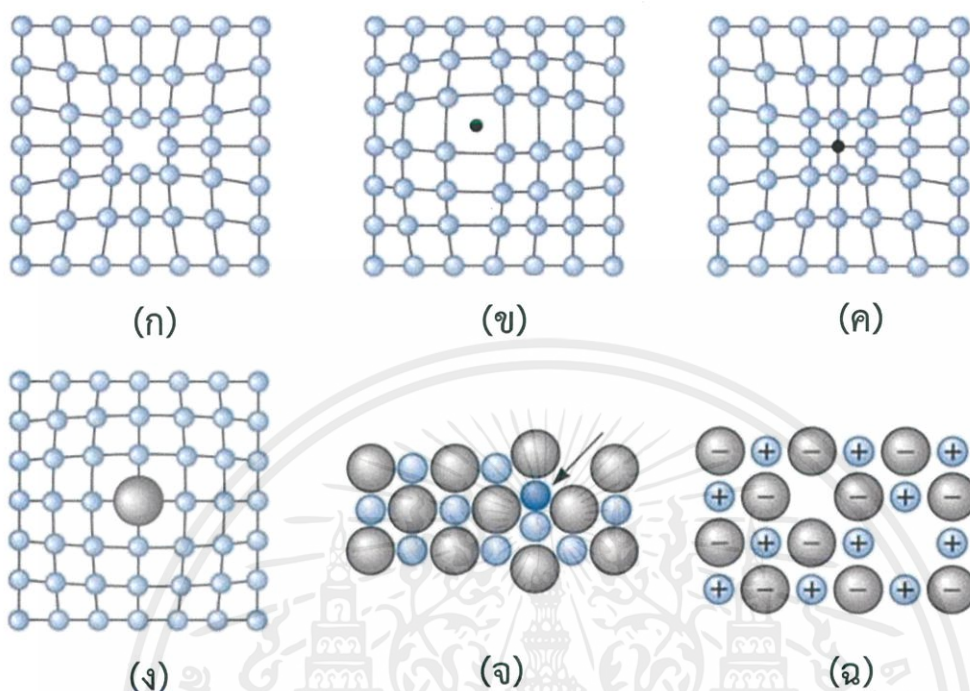
การเจือแบบแทนที่ คือ อะตอมของสารเจือจะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุเดิมในโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยอะตอมที่เกิดการแทนที่มักจะมีรัศมีอะตอมต่างกันไม่เกิน 14 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2.14(ค) เป็นการเจือสารแบบอะตอมเล็กทำให้ผลึกของสารมีขนาดเล็กลง และดังภาพที่ 2.14(ง) เป็นการเจือสารแบบอะตอมใหญ่ทำให้ผลึกของสารมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.7.4 การเจือสารในวัสดุไอออนิก

การเจือสารในวัสดุไอออนิกแบ่งได้ 2 ประเภท คือการเจือสารแบบเฟรนเกลดังภาพที่ 2.14(จ) และการเจือสารแบบชอตกิตดังภาพที่ 2.14(ฉ) การเจือแบบเฟรนเกลคือการที่ไอออนย้ายออกจากตำแหน่งเดิมไปแทรกตำแหน่งอื่นในโครงสร้าง แต่รักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเจือแบบช็อคก็คือการที่ไอออนหายไปจากโครงสร้างเป็นคู่ (ไอออน+,-) เพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า



ภาพที่ 2.14 การเจือสาร (ก) การเจือแบบการเข้าแทนที่ช่องว่าง
(ข) การเจือแบบการแทรกตัว
(ค) การเจือแบบอะตอมเล็กเข้าแทนที่
(ง) การเจือแบบอะตอมใหญ่เข้าแทนที่
(จ) การเจือสารแบบแฟรงเคิล
(ฉ) การเจือสารแบบช็อคกี้ [34]

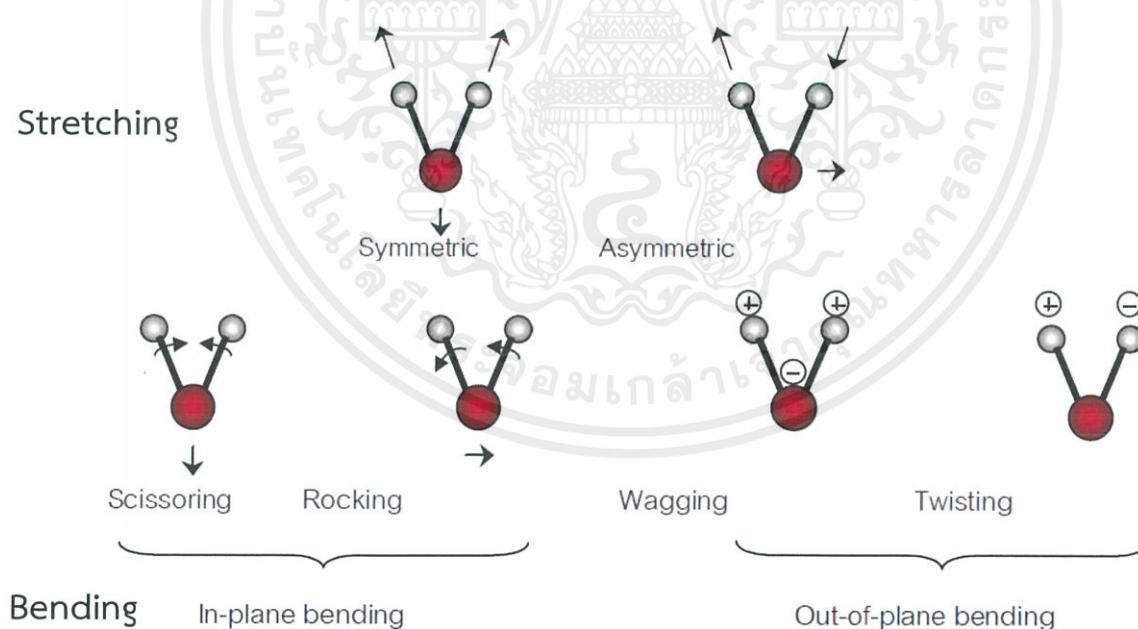
ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติโดยธรรมชาติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เนื่องจากมีความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการขาดออกซิเจนที่ตำแหน่งที่ควรมี เรียกว่า ออกซิเจนวาแคนซี (oxygen vacancies) และอะตอมของซิงค์อยู่ผิดตำแหน่ง (interstitial) ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ แต่สมบัติทางไฟฟ้าไม่เสถียรเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากออกซิเจนแพร่เข้าไปแทนที่ว่างจนทำให้ไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติทางไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพในงานวิจัยนี้จึงได้เจือธาตุบางชนิดลงไปในโครงร่างผลึกของซิงค์ออกไซด์ เพื่อเพิ่มพาหะการนำไฟฟ้า โดยธาตุที่นิยมใช้เจือลงไป ได้แก่ โบรอน(B) อะลูมิเนียม(Al) แกลเลียม(Ga) และอินเดียม(In) โดยธาตุดังกล่าวจะเข้าไปในผลึกของซิงค์ออกไซด์ เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในการนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานค่าต่ำที่สุดประมาณ 2×10^{-4} โอห์ม•เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง

2.8.1 เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยหลักการฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR)

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในย่านความถี่ของแสงช่วงอินฟราเรด (Infrared light) สามารถวิเคราะห์วัสดุหรือสารที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยไม่ทำลายตัวอย่างใช้ตรวจสอบได้ทั้งสถานะของแข็ง, ของเหลว, และแก๊ส การดูดกลืนแสงในย่านความถี่ของแสงช่วงอินฟราเรด ทำให้เกิดการกระตุ้น แต่เพราะแสงอินฟราเรดมีพลังงานต่ำ เมื่อโมเลกุลดูดกลืนแสงทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะเกิดการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล โดยพันธะแต่ละสารจะดูดกลืนแสงที่มีความถี่เฉพาะค่าแตกต่างกัน เรียกว่า Quantized energy โดยผลของการดูดกลืนพลังงานเฉพาะทำให้ทราบว่าเป็นการดูดกลืนของแสงที่เกิดจากพันธะใด การเคลื่อนไหวของพันธะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ภายในโมเลกุล (Dipole moment) ลักษณะการสั่นในโมเลกุลของสารมีสองแบบคือ การสั่นแบบยืด (Stretching) และการสั่นแบบงอ (Bending) ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ลักษณะการสั่นในโมเลกุลการสั่นแบบยืด และการสั่นแบบงอ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

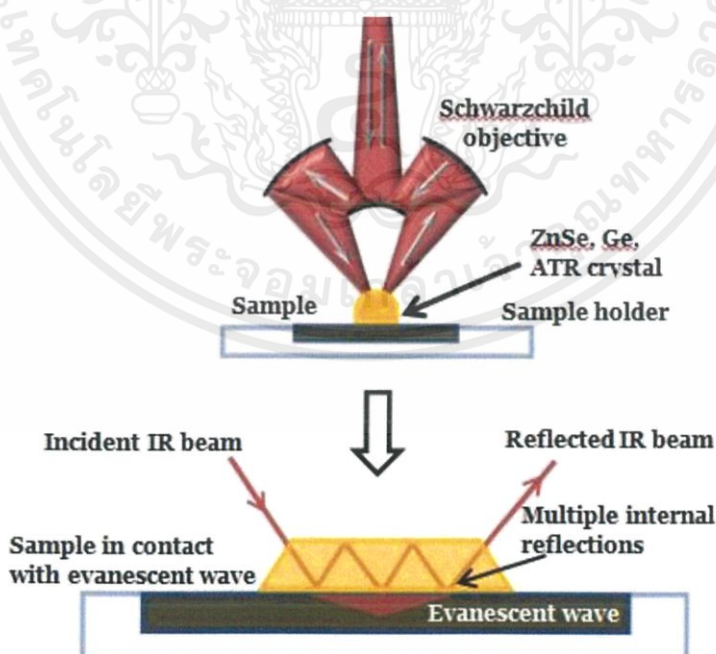
รังอินฟราเรดจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. อินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared region wavenumber; NIR) $12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$
2. อินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared region wavenumber; MIR) $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของของโมเลกุล เป็นบริเวณหมู่ฟังก์ชัน (Functional group region) เช่น -OH, C=O, N-H, CH เป็นต้น FTIR ใช้ความยาวคลื่นย่านนี้
3. อินฟราเรดย่านไกล (Far infrared region wavenumber; FIR) $400 - 5 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมช่วงที่เรียกว่า ช่วงลายพิมพ์นิ้วมือของสาร (Fingerprint region) ใช้ในการเปรียบเทียบสาร

หลักการการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์โหมด Attenuated total reflection (ATR)

โดยการฉายคลื่นแสงอินฟราเรดให้ตกกระทบตัวอย่างซึ่งวางอยู่บน window cell (สารจำพวกผลึก เช่น Ge, ZnSe หรือเพชร) ต้องให้มุมที่แสงตกกระทบมีค่าน้อยกว่า 90° องศา ทำให้แสงส่วนหนึ่งเดินทางทะลุเข้าไปในตัวอย่าง และแสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนที่ผิวจะสะท้อนออกมา (reflected beam) เพื่อเข้าสู่ดีเทคเตอร์ การสะท้อนเกิดขึ้นได้ด้วยเงื่อนไข 2 ประการ

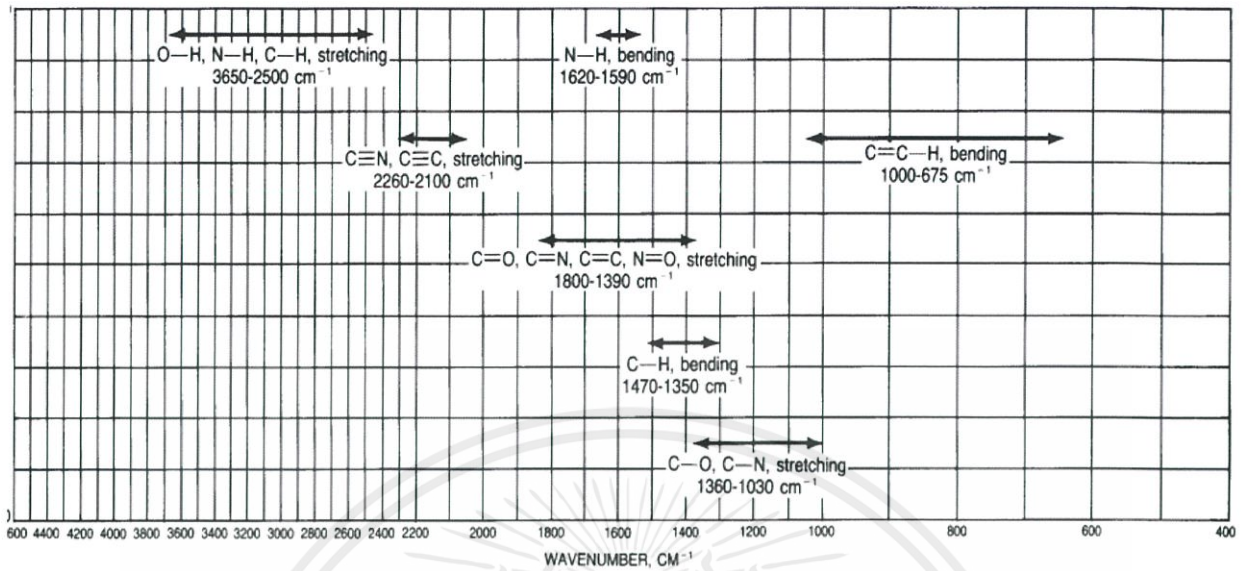
1. มุมที่แสงตกกระทบจะต้องมากกว่ามุมวิกฤต ($\theta > \theta_c$)
 2. ดัชนีหักเหของตัวอย่างต้องมากกว่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำ window cell ($n_1 > n_2$)
- โดยเทคนิคนี้ทำการวัดความเข้มแสงจากการสะท้อนหลายๆครั้ง [20] ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 หลักการของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์โหมด

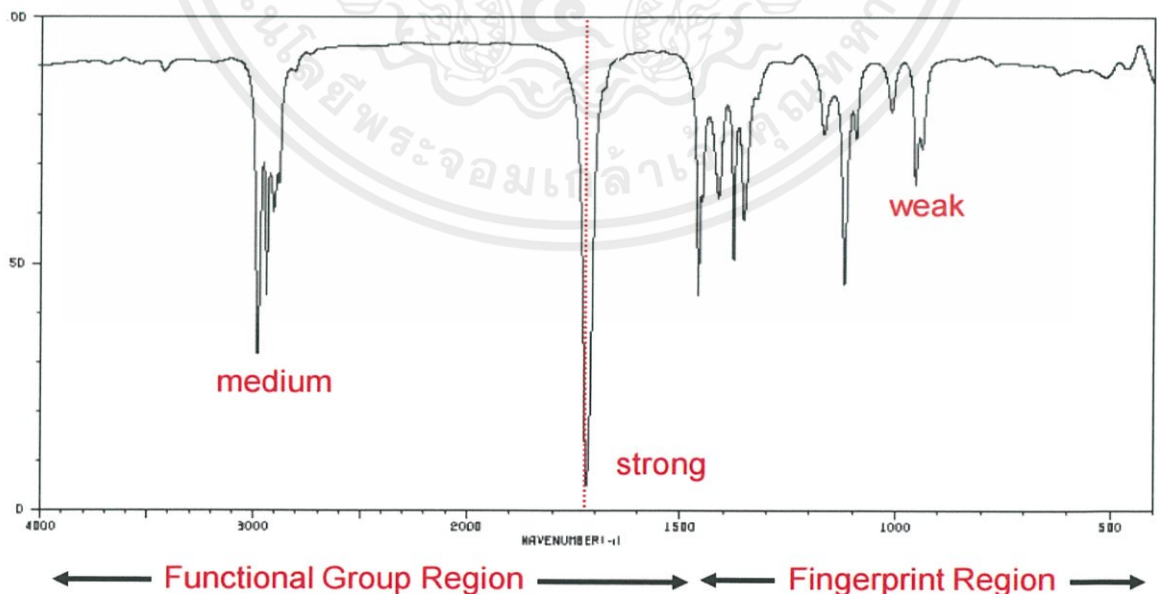
Attenuated total reflection (ATR) [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 แสดงหมู่ฟังก์ชันสามัญที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [37]

ฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรเมทรีเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ภายในระยะเวลาอันสั้นสเปกตรัมของฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แสดงแกน y เป็นค่าปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืน (% Absorbance) หรือการส่องผ่าน (% Transmittance) และแกน x เป็นค่าเลขคลื่นกราฟ ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัม [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

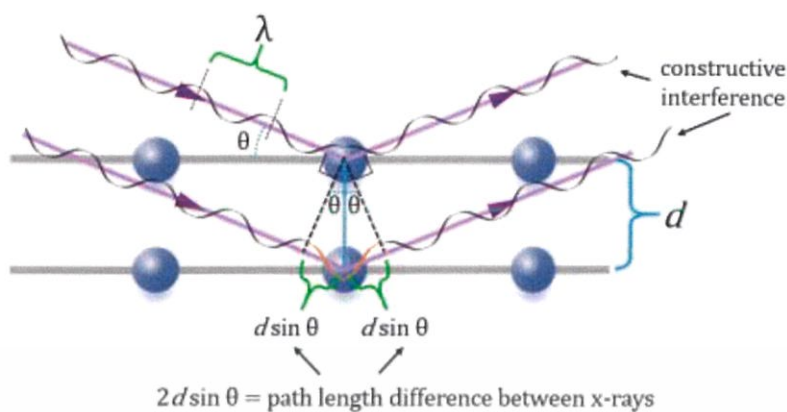
เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารและเป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่เป็นการทำลายสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบผิวหน้าสารตัวอย่างที่มุมต่างกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS) เพื่อระบุระนาบของผลึก องค์ประกอบและวิภาคของตัวอย่าง หลักการและวิธีการวิเคราะห์ คือ วัสดุที่เป็นผลึกมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ในลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน แต่ละระนาบอยู่ห่างกันเป็นระยะ d โดยระยะห่าง d แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของผลึกสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวและขนาดของผลึกที่แตกต่างกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายหลังจากการตกกระทบจึงเป็นลักษณะเฉพาะของผลึกของสาร เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในของผลึก โดยทำมุมตกกระทบ θ บางส่วนของรังสีเอกซ์เกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน อีกส่วนจะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม รังสีเอกซ์ที่ผ่านไป ในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนในผลึก ผลต่างจากเดินของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนผ่านอะตอมที่ผิวหน้าและ อะตอมในชั้นที่ 2 ของผลึก คือ $2d \sin \theta$ และการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างทางเดินของรังสีจะต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ค่าคงที่ของผลึกคำนวณโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) และสูตรระยะห่างระหว่างกันสำหรับระบบเฮกซะโกนอล ดังภาพที่ 2.19

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

$$d = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2) + l^2 \frac{a^2}{c^2}}} \quad (2.2)$$

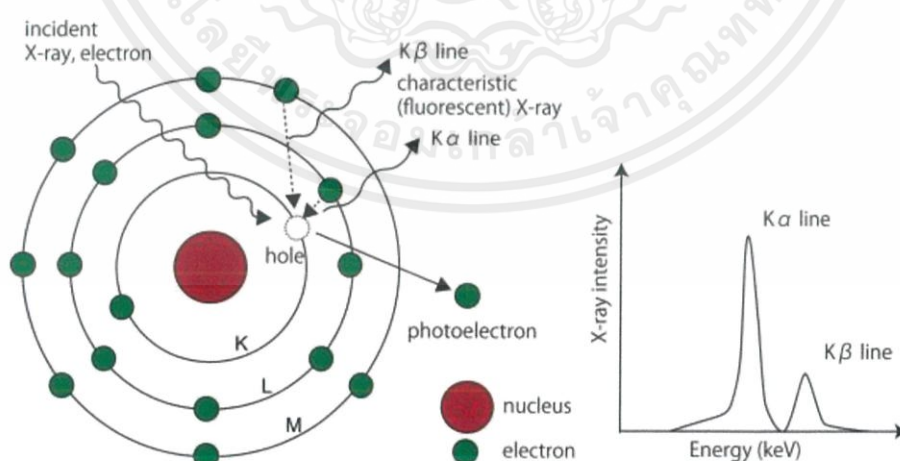
โดยที่	d	คือ ระยะห่างระหว่างกัน
	n	คือ จำนวนเต็ม
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	hkl	คือ ดัชนีมิลเลอร์ของ crystal face
	a	คือ ค่าคงที่ผลึกแนวนอน ดังภาพที่ 2.21
	c	คือ ค่าคงที่ผลึกแนวตั้ง ดังภาพที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.19 กฎของแบรกก์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในระนาบผลึก [39]

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ภายในถูกสร้างภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังภาพที่ 2.20 โดยการเกิดรังสีเอกซ์ เกิดโดยการให้กระแสไฟฟ้ากับเส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทด เข้าชนขั้วแอโนดที่ทำจากโลหะ อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชน ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมของโลหะ (K-shell) ของโลหะหลุดออก จึงเกิดเป็นช่องว่าง ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดมา (L และ M-Shell) เกิดการคายพลังงานและลดระดับลง เปลี่ยนระดับพลังงานมาแทนที่ช่องว่างนั้น คายรังสีเอกซ์เพื่อลดระดับพลังงานลง



ภาพที่ 2.20 การเกิดรังสีเอกซ์ [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาขนาดของผลึกได้จากสมการของ Scherrer's formula ดังสมการที่ 2.3

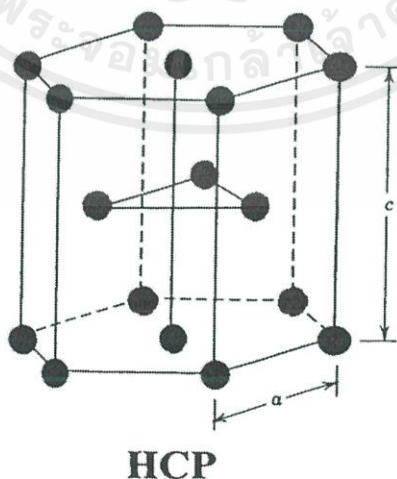
$$D = \frac{K\lambda}{B \cos \theta} \quad (2.3)$$

โดยที่	D	คือ	ขนาดของเม็ดผลึก
	θ	คือ	มุมของการเลี้ยวเบน
	B	คือ	ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at Half-Maximum of diffraction peak: FWHM)
	λ	คือ	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

การคำนวณหาค่าการบิดเบี้ยวของผลึก ดังสมการที่ 2.4

$$R = \frac{2a \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}}}{c} \quad (2.4)$$

โดยที่	R	คือ	ค่าการบิดเบี้ยวของผลึก
	a	คือ	ค่าคงที่ผลึกแนวนอน ดังภาพที่ 2.21
	c	คือ	ค่าคงที่ผลึกแนวตั้ง ดังภาพที่ 2.21



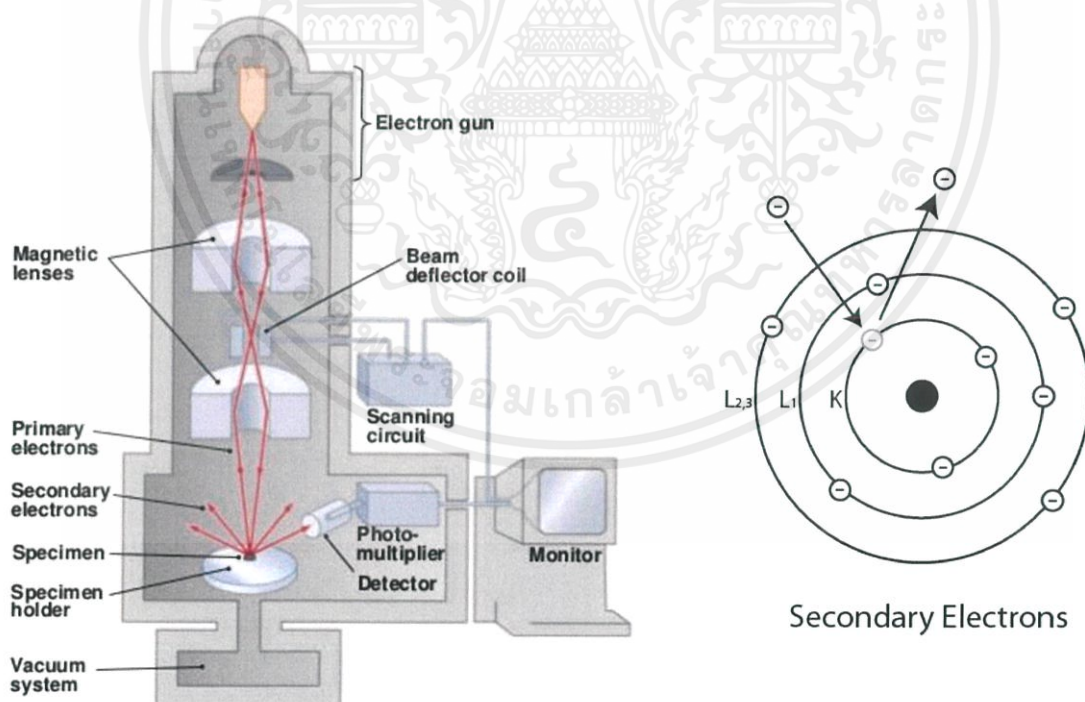
ภาพที่ 2.21 ระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง หลักการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาพที่ 2.22(ก) โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด (Electron gun) ที่ขั้วแคโทด จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า กลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนในระบบเลนส์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิดคือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) เลนส์คอนเดนเซอร์ทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง จากนั้นจะโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้กราดลงที่บนผิวของตัวอย่างโดยเลนส์วัตถุ ที่พื้นผิวของตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกกระทบจะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิวของวัตถุ ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนที่กระทบกับตัวอย่างคือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) เกิดการสะท้อนออกมานั้น คือ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ดังภาพที่ 2.22(ข) จะถูกตรวจจับด้วยตัวตรวจจับอิเล็กตรอนสัญญาณไฟฟ้าถูกแปรไปเป็นภาพบนจอ CRT มีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ



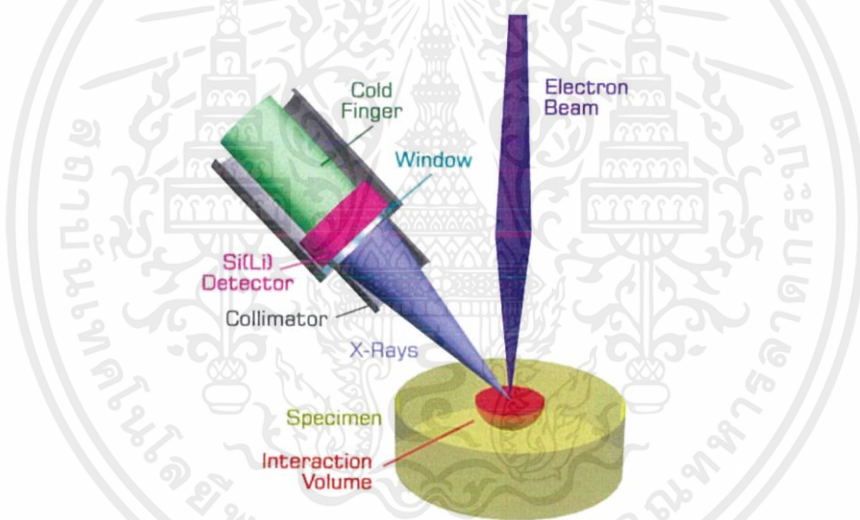
ภาพที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ส่วนประกอบ [42]

และ(ข) การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [43]

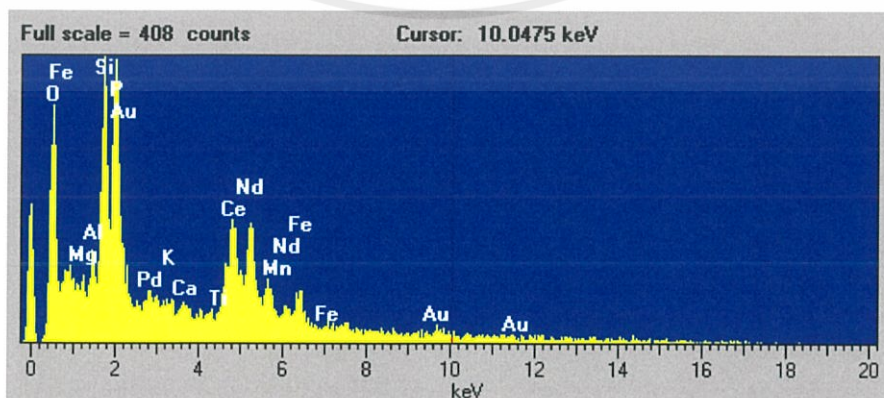
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy : EDX)

การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน เป็นเทคนิควิเคราะห์ทางเคมี วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยเครื่องนี้จะทำงานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างในขณะที่อิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่าง อิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนจะไปปลั๊กอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของสารตัวอย่าง จึงเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอนนั้นจะถูกแทนที่ด้วยอิเล็กตรอนจากชั้นระดับพลังงานที่สูงกว่า จะเกิดรังสีเอกซ์ปลดปล่อยออกมาเพื่อรักษาสภาพสมดุลของพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนทั้ง 2 ชั้น รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมานี้จะสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ได้ว่าเป็นของธาตุใดที่ปลดปล่อยออกมา และเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ของธาตุเพื่อบอกปริมาณของตัวอย่างนั้นๆ ธาตุแต่ละธาตุมีอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นไม่เท่ากัน ทำให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนแตกต่างกัน โดยนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน



ภาพที่ 2.23 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงพลังงาน [44]



ภาพที่ 2.24 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.5 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง (UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy)

สำหรับการวิเคราะห์การสะท้อนของแสงที่เกิดการกระเจิงหลายทิศทางเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้เพื่อแยกการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง โดยเครื่องมือนี้จะสะท้อนแสงที่ไม่เป็นสัดส่วนของความเข้มข้นของตัวดูดซับที่ให้เข้าไป สารแต่ละชนิดจะสามารถสะท้อนรังสีได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยวิธีการวิเคราะห์นี้นิยมใช้กับตัวอย่างผง เนื่องจากความเข้มของการสะท้อนแสงที่กระจายอย่างอิสระจากมุมหักเหของแสง ผลที่ได้คือการสะท้อนหลายครั้งการหักเหและการกระเจิงภายในตัวอย่าง เป็นการกระเจิงแสงแบบสุ่มในผลตัวอย่างเนื่องจากแสงจะกระจายอย่างฉับพลัน

ค่าคงที่ในการสะท้อน คือ

K = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (ฟังก์ชันของความถี่)

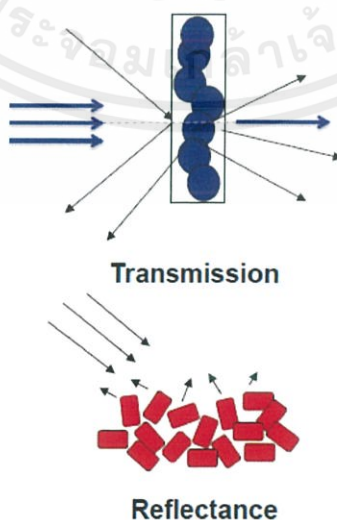
S = สัมประสิทธิ์การกระเจิง (เป็นอิสระจากความถี่ แต่ S เพิ่มขึ้นด้วยพลังงานในกรณีของผงละเอียด)

การคำนวณสเปกตรัมของ Diffuse Reflectance

โดยใช้แบบจำลอง Schuster-Kubelka-Munk (SKM) ช่วยให้ได้ปริมาณสเปกตรัมการดูดกลืนของของแข็งจากการวัดการสะท้อนแสงแบบกระจาย การสะท้อนแสงกระจายของชั้นที่มีความหนาไม่จำกัด (R_∞) เชื่อมโยงกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง K และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง S โดยใช้ Schuster-Kubelka-Munk โดยฟังก์ชัน Kubelka-Munk เปลี่ยนสเปกตรัมที่วัดได้ $R(\nu)$ ลงในสเปกตรัมการดูดซับ $K(\nu)$ ดังสมการ 2.5

สมการความสัมพันธ์ของ Kubelka-Munk

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{K}{S} \quad (2.5)$$

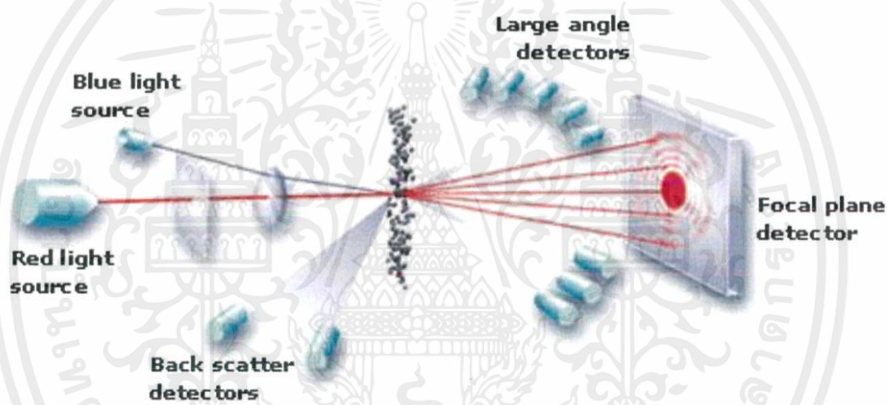


ภาพที่ 2.25 การเดินทางของแสงผ่านสารตัวอย่าง [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.6 เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique)

การตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง โดยเมื่อแสงเดินทางผ่านอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของไหลการเคลื่อนที่แบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอแบบบราวน์ (Brownian motion) ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสง ดังนั้นเมื่อลำแสงส่องผ่านไปยังอนุภาคจะถูกกระเจิงโดยอนุภาค เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นมีเฟสที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งเกิดจากตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเวลา โดยแสงที่เลี้ยวเบนจากอนุภาคจะมีรูปแบบเฉพาะสามารถคำนวณได้จากความหนืดของเหลวตัวกลาง อุณหภูมิ และความถี่ของคลื่นแสง ทำให้ทราบขนาดของอนุภาค จากนั้นจะเกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) เทคนิคดีแอลเอสอาศัยการวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชิงแสง โดยใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (coherent light source)



ภาพที่ 2.26 แบบจำลองการจัดเรียงเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงแบบลำแสงคู่ [46]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

1. เลเซอร์แสงเดี่ยว (monochromatic laser) ทำหน้าที่ให้แสงที่โพลาไรซ์กับสนามไฟฟ้า ซึ่งตั้งฉากกับรังสีจากแหล่งกำเนิดแสง และรังสีที่ตรวจวัดได้ เลเซอร์ที่ใช้ ได้แก่ ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ อาร์กอนเลเซอร์ ไดโอดเปล่งโซลิตเซตทเลเซอร์ โซลิตเซตทเลเซอร์ และไดโอดเลเซอร์
2. องค์ประกอบเชิงแสง (optics) เลนส์และอุปกรณ์รวมแสงจากแหล่งกำเนิดเพื่อส่งไปยังปริมาตรการกระเจิงของแสง และตัวตรวจวัดแสงกระเจิง นิยมใช้เส้นใยนำแสงในระบบตรวจวัด และนำส่งแสง
3. ช่องใส่ตัวอย่าง (test sample holder) ต้องสามารถวัดและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ภายใน $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
4. ตัวจับโฟตอน (photon detector) เพื่อการตรวจจับโฟตอนซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มของแสงกระเจิง
5. หน่วยประมวลผล ความเข้มแสงที่สัมพันธ์กับเวลา แล้วแสดงผล
6. คอมพิวเตอร์ ประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค

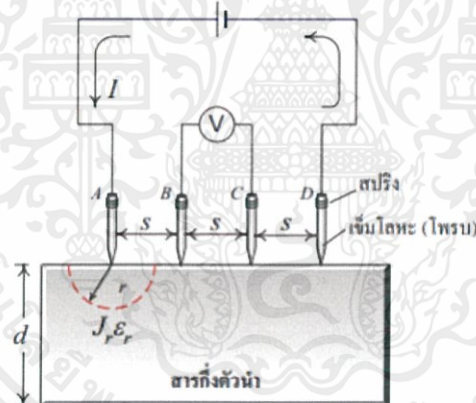
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วย เข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method)

การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่เป็น สารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุ และใช้เข็มวัดแทนการสร้างรอยสัมผัสอโห์มมิก (ohmic contact) โครงสร้างของเข็มวัดสี่จุด ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า เรียงกัน 4 ขั้ว ซึ่งโดยปกติมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 1 มิลลิเมตร ขั้วของเข็มวัดทำมาจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ หลักการทำงานโดยการป้อนกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าคู่นอก (A,D) กระแสจะไหลจากเข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม จึงทำการวัดค่ากระแส และค่าแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าคู่ใน (B,C) ที่วัดได้จะนำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งมาจากบนผิวสารกึ่งตัวนำที่มีขอบเขตแบบกึ่งไม่จำกัด (semi-infinite boundary)

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด ได้แก่

1. แหล่งจ่ายกระแสโดยต่อกับเข็มคู่นอก โดยกระแสมากที่สุดขึ้นอยู่กับสมการ $V=IR$
2. มัลติมิเตอร์มีหน้าที่วัดค่า V โดยจะต่อเครื่องนี้เข้ากับเข็มคู่ในของตัวเข็มวัด 4 จุด
3. เข็มวัด 4 จุด ที่มีแรงกดสปริง 45 กรัม



ภาพที่ 2.27 แบบจำลองเครื่องวัดสภาพการต้านทานของไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด [47]

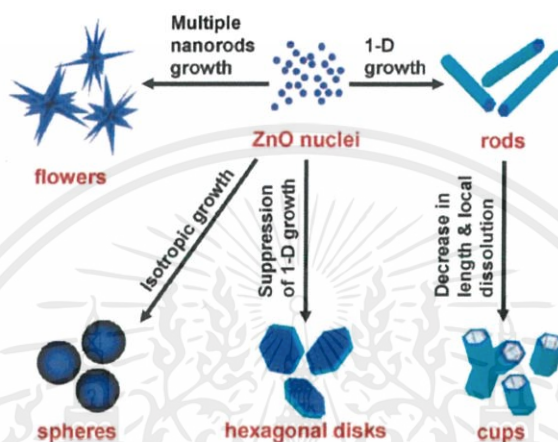
การคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = 2 \Pi s \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

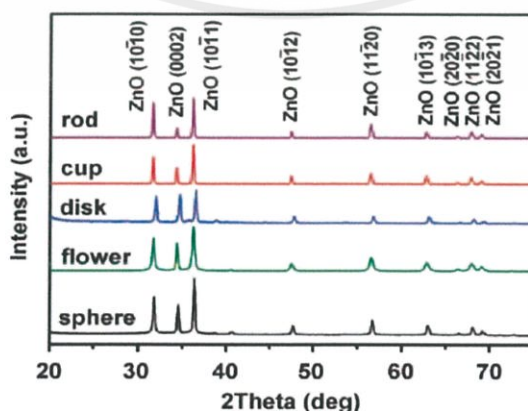
2.9 ทบทวนวรรณกรรม

ในปี ค.ศ. 2008 Seung-Ho Jung และคณะ [19] ได้ศึกษาการสังเคราะห์รูปร่างของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซโนเคมี พบว่ากระบวนการโซโนเคมีสามารถควบคุมโครงสร้างผลึกและเจาะจงทิศทางการเกิดของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยรูปร่างต่างชนิดกัน คือแท่งนาโน, ถ้วยนาโน, แผ่นนาโน, ดอกไม้นาโน, และทรงกลมนาโน



ภาพที่ 2.28 แผนผังการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์รูปร่างต่างๆ โดยวิธีการโซโนเคมี

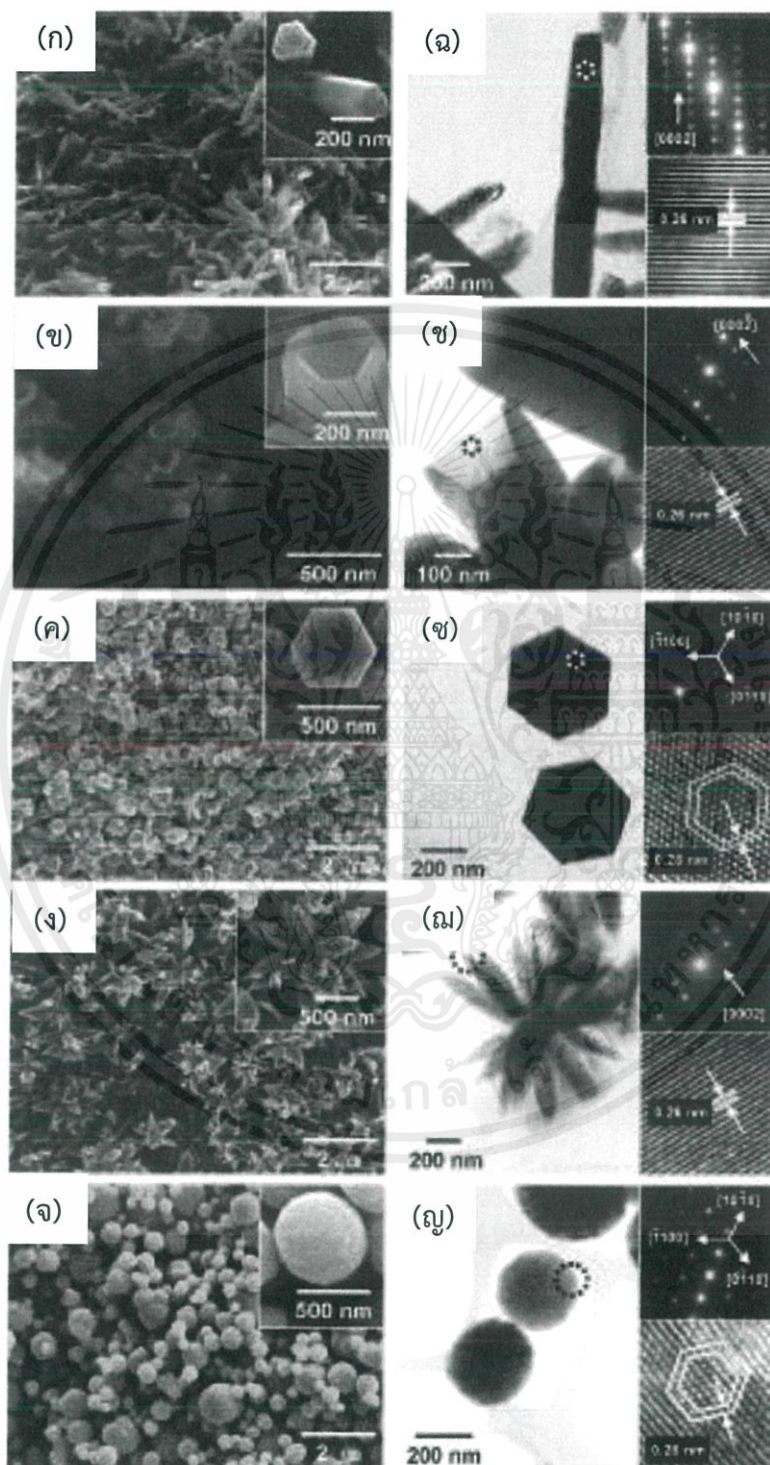
จากภาพที่ 2.28 การสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์เกิดจากนิวเคลียสของซิงค์ออกไซด์พัฒนาเป็นแท่งนาโนที่ระนาบ [0001] จากนั้นแท่งนาโนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยลดโครงสร้างผลึกระนาบ [0001] เกิดเป็นถ้วยนาโน ต่อจากนั้นระนาบ [0001] หายุดการโตเกิดเป็นแผ่นนาโนเนื่องจากการพับ 6 ด้านสมมาตรกัน จากนั้นแท่งนาโนจำนวนมากเกิดการเติบโตที่จุดศูนย์กลางของนิวเคลียสเป็นผลทำให้ได้ดอกไม้นาโน แต่ถ้าแท่งนาโนเกิดหยุดเติบโตที่จุดศูนย์กลางเป็นผลทำให้เกิดเป็นทรงกลมนาโน



ภาพที่ 2.29 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่รูปร่างต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.29 พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์รูปแบบต่างๆที่สังเคราะห์ได้เป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอนลเวิร์ตไซต์ และไม่มีสารอื่นเจือปนทุกตัวอย่าง และจากภาพที่ 2.30 แสดงรูปร่างแตงนาโน(ก,จ) ถ้วยนาโน(ข,ช) แผ่นนาโน(ค,ช) ดอกนาโน(ง,ฉ) และทรงกลมนาโน(จ,ญ) ตามลำดับ

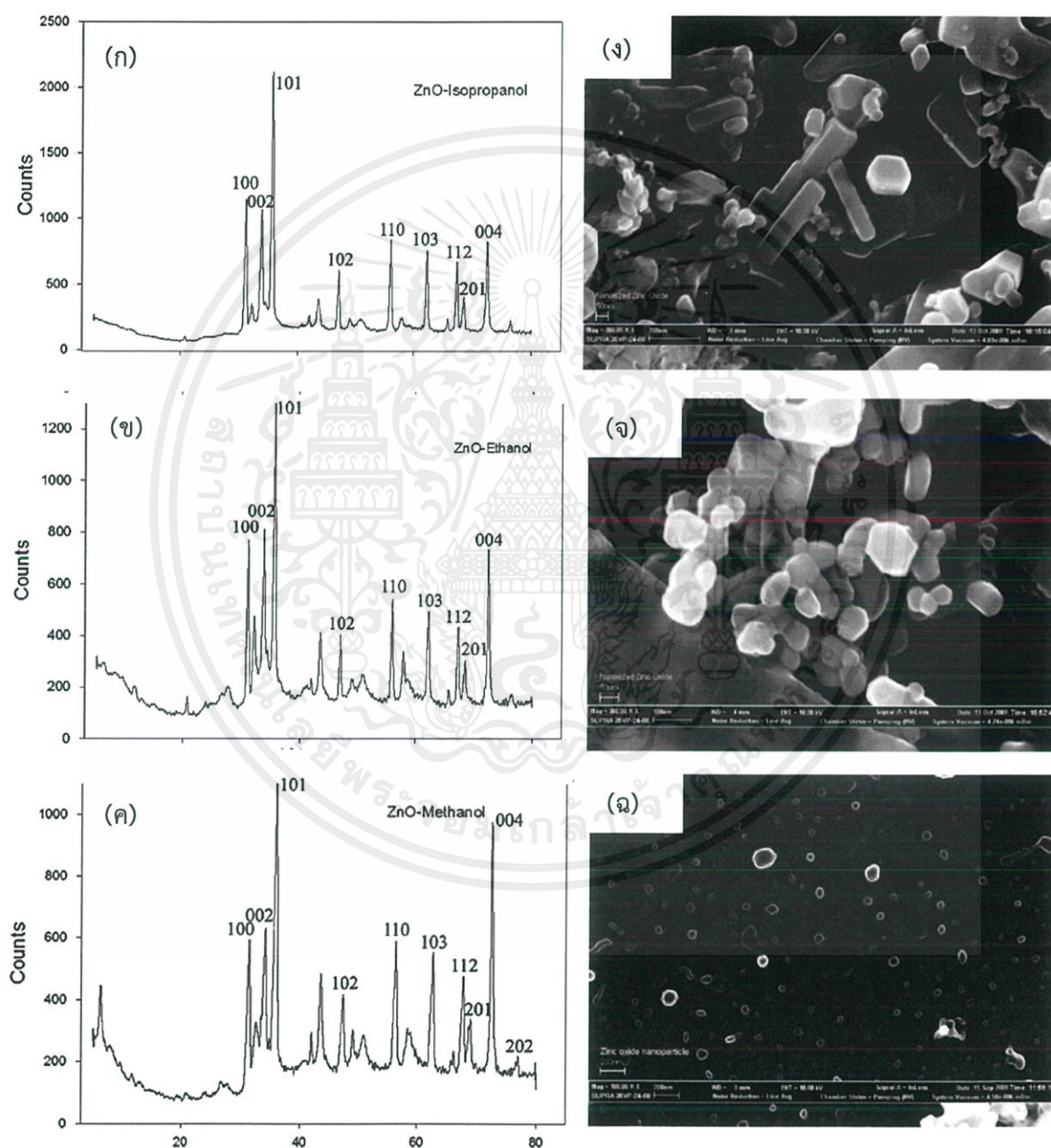


ภาพที่ 2.30 (ก,ข,ค,ง,จ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ

(ฉ,ช,ช,ฉ,ญ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

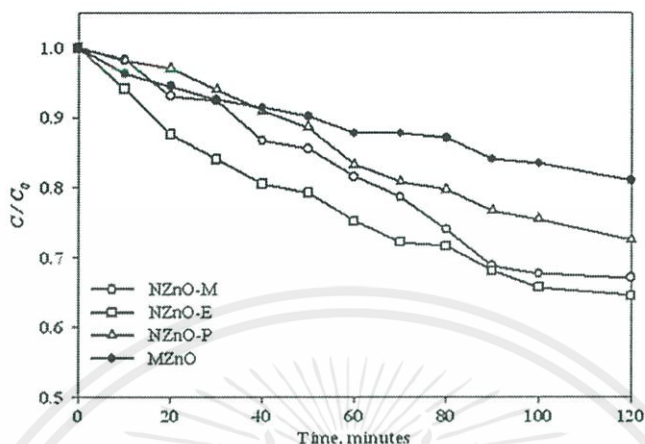
ในปี ค.ศ. 2012 Prantik Banerjee และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซโนเคมี และปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของโลหะหนักจากการศึกษา ใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ คือซิงค์อะซิเตต โดยใช้สารละลายสามชนิด คือ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ของแอลกอฮอล์ จากผลของสารละลาย ทั้งสามเงื่อนไขทำให้อนุภาคนาโนมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 (ก,ข,ค) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และ (ง,จ,ฉ) ผลวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของสารละลายไอโซโพรพานอล,เอทานอล, และเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากผลการศึกษาอัตราการเริ่มต้นของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสลดลง เมื่อสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ต่างกัน พบว่าอัตราเริ่มต้นของซิงค์ออกไซด์ในสารละลายเอทานอลดีที่สุดตามด้วยเมทานอล และไอโซโพรพานอล ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.32



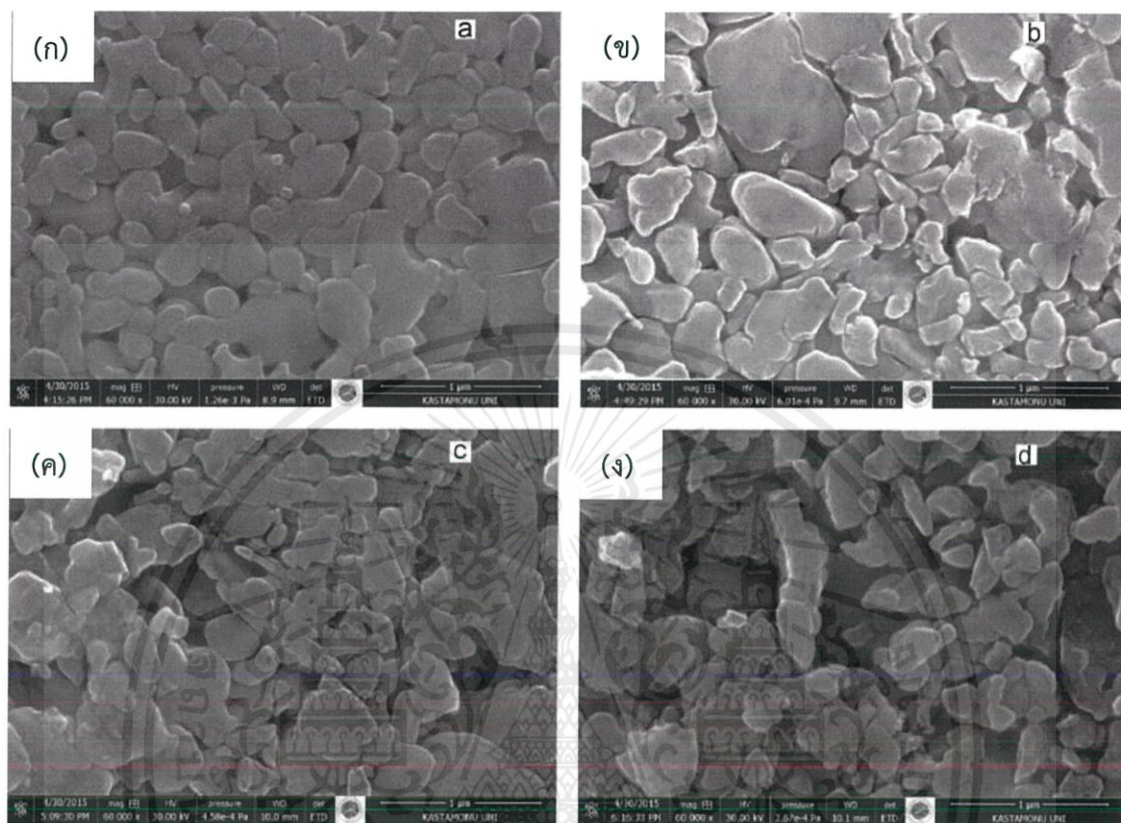
ภาพที่ 2.32 ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ลดลงโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกันของซิงค์ออกไซด์

ดังนั้นเมื่อใช้สารละลายเมทานอลทำให้รูปร่างอนุภาคเป็นขุย ในขณะที่สารละลายเอทานอลและไอโซโพรพานอลเป็นรูปร่างตัดทงเหลี่ยม (เฮกซะโกนอล) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายเอทานอล เนื่องจากรูปร่างของซิงค์ออกไซด์เป็นทงเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.31(ข,จ) ช่วยทำให้สารตั้งต้นกระจายตัวดี ช่วยควบคุมขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ให้ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และอัตราเริ่มต้นของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสลดลงซิงค์ออกไซด์ในสารละลายเอทานอลดีที่สุด ดังภาพที่ 2.32

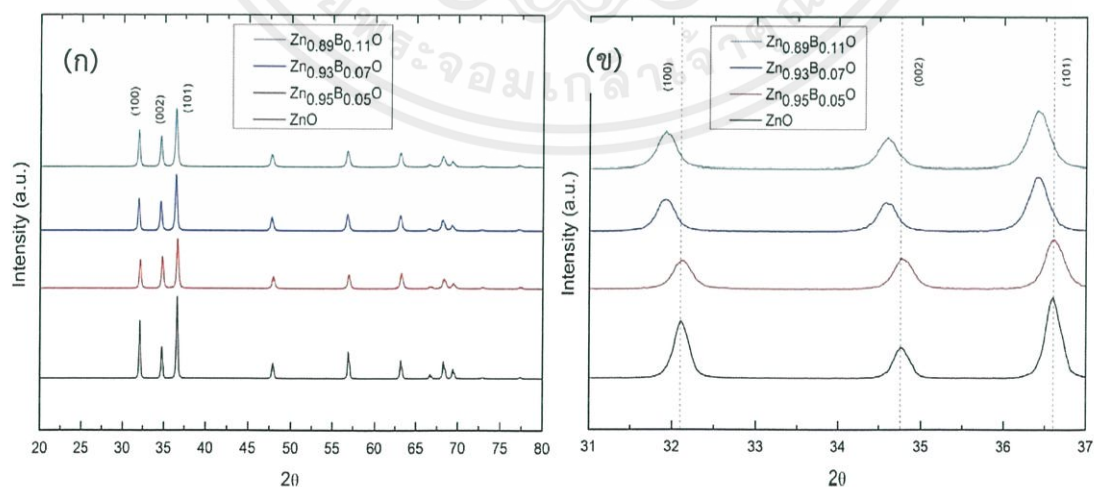
ในปี ค.ศ. 2015 S.D. Senola และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเจือโบรอนในช่วง 0-11 เปอร์เซ็นต์ ลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ทำให้โครงสร้างสัณฐานเปลี่ยนไป ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเมื่อเจือโบรอนเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง ดังภาพที่ 2.33 และจากผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2.34 พบว่าเมื่อเจือโบรอนเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของเกรนเล็กลงจาก 60.75 นาโนเมตร เป็น 34.34 นาโนเมตร และทุกตัวอย่างเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ไม่มีวัฏภาคแปลกปลอม สมบัติทางแสงจากผลวิเคราะห์การดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็น ดังภาพที่ 2.35 พบว่าทุกตัวอย่างดูดกลืนแสงช่วง 384 นาโนเมตร เมื่อเจือโบรอนเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนจะเลื่อนไปค่าที่พลังงานสูงขึ้น (blue shift) และเมื่อเจือโบรอนเพิ่มขึ้น ค่าแถบพลังงานทางแสงเพิ่มขึ้น จาก 3.27 เป็น 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ สมบัติทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.36 พบว่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.11×10^{14} เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.08×10^{14} ลูกบาศก์เซนติเมตร ความคล่องพาหะลดลงจาก 5.61 เป็น $1.22 \text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$ และสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงจาก 10.89×10^4 เป็น 1.25×10^4 โอห์ม·เซนติเมตร

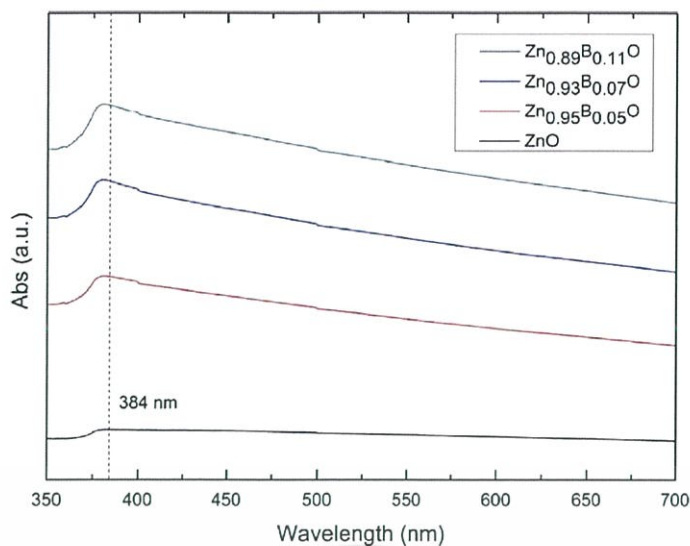


ภาพที่ 2.33 ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่ความเข้มข้นของโบรอน (ก)0% (ข)5% (ค)7% (ง)11%

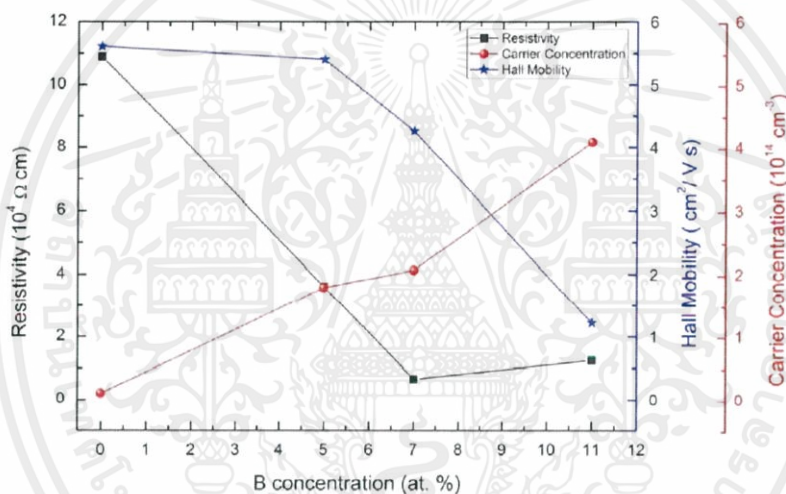


ภาพที่ 2.34 (ก) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ข) ขยายภาพ(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



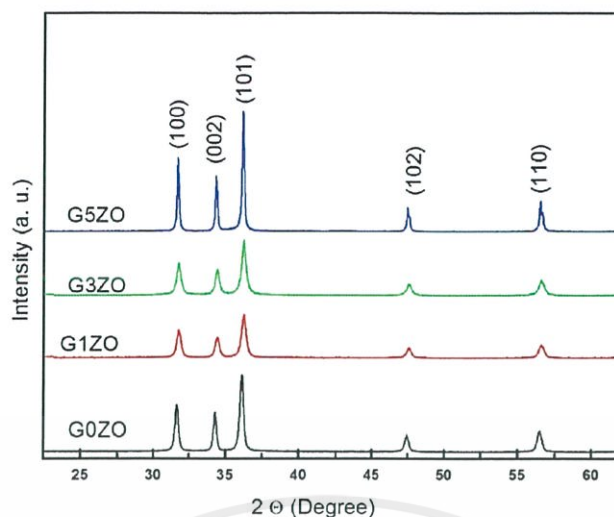
ภาพที่ 2.35 ผลวิเคราะห์การดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็นความเข้มข้นต่างๆ



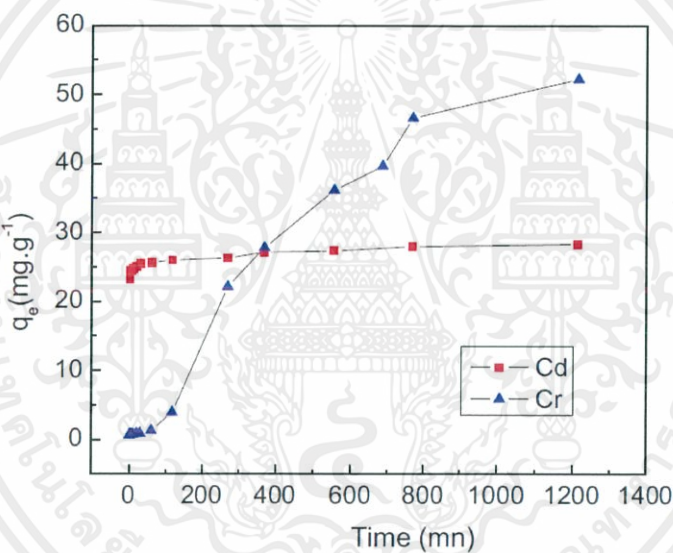
ภาพที่ 2.36 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์

ในปี ค.ศ. 2015 I. Ghiloufi และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาหาวัสดุนาโนที่ใหม่และมีประสิทธิภาพสูง ใช้สำหรับดูดซับโลหะหนักจากสารละลาย โดยงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิของฮีตเตอร์ออกไซด์เจือแกดเลียม 0-5 เปอร์เซ็นต์ สังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2.37 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปใช้ในการดูดซึมแคดเมียม (II) และโครเมียม (VI) จากสารละลาย โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซึมแคดเมียม (II) และโครเมียม (VI) จากสารละลาย 10 นาที และ 760 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.38 พบว่าเมื่อเจือแกดเลียมลงในผลึกของอนุภาคนาโนฮีตเตอร์ออกไซด์ จะเพิ่มการดูดซับโลหะหนักมากขึ้น และอนุภาคนาโนฮีตเตอร์ออกไซด์เจือแกดเลียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักจากสารละลายดีที่สุด และมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ดังภาพที่ 2.39 และดังภาพที่ 2.40

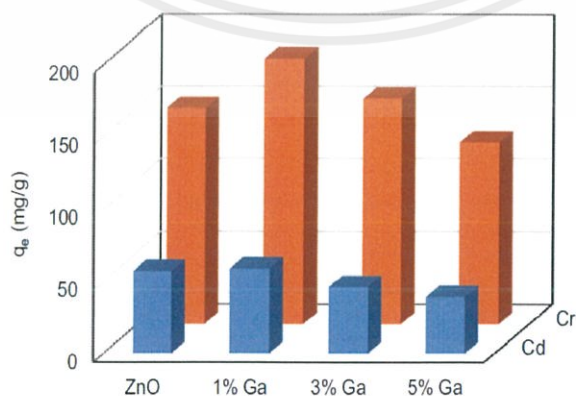
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.37 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ



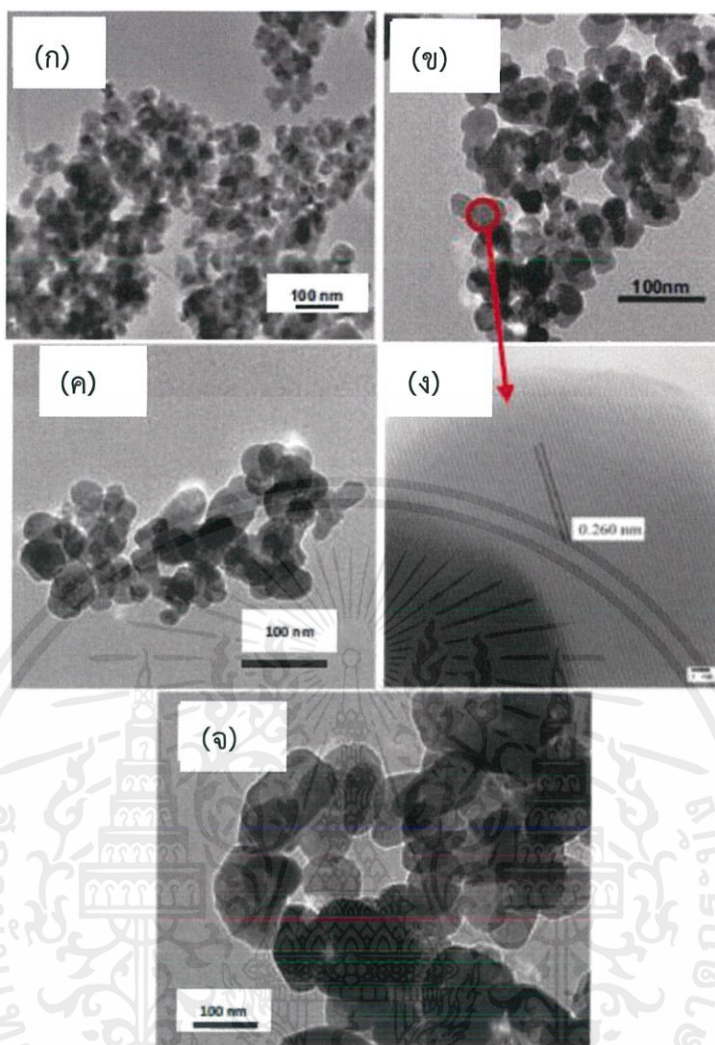
ภาพที่ 2.38 ผลกระทบของเวลาที่ดูดซับแคดเมียม(II) และโครเมียม(VI)จากสารละลายเกลือลิ้ม 1%



ภาพที่ 2.39 ผลกระทบจากการเจือเกลือลิ้มลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ในการดูดซับแคดเมียม(II) และโครเมียม(VI)จากสารละลาย

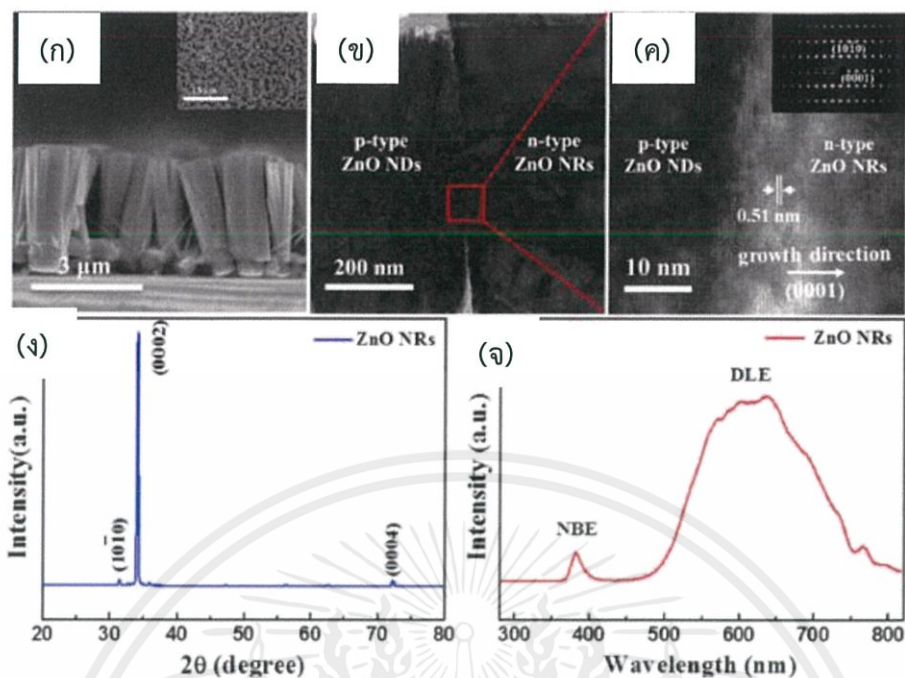
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



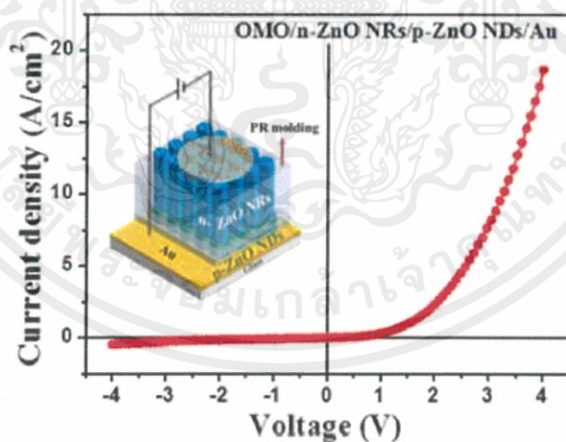
ภาพที่ 2.40 ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ความเข้มข้นของแกเลียม
(ก) ไม่มีการเจือ (ข) 1% (ค) 3% (ง) HRTEM ของภาพของภาพ(ข) และ(จ)5%

ในปี ค.ศ. 2016 Sung-Doo Baek และคณะ [22] ได้ทำการสังเคราะห์ไดโอดเปล่งแสงด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิต่ำและง่าย โดยใช้ซิงค์ออกไซด์แบบแผ่นนาโนเจือด้วยพลวงเป็นชนิดพี (p-type) และซิงค์ออกไซด์แบบแท่งนาโนเป็นชนิดเอ็น (n-type) โดยใช้รอยต่อแบบสารเดียวกัน (Homojunction) และใช้แรงดันไฟฟ้าที่สามารถเปิดได้ที่ 2.5 โวลต์ โดยให้แรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 100 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่เสถียรคือ 5 โวลต์ โดยไดโอดเปล่งแสงออกมาในช่วงที่ตามองเห็นเป็นสีส้มแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

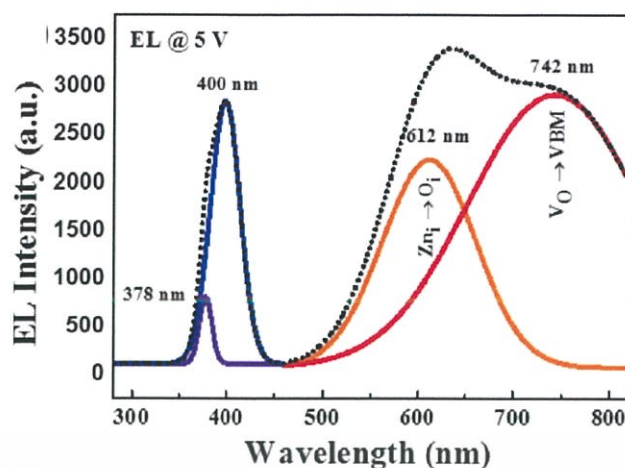


ภาพที่ 2.41 (ก,ข,ค) ผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของรอยต่อของแท่งนาโน (ง) ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นนาโนชนิดเอ็น และ (จ) ผลการเปล่งแสงจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อทำเป็นอุปกรณ์ไดโอด

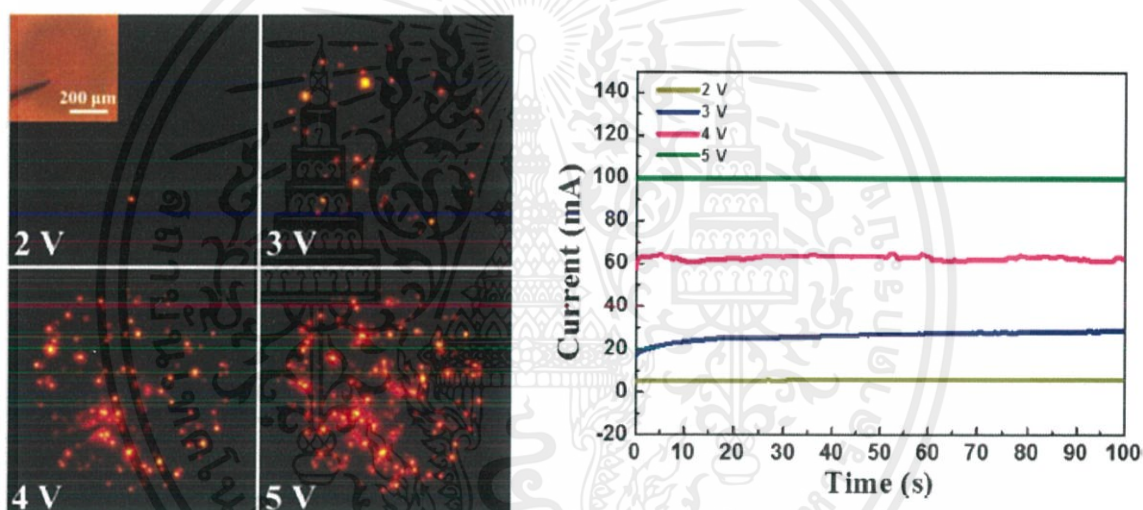


ภาพที่ 2.42 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของกระแสของอุปกรณ์จากผลการทดลองเป็นไปตามลักษณะจำเพาะของไดโอดชนิดเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.43 ผลการเปล่งแสงจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อทำเป็นอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสง



ภาพที่ 2.44 (ก) ผลการวิเคราะห์เปล่งแสงจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ และ(ข) ผลการวิเคราะห์ความเสถียรของของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เวลา 100 วินาที

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเจือพลวงลงไปในโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นแผ่นนาโนชัดเจนกว่าความเข้มข้นอื่น (พลวงที่เจือลงในโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ 0.5-2 เปอร์เซ็นต์) โดยมีแม่แบบที่เป็นอิสระต่อกันและเป็นการปลูกผลึกแบบอีพิแทกเซียล ผลการเปล่งแสงจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อทำเป็นอุปกรณ์ไดโอดเปล่ง พบว่าเปล่งแสงในช่วง 612 และ 742 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของที่ตามองเห็นเป็นสีส้มแดง เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ 2-5 โวลต์ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เปล่งแสงที่ได้ชัดเจนและมีความเสถียรมาก งานวิจัยนี้สามารถนำสารที่สังเคราะห์มาสร้างไดโอดเปล่งแสงแบบรอยต่อชนิดเดียวกันได้สำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในปัจจุบันกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธีการ งานวิจัยนี้ได้เลือกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemical process) เนื่องจากใช้สารเคมีปริมาณไม่มาก ราคาประหยัด สามารถเติมสารเจือได้ง่าย อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ก่อตัวเป็นผลึกในขั้นตอนการโซโนเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะดวกและง่ายต่อการสังเคราะห์สาร โดยงานวิจัยนี้ใช้ซิงค์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้น จากนั้นจึงนำโบรอนและแกลเลียมมาเจือลงไป ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ, เวลาที่ใช้ในการโซโนเคมี, และค่าความความเป็นกรดต่างของสารละลาย จากนั้นนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจหาหมู่ฟังก์ชันด้วยฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์, วิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงพลังงาน, วิเคราะห์สมบัติการกระเจิงของแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง, วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง และวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด

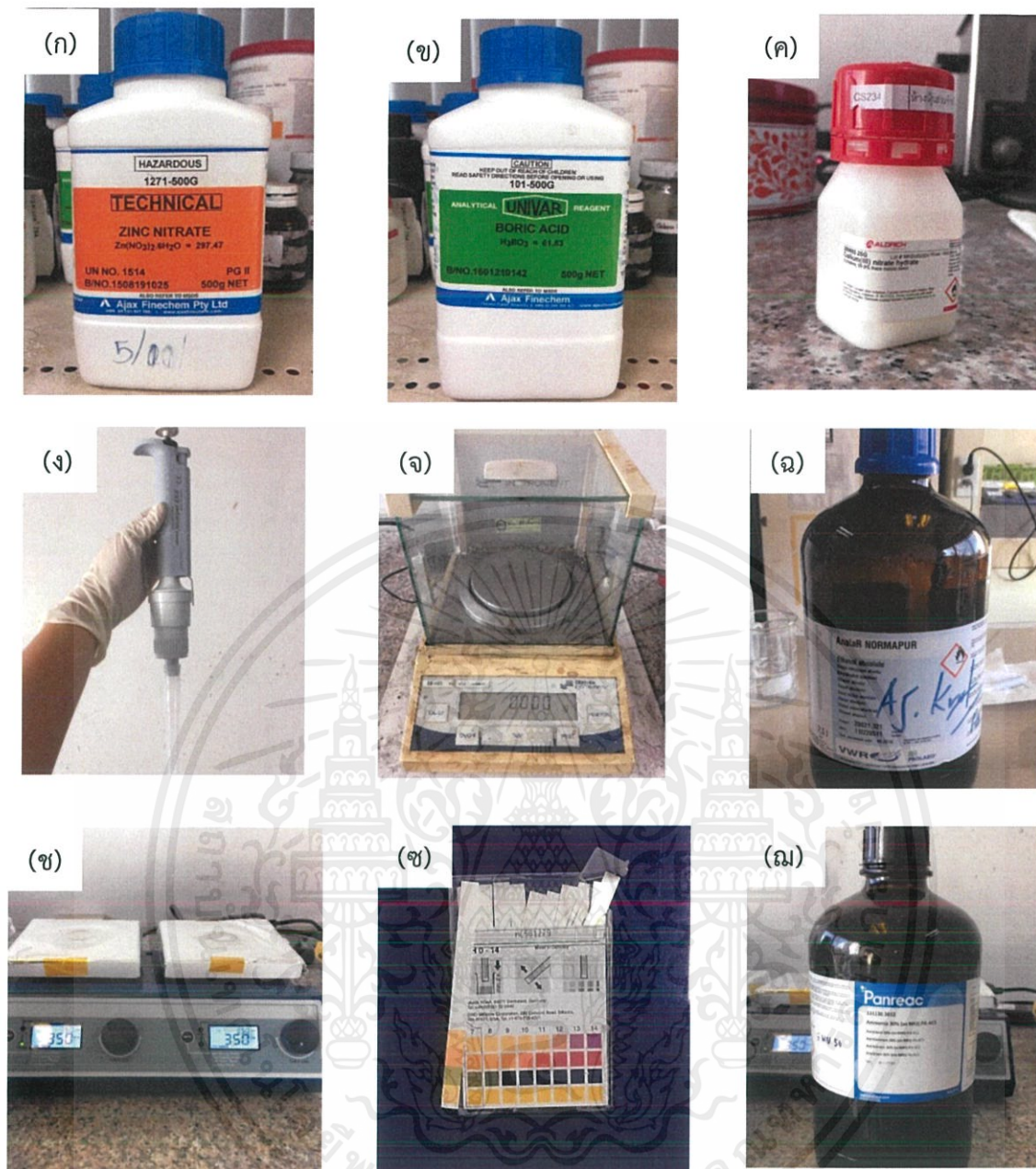
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต (Zinc nitrate hexahydrate, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)
2. เอทานอล (Ethanol, C_2H_5OH) บริสุทธิ์ 99.9%
3. บอริกแอซิด (Boric acid, H_3BO_3)
4. แกลเลียมไนเตรต (Gallium (III) nitrate hydrate, $Ga(NO_3)_3 \cdot 1H_2O$)
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องแก้วปิกเกอร์
2. เครื่องชั่งสาร
3. กระจกบอทวอง, ซ้อนตักสาร
4. เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนและแท่งแม่เหล็กปั่นกวน
5. ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
6. ปีเปตอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (ก) ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต
- (ข) บอริกแอซิด
- (ค) แกลเลียมไนเตรต
- (ง) ปีเปตติล็กทอนิกส์
- (จ) เครื่องชั่งสาร
- (ฉ) เอทานอล บริสุทธิ์ 99.9%
- (ช) เครื่องกวนสารละลาย
- (ซ) ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
- (ฌ) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การเตรียมสารละลาย-เจือสารละลาย

ทำการเตรียมสารละลายให้ตกตะกอน ที่เตรียมจากซิงค์ไนเตรต เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นอนุภาคนาโน โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เตรียมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 190 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ 99.9% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (5% สารละลาย)
3. ผสมสารละลายเอทานอลลงในน้ำปราศจากไอออน กวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก
4. นำสารละลายเอทานอลมา ปริมาตร 150 มิลลิลิตร
5. ชั่งซิงค์ไนเตรต 8.779 กรัม (0.2 โมลาร์) จากนั้นเทลงสารละลาย
6. ชั่งบอริกแอซิก/แกลเลียมไนเตรต 1-7% จากการคำนวณ เทลงสารละลาย
7. ปรับปริมาตรสารละลายให้มีปริมาณ 200 มิลลิลิตร
8. กวนสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก 10 นาที ปิดด้วยกระจกนาฬิกา

3.3.2 ขั้นตอนการโซโนเคมี

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือโบรอน/แกลเลียม โดยใช้กระบวนการโซโนเคมี ซึ่งมีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นตัวก่อผลึก มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1. นำน้ำปราศจากไอออนมาทำการโซโนเคมีใส่ภาชนะสำหรับการโซโนเคมี
2. ทำการตั้งค่าเครื่องโซโนเคมีที่เวลา 1 นาที เพื่อล้างฮอว์นให้สะอาดก่อนทำการทดลองจริง
3. นำสารละลายที่ได้จากการเตรียมจากขั้นตอนข้างต้นมาใส่ภาชนะสำหรับการโซโนเคมี
4. ทำการตั้งค่าเครื่องโซโนเคมีที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ แอมพลิจูด 70% จังหวะเปิด 3 หยุด 1 วินาที เป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ
5. เติมสารละลายแอมโมเนียที่ pH9, 10, และ 11 ขณะทำการโซโนเคมี จากนั้นวัดค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ ให้ได้ค่าความเป็นกรดต่างตามต้องการ
6. เติมสารละลายใส่ปีกเกอร์เพื่อทำการล้างตะกอนในขั้นตอนถัดไป

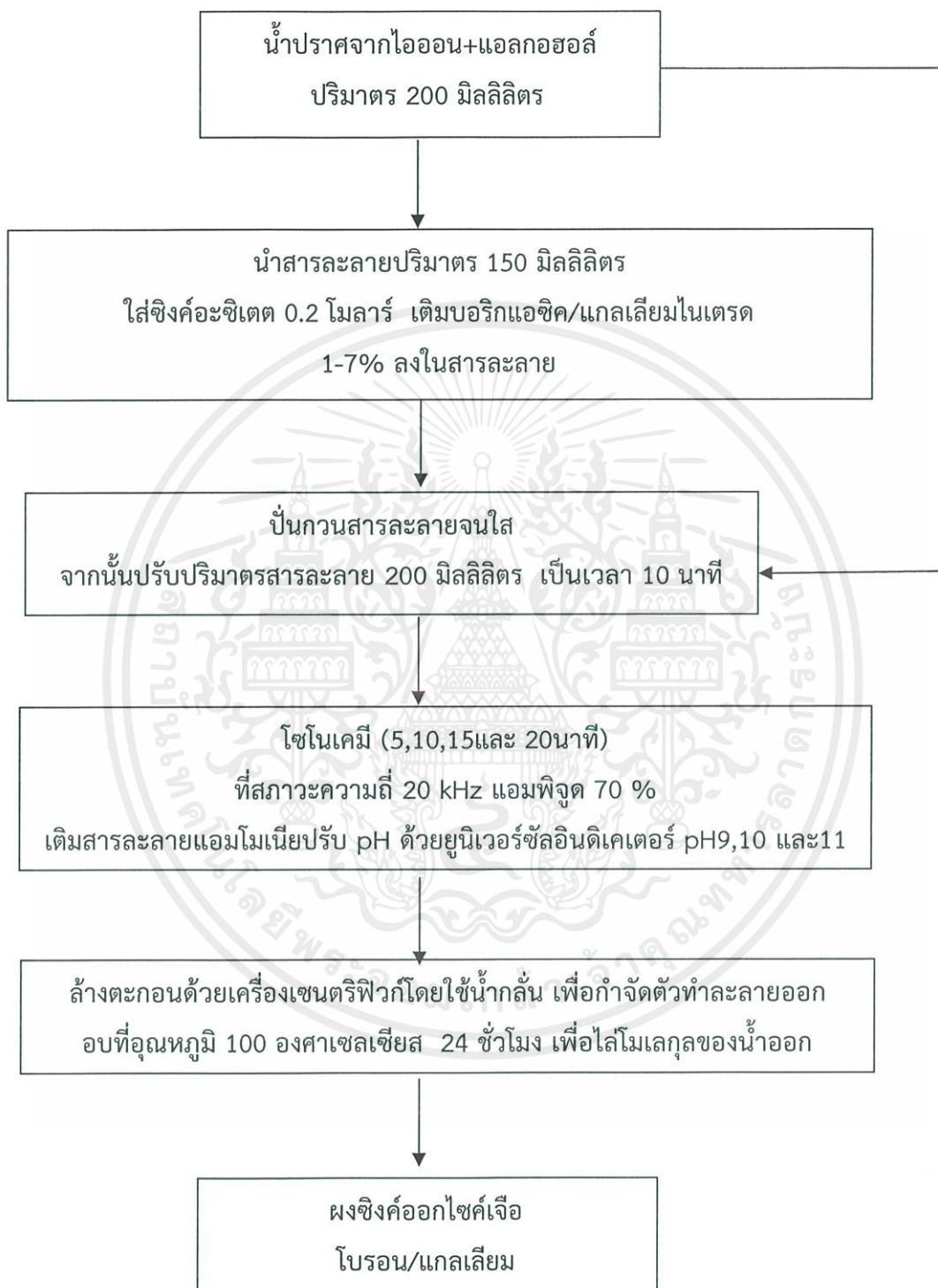
3.3.3 การล้างตะกอน

การทำให้อนุภาคนาโนแขวนลอยอยู่ตกตะกอน มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. นำสารจากขั้นตอนข้างต้นมาใส่หลอดเซ็นทริฟิวก์หลอดละ 30 มิลลิลิตร
2. ทำการตั้งค่าเครื่องเซ็นทริฟิวก์ที่ความเร็วรอบ 12000 rpm อุณหภูมิ 25°C เวลา 5 นาที
3. เทน้ำส่วนใสทิ้ง แล้วเติมน้ำปราศจากไอออนจากนั้นวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ ทำซ้ำ 2-3 ครั้ง ให้ได้ pH 7
4. นำสารใส่ปีกเกอร์ไปใส่เตาอบเพื่อทำให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังของกระบวนการเตรียมซิงค์ออกไซด์เจือโบรอน/แกลเลียม ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แผนผังกระบวนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์เจือโบรอน/แกลเลียม
ด้วยกระบวนการโซโนเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาค

3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR)

การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของตัวทำละลายว่าล้างออกหมดหรือไม่ นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียด และนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น Spectrum Two ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer ใช้ force gauge 120 ความยาวคลื่นช่วง 400 - 4000 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.3 เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FTIR) บริษัท PerkinElmer [48]

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกว่ามีผลึกของซิงค์ออกไซด์และโบรอนหรือแกลเลียมหรือไม่ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ ผลึกของธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันไป เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของบริษัท Rigaku รุ่น SmartLab ซึ่งใช้ Cu K α เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และให้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.504 อังสตรอม โหมด theta2-theta เริ่มต้น 20 deg หยุด 80 deg, ความถี่ 0.02 step, และ Speed duration time 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

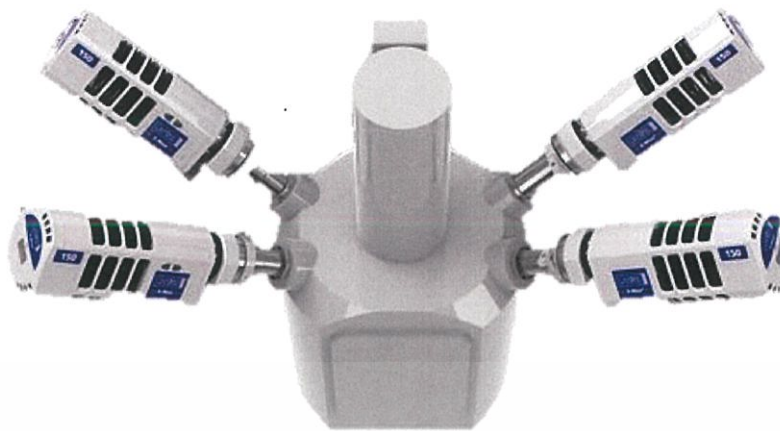
การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการนำสารตัวอย่างซึ่งค็อกซ์ไดต์ปริมาณเล็กน้อยใส่ลงในสารละลายเอทานอลสั้นให้อนุภาคของแข็งกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเตรียมสตัป (stub) หรือที่รองรับสารตัวอย่างโดยนำแผ่นทองแดงมาปิดลงบนพื้นผิวสตัป จากนั้นดูดสารตัวอย่างมาหยดลงบนแผ่นทองแดง 2-3 หยด นำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วนำไปอบผิวด้วยโมเลกุลของทองให้แพร่กระจายติดกับสารตัวอย่างนานประมาณ 30 วินาที จากนั้นนำสตัปของสารตัวอย่างที่ผ่านการฉาบผิวแล้วไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของบริษัท ZEISS รุ่น EVO MA10



ภาพที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของบริษัท ZEISS รุ่น EVO MA10

3.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDX)

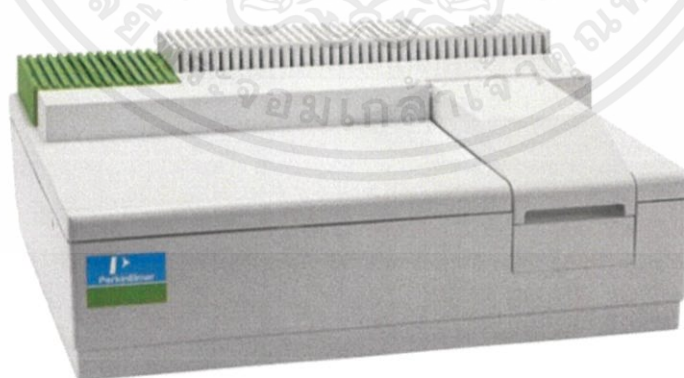
การตรวจวิเคราะห์ปริมาณของธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารตัวอย่างที่เป็นอนุภาค ซึ่งเครื่องวิเคราะห์ธาตุนี้นี้มักจะต่ออยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ปริมาณของธาตุ ที่เจือเข้าไป โดยใช้เครื่องของบริษัท Oxford Instrument รุ่น X-Max^N



ภาพที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของบริษัท Oxford Instrument รุ่น X-Max^N [49]

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการสะท้อนของแสง (UV-Vis diffuse reflectance spectrophotometer)

การตรวจวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงโดยใช้หลักการของแสงดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นที่วิเคราะห์ได้ประมาณ 290-900 นาโนเมตร โดยนำผงซึ่งคั่วออกไซด์วางบนที่ใส่ตัวอย่าง แล้วนำไปวัดการสะท้อนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ในโหมดการสะท้อนของแสง โดยใช้เครื่องของบริษัท Perkin-Elmer รุ่น λ -35



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดการทะลุผ่านของแสงของบริษัท Perkin-Elmer รุ่น λ -35 [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงของแสง (Particle Size Analysis by Laser Diffraction Technique)

การตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค โดยนำผงซิงค์ออกไซด์ไปเจือจาง 10% ด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วใส่สารละลายโซเดียมเฮกซะเมทาฟอสเฟสเพื่อลดแรงตึงผิวของสารละลายและทำให้อนุภาคของสารกระจายตัวในสารละลายได้ดีขึ้น จากนั้นสารละลายไปวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้เครื่องของบริษัท Delsa™ NanoS รุ่น PN A54412



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของบริษัท Delsa™ NanoS รุ่น PN A54412 [51]

3.4.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe method)

การตรวจวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าโดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า โดยนำผงซิงค์ออกไซด์ไปทำการอัดเม็ดปริมาณ 0.5 กรัม/เม็ด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ใช้ตัวเชื่อมในการอัดเม็ดเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จากนั้นนำเม็ดไปวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด โดยใช้เครื่องของบริษัท Quatek รุ่น QT-50



ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของบริษัท Quatek รุ่น QT-50 [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

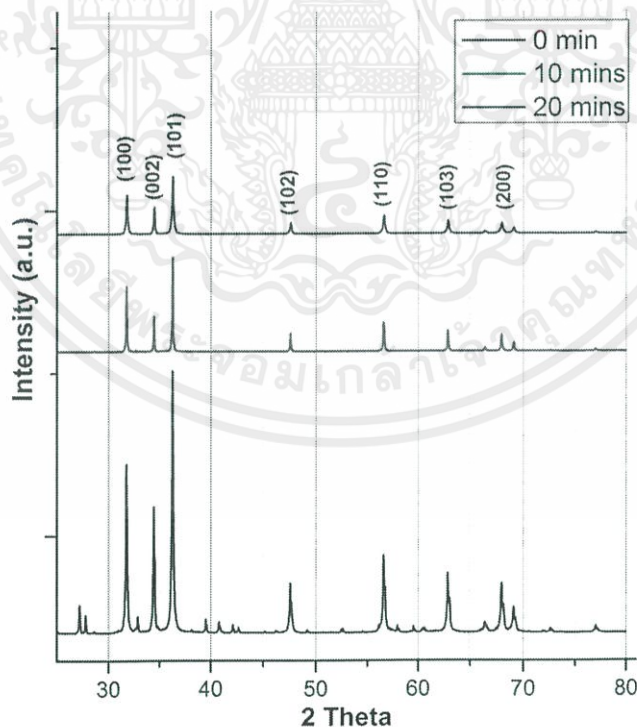
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ผลของเวลาในการโซโนเคมีโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

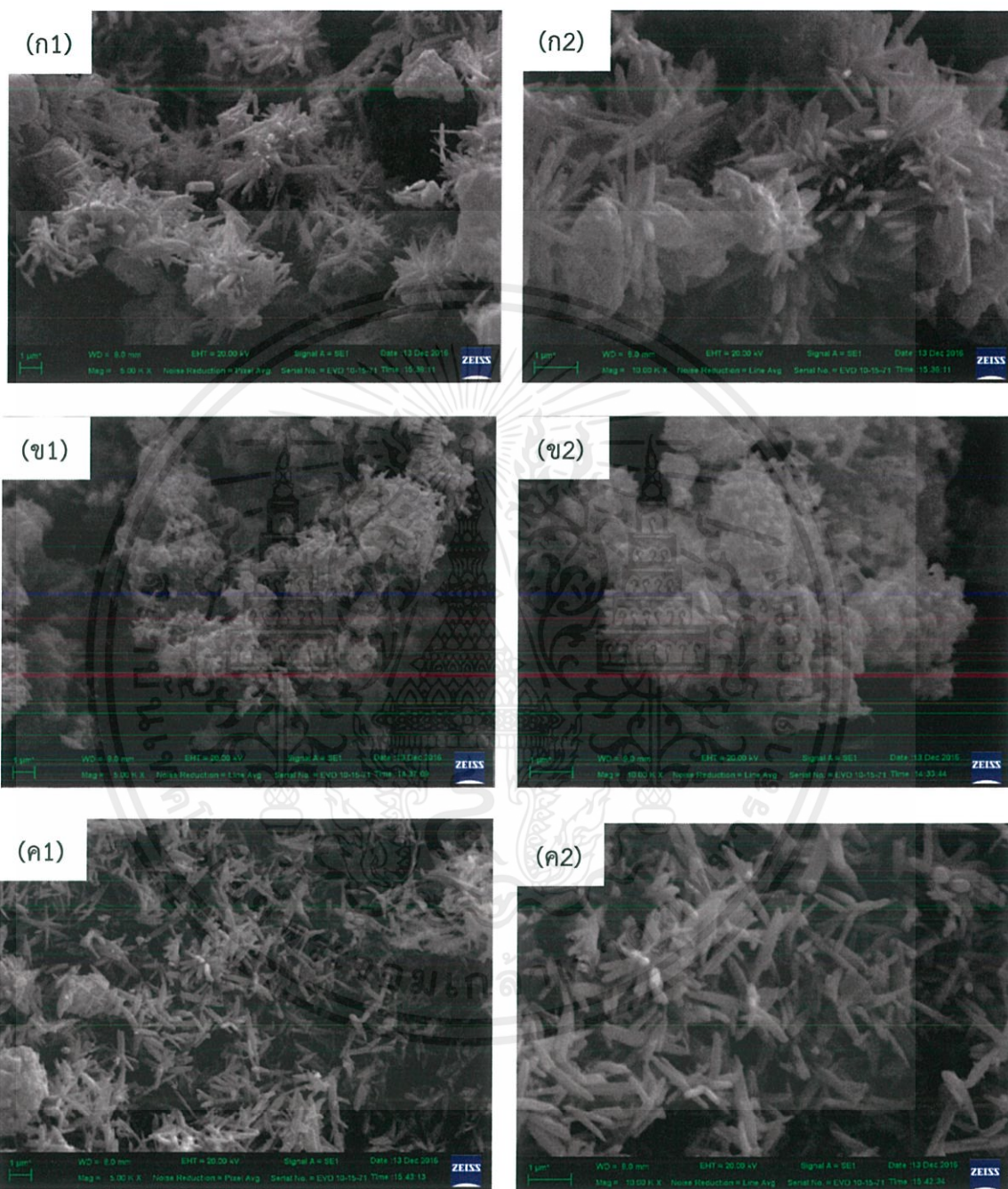
การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถระบุโครงสร้างผลึกได้พบว่าการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซด์ ซึ่งทราบได้โดยการแสดงออกถึงระนาบทั้ง 7 ได้แก่ (100), (002), (101), (102), (110), (103), และ (200) จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่างกันคือ 0, 10 และ 20 นาที จะให้ปริมาณความเป็นผลึกที่แตกต่างกันโดยที่เวลา 0 นาที มีความเป็นผลึกสูงสุด แต่มีวัฏภาคแอมอร์ฟัสเจือปนอยู่ภายในโครงสร้าง (จากการพิจารณาโดยระนาบที่จำเพาะของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซด์) ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกที่จะใช้เวลาในการให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลา 10 นาที เพื่อลดวัฏภาคแอมอร์ฟัสดังกล่าว ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการโซโนเคมีที่เวลา 0, 10, และ 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยรูป (ก) โซโนเคมีที่เวลา 0 นาที (ก1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก2) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) โซโนเคมีที่เวลา 10 นาที (ข1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข2) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) โซโนเคมีที่เวลา 20 นาที (ค1) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ค2) กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้เวลาการให้คลื่นเหนือเสียงแตกต่างกันที่ 0, 10 และ 20 นาที ดังรูป (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าอนุภาคที่ให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลา 0 นาที มีลักษณะเป็นแท่งที่เติบโตแบบไร้ทิศทาง แต่เมื่อให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลา 10 นาที จะเริ่มเห็นผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มก้อนที่ชัดเจนมากขึ้น เมื่อให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็นเวลา 20 นาที ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแท่งชัดเจนที่เติบโตแบบไร้ทิศทาง จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของเวลาการให้คลื่นเหนือเสียง จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนอนุภาค จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาการให้คลื่นเหนือเสียงจะกลายเป็นแท่ง ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เวลาในการให้คลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 10 นาที ทั้งนี้เพราะผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มก้อนอนุภาคที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นฐาน ไม่มีความซับซ้อน สะดวกต่อการควบคุม และเติบโตในทุกระนาบเท่ากันเมื่อเทียบกับเวลาการให้คลื่นเหนือเสียงอื่นที่มีลักษณะเป็นแท่งแบบไร้ทิศทาง (เติบโตในแกนตั้ง) ซึ่งควบคุมได้ยาก และอาจจะส่งผลกระทบต่อสมบัติอื่นๆ ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

4.2 การวิเคราะห์ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

4.2.1 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

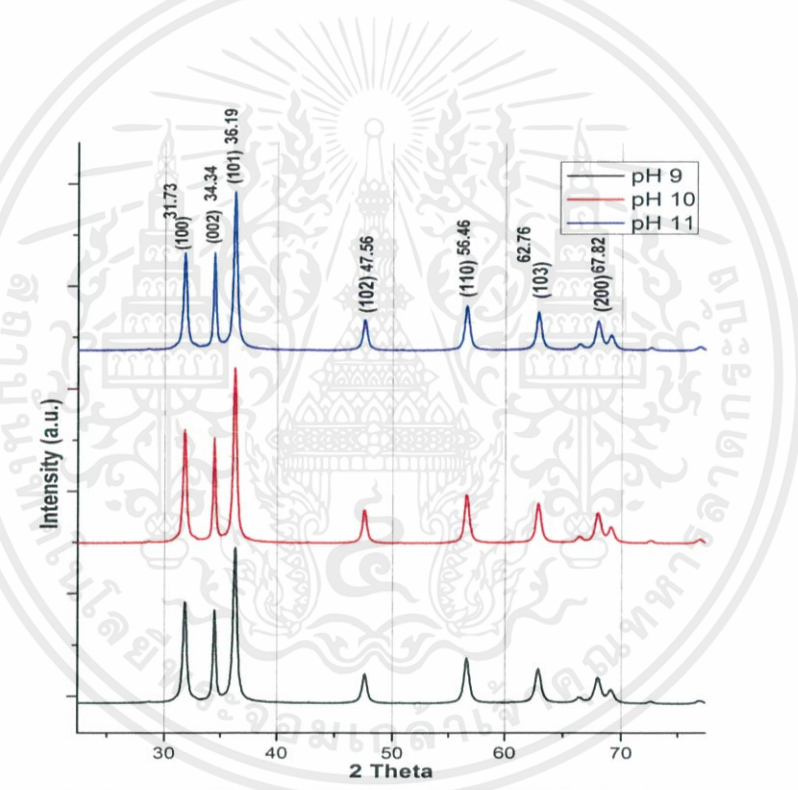
การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถระบุโครงสร้างผลึกได้พบว่าการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ ซึ่งทราบได้โดยการแสดงออกถึงระนาบทั้ง 7 ได้แก่ (100), (002), (101), (102), (110), (103), และ (200) จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ pH ของปฏิกิริยาที่ 9, 10 และ 11 จะให้ปริมาณความเป็นผลึกที่ไม่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกที่จะใช้ค่า pH เท่ากับ 9 เนื่องจากในการทดลองต้องใช้สารที่มีความเป็นเบสในการตกทำให้เกิดการตกตะกอน (แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์) และที่ pH9 ใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 10 มิลลิลิตร แต่ที่ pH10 และ pH11 ใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 18 และ 25 มิลลิลิตร ตามลำดับ จึงเป็นการสิ้นเปลืองหากทำการทดลองให้สารตั้งต้นเหลือใช้ และหากสารตั้งต้นเหลือใช้อาจเกิดการก่อตัวของสารขึ้นมาใหม่ได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ pH9 ที่ใช้สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาปริมาณน้อย ดังภาพที่ 4.3 สำหรับขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคทุกเงื่อนไขที่คำนวณได้จากสมการของ Scherrer ดังตารางที่ 4.1

$$D = \frac{K\theta}{B \cos \theta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ

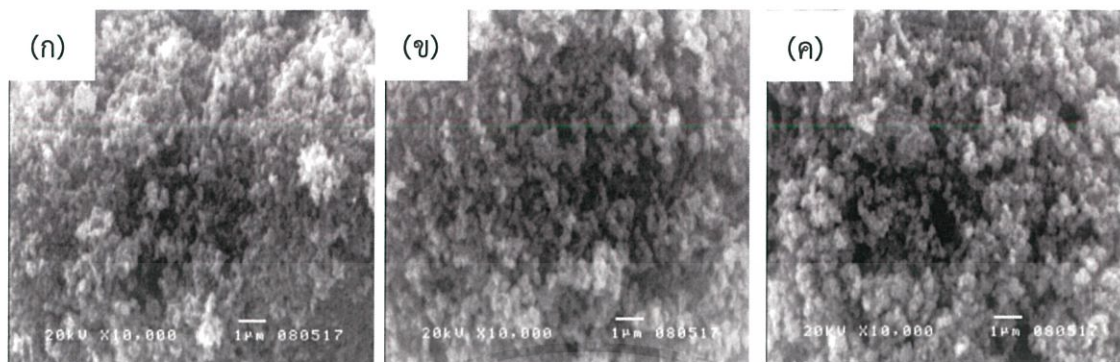
ค่าความเป็นกรด-เบส	ขนาดผลึกเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าคงที่แลตทิซ (อังสตรอม)		ค่าการบิดเบี้ยว
		a-axis	c-axis	
9	21.755	0.324	0.520	1.019
10	33.649	0.325	0.520	1.019
11	31.379	0.325	0.521	1.018



ภาพที่ 4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการโซโนเคมีที่ pH 9, 10 และ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

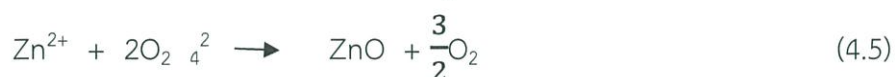
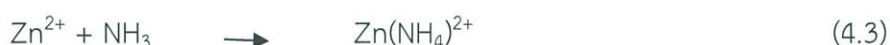
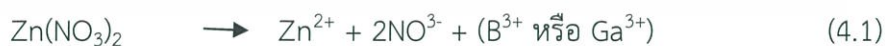
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการโซโนเคมีที่เวลา 10 นาที (ก) pH 9 (ข) pH 10 และ (ค) pH 11

จากภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้ pH ที่แตกต่างกันที่ 9, 10 และ 11 ดังรูป (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าอนุภาคที่ pH 9 มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคขนาดเล็ก แต่เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 11 จะเริ่มเห็นผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต เนื่องจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขณะที่ซิงค์เป็นสารประกอบ $Zn(OH)_4$ จะไปจับกับหมู่ OH^- (ที่เกิดจากการแตกตัวของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ pH สูงขึ้น คือปริมาณแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์สูงจะเกิดการเติบโตของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ขึ้น

สมการแสดงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโซโนเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้ pH ที่แตกต่างกันที่ 9, 10 และ 11 ดังตารางที่ 4.2 โดยจะเห็นว่าอนุภาคที่ pH9, pH10 และ pH11 มีเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 143, 173 และ 163 นาโนเมตรตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

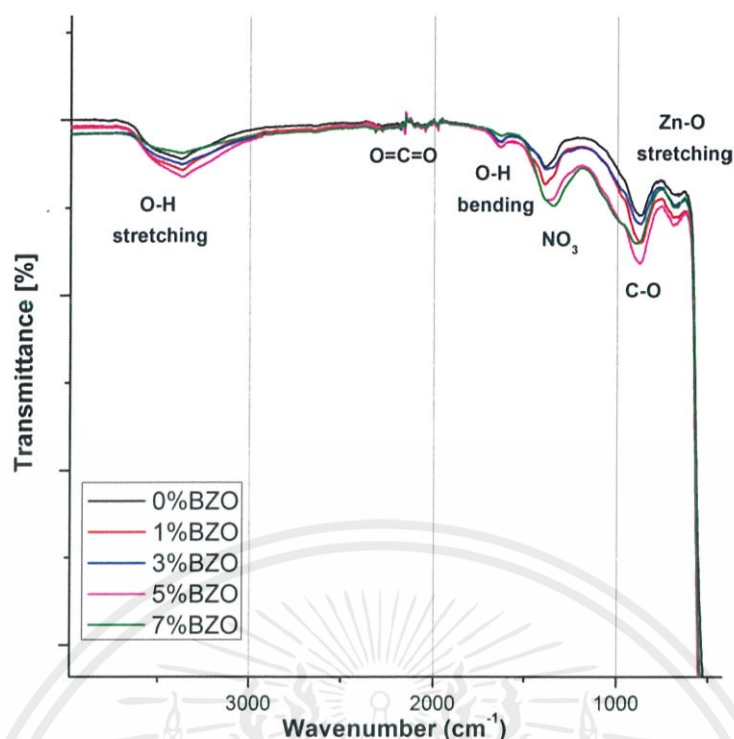
ตารางที่ 4.2 การกระจายของอนุภาคที่ pH 9, 10 และ 11

ค่าความเป็นกรด-เบส	เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (นาโนเมตร)
9	143
10	173
11	163

4.3 การวิเคราะห์ผลจากการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-7%)

4.3.1 ผลจากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

จากผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีโหมดการสั่นในช่วงเลขคลื่น 650 cm^{-1} ซึ่งน่าจะมาจากหมู่การสั่นยืดหดของพันธะ Zn-O นอกจากนี้ยังพบการสั่นพันธะแบบดิ่งยืดและ พบการสั่นพันธะแบบงอของ O-H ซึ่งเป็นของโมเลกุลของน้ำที่เกิดจากความชื้นจากโมเลกุลของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3445 และ 1642 cm^{-1} ตามลำดับ และแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้นที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, NO_3 และ C-O ที่อาจเหลือจากการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเลขคลื่นประมาณ 2346 , 1456 และ 956 cm^{-1} ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.5

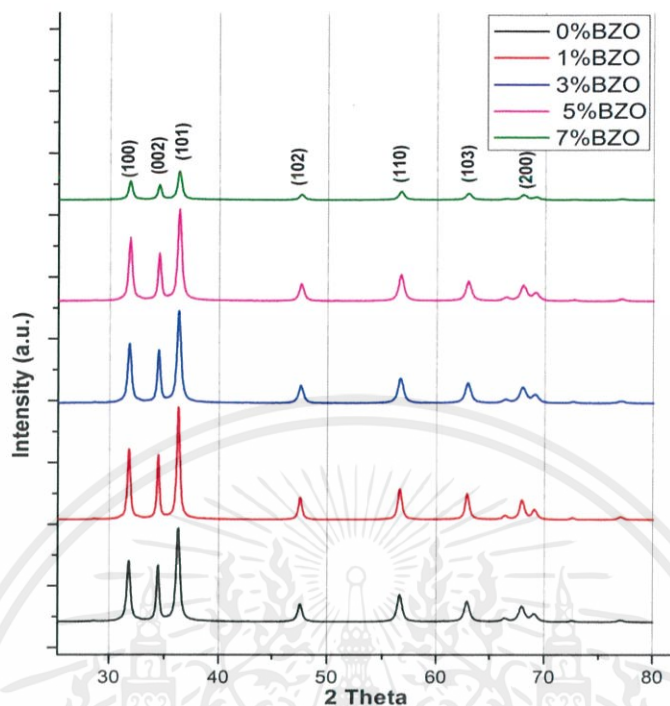


ภาพที่ 4.5 พูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

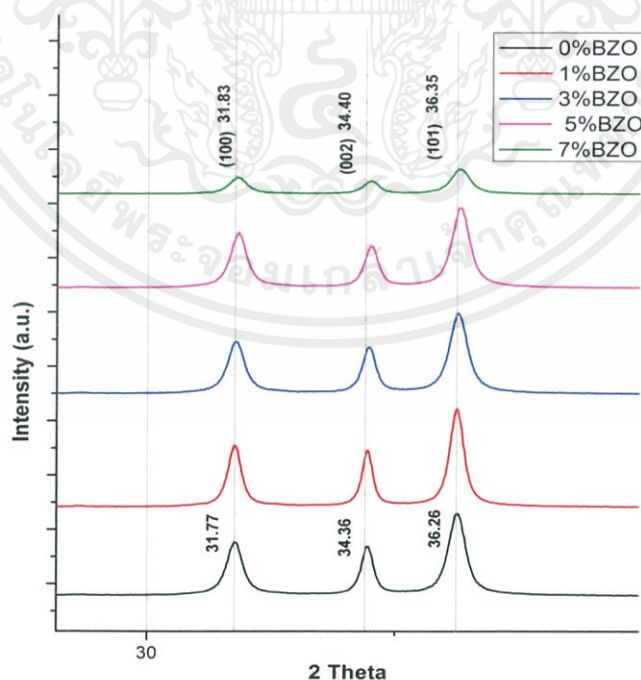
4.3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อเจือโบรอนลงในโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่โบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซด์ ซึ่งทราบได้โดยการแสดงออกถึงระนาบทั้ง 7 อันได้แก่ (100), (002), (101), (102), (110), (103), และ (200) และทุกผลิตภัณฑ์ไม่มีวัฏภาคแปลกปลอม ดังภาพที่ 4.6 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของการเจือโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะทำให้เกิดการเลื่อนไปทางมุมสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.7 จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการเจือโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ทำให้ขนาดผลึกที่ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 5 ซึ่งเป็นธาตุเบาและรัศมีอะตอมขนาดเล็ก (0.88 อังสตรอม) เมื่ออะตอมโบรอน B^{3+} เข้าไปในโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์จะเข้าไปแทนที่อะตอม Zn^{2+} รัศมีอะตอม (1.34 อังสตรอม) เนื่องจากขนาดรัศมีอะตอมของโบรอนมีขนาดเล็กมาก เมื่อเข้าไปในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ จึงทำให้ไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกมากนัก สำหรับขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคทุกเงื่อนไขที่คำนวณได้จากสมการของ Scherrer ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.7 รูปขยายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

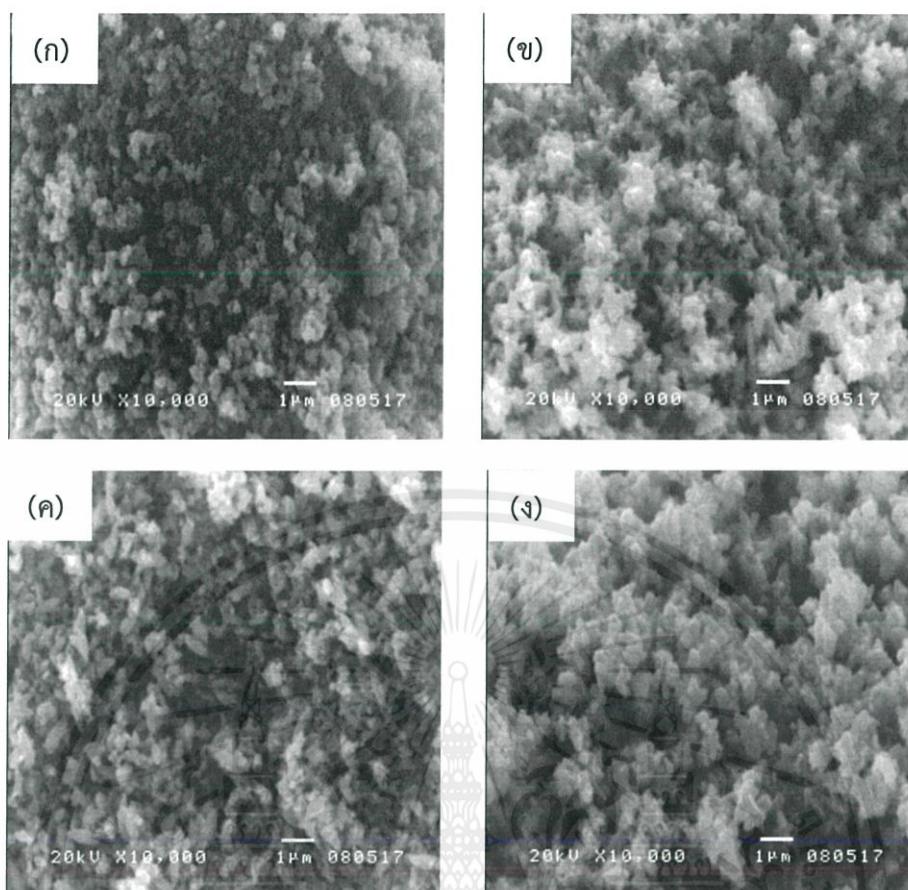
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ การเจือโบรอน	ขนาดผลึกเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าคงที่แลตทิซ (อังสตรอม)		ค่าการบิดเบี้ยว
		a-axis	c-axis	
0%	21	0.324	0.520	1.019
1%	32	0.325	0.520	1.020
3%	30	0.324	0.520	1.020
5%	29	0.324	0.519	1.019
7%	25	0.324	0.494	1.070

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.8 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคขนาดเล็ก แต่เมื่ออัตราส่วนการเจือโบรอนเพิ่มขึ้น จะเริ่มเห็นผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการเจือโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่มีรัศมีอะตอมขนาดเล็ก จึงส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต

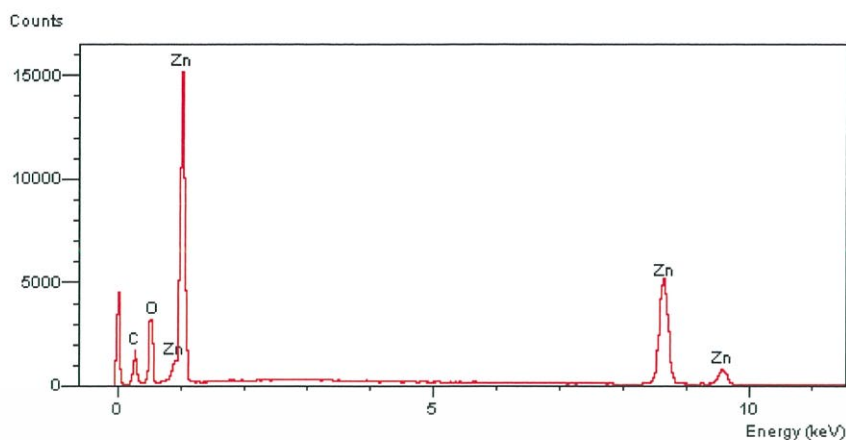


ภาพที่ 4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น (ก) 1, (ข) 3, (ค) 5 และ (ง) 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

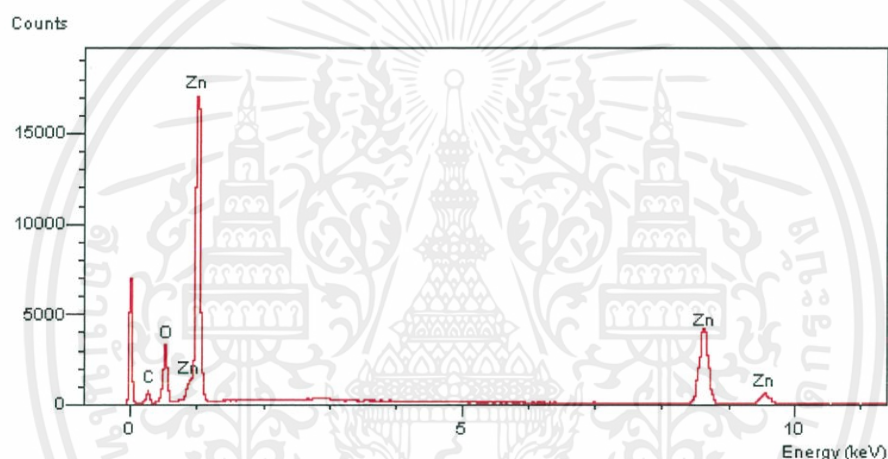
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยโบรอน ดังภาพที่ 4.9 พบว่ามีซิงค์จากพลังงานชั้น K_{α} , K_{β} , L_{α} , และ L_{β} อยู่ร้อยละ 76.03 และมีออกซิเจนอยู่ร้อยละ 23.97 ส่วนอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบธาตุซิงค์กับออกซิเจน เหมือนกับที่ไม่ได้เจือ แต่ไม่พบธาตุโบรอน ดังภาพที่ 4.10 เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนในชั้น K_{α} เท่านั้น จึงอาจจะเกิดการสลายตัวเมื่อถูกยิงด้วยรังสีเอ็กซ์ขณะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้รังสีเอ็กซ์ในการวิเคราะห์ผล และอาจจะด้วยอัตราส่วนของโบรอนต่อซิงค์ออกไซด์ ที่มีปริมาณต่ำเกินกว่าที่เครื่องมือจะสามารถวิเคราะห์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



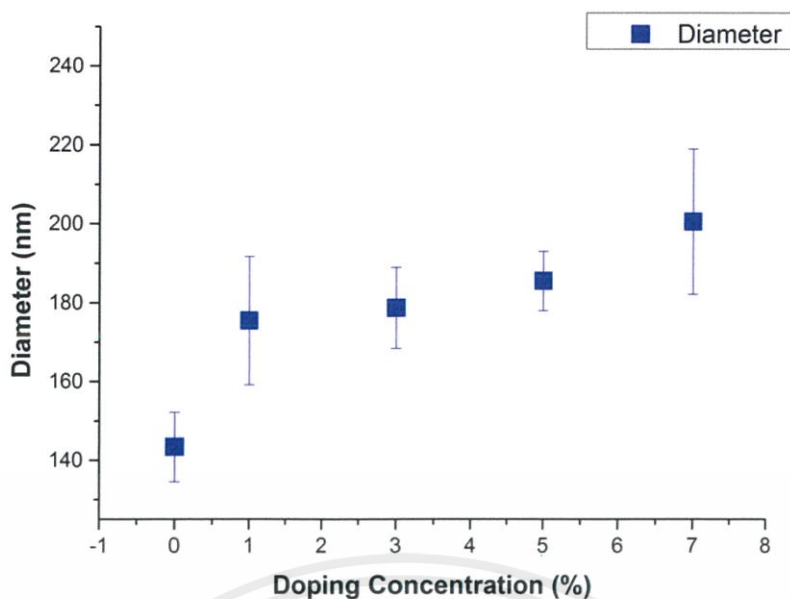
ภาพที่ 4.9 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.10 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต

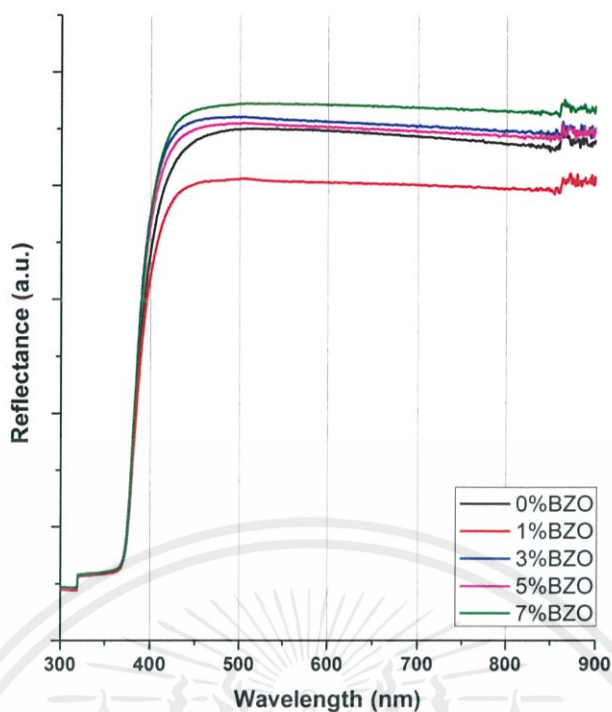
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 143, 175, 178, 185 และ 200 นาโนเมตร ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของการเจือด้วยโบรอน เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



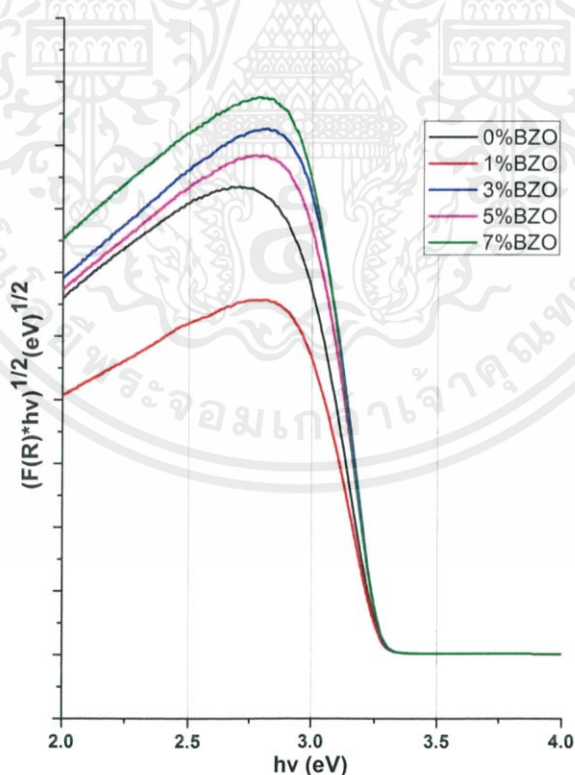
ภาพที่ 4.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการสะท้อนของแสง

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าจากการสเปกตรัมการสะท้อนแสงของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.12 สามารถนำมาหาช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy gap; E_g) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของสารที่มีสมบัติทางแสงได้โดยสามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Kubelka Munk เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(F(R) \cdot hv)^{1/2} (eV)^{1/2}$ กับพลังงานโฟตอน (photon energy, $h\nu$) ดังภาพที่ 4.13 จะสามารถหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้จากการหาค่าอนุพันธ์ และทำการลากเส้นตรงตัดแกน x ที่ความชันสูงสุด จากนั้นนำค่าจุดตัดแกน x มาหารด้วยค่าความชันของเส้นตรง จะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน ดังภาพที่ 4.14 ซึ่งค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ได้มีค่าประมาณ 3.257, 3.261, 3.264, 3.269 และ 3.269 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

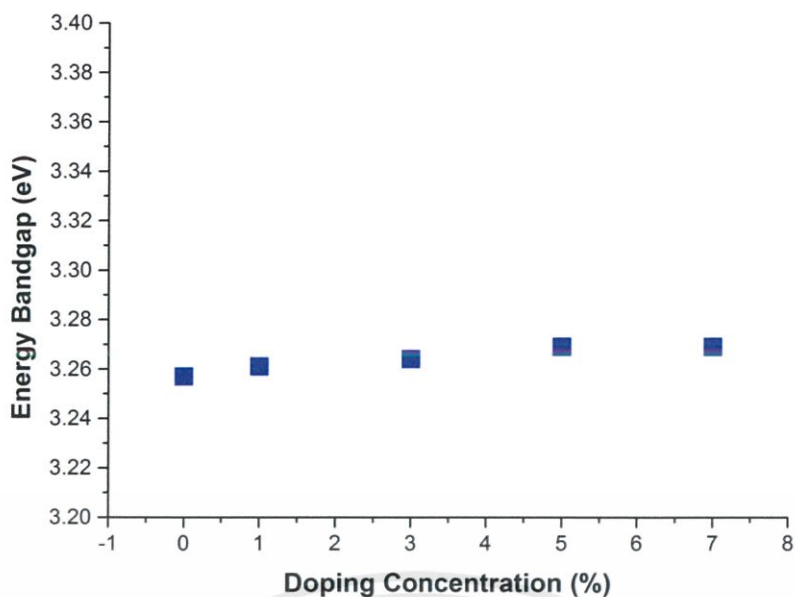


ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมการสะท้อนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

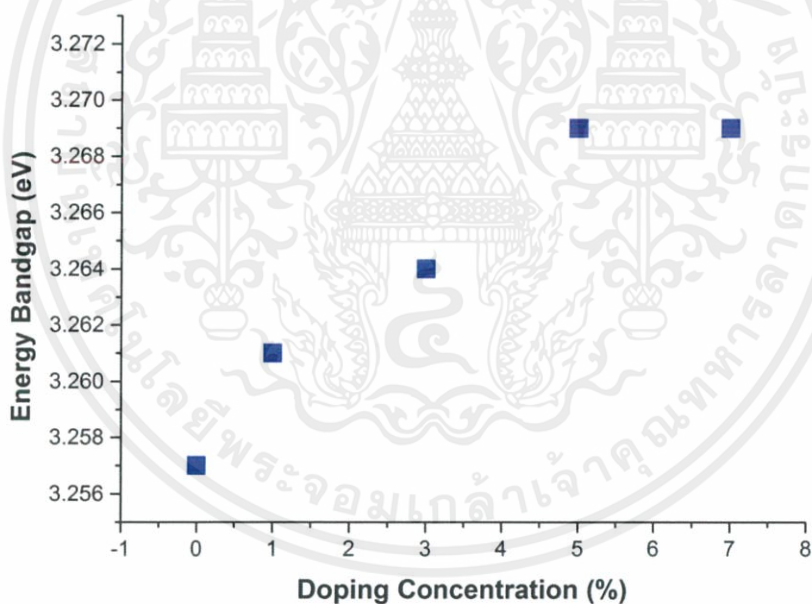


ภาพที่ 4.13 การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk

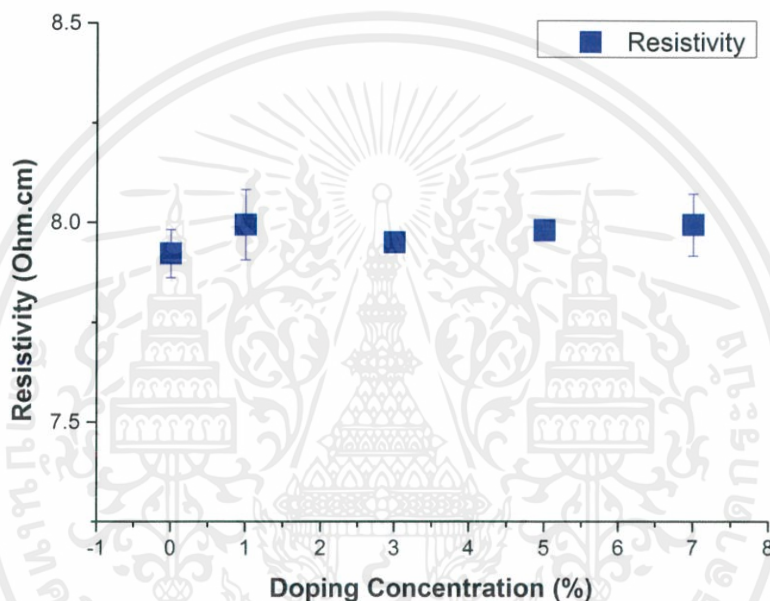


ภาพที่ 4.15 ภาพขยายช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยวิเคราะห์จากสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.16 สามารถคำนวณได้จากสมการความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานที่ได้มีค่าประมาณ 7.920, 7.990, 7.940, 7.990 และ 7.990 โอห์ม·เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ค่าสภาพความต้านทานของผลิตภัณฑ์ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

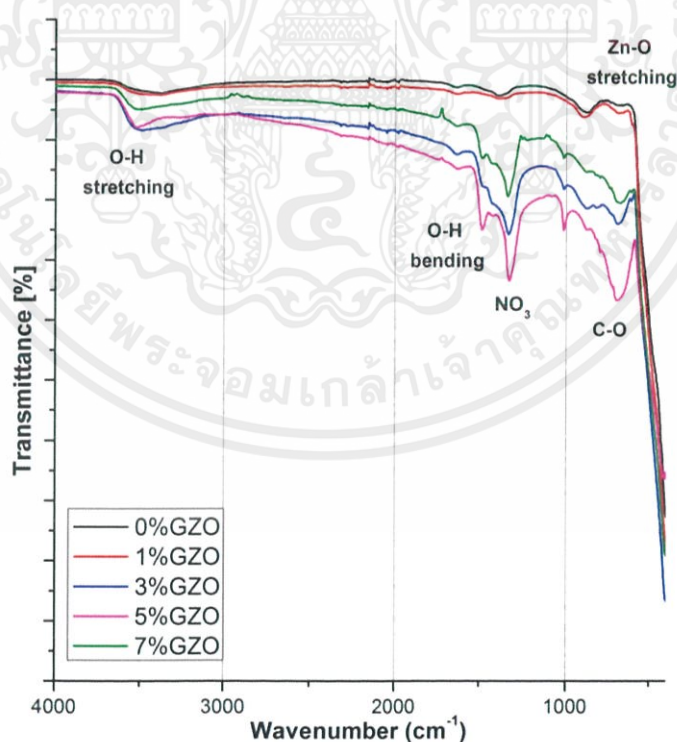


ภาพที่ 4.16 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4 การวิเคราะห์ผลจากการเจือแกลเลียมที่ความเข้มข้นต่างๆ (0-7%)

4.4.1 ผลจากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

จากผลการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีโหมดการสั่นในช่วงเลขคลื่น 650 cm^{-1} ซึ่งน่าจะมาจากหมู่การสั่นยืดหดของพันธะ Zn-O นอกจากนี้ยังพบการสั่นพันธะแบบดัดยืดและพบการสั่นพันธะแบบงอของ O-H ซึ่งเป็นของโมเลกุลของน้ำที่เกิดจากความชื้นจากโมเลกุลของน้ำที่หลงเหลืออยู่ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3445 และ 1642 cm^{-1} ตามลำดับ และแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้นที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ NO_3 และ C-O ที่อาจเหลือจากการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเลขคลื่นประมาณ 1456 และ 956 cm^{-1} ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.17 เมื่อเจือแกลเลียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ อาจเนื่องจากการฟอร์มตัวของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเมื่อเจือแกลเลียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดขึ้นเร็ว ทำให้สารตั้งต้นรวมตัวเข้ากับผลิตภัณฑ์

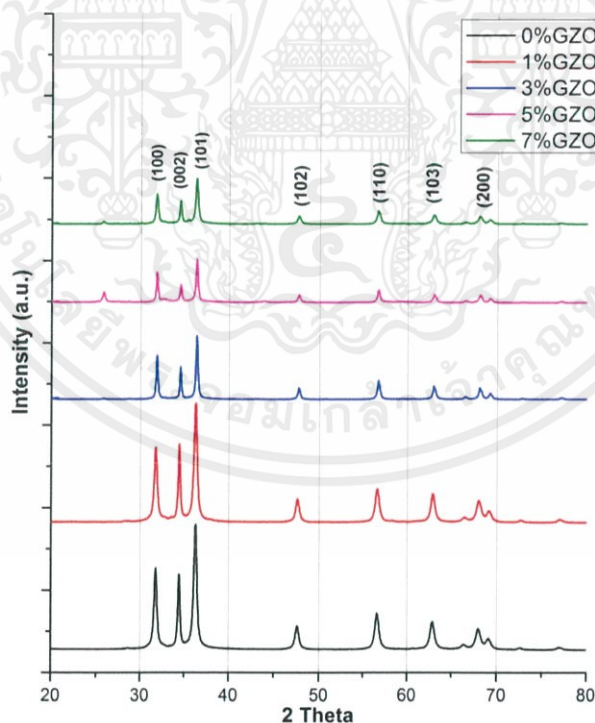


ภาพที่ 4.17 ฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

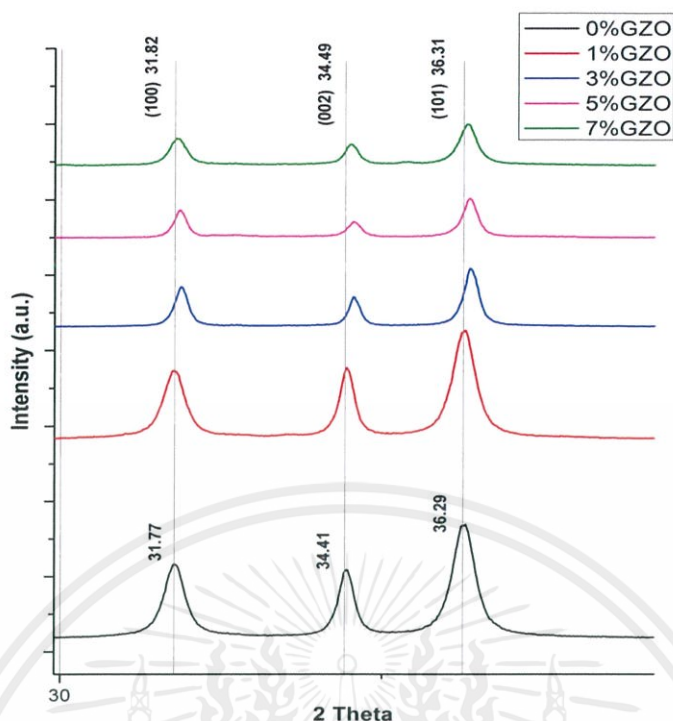
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างแสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อเจือแกกลีเทียมลงในโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ ซึ่งทราบได้โดยการแสดงออกถึงระนาบทั้ง 7 อันได้แก่ (100), (002), (101), (102), (110), (103), และ (200) และผลิตภัณฑ์ที่เจือแกกลีเทียมความเข้มข้น 0, 1, และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่มีวัฏภาคแปลกปลอม ดังภาพที่ 4.18 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของการเจือโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีวัฏภาคแปลกปลอมเกิดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือแกกลีเทียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะทำให้เกิดการเลื่อนไปทางมุมสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.19 เนื่องจากแกลเลียมเป็นธาตุที่มีรัศมีอะตอม (0.12 อังสตรอม) เมื่ออะตอมแกลเลียม Ga^{3+} เข้าไปในโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์จะเข้าไปแทนที่อะตอม Zn^{2+} รัศมีอะตอม (1.34 อังสตรอม) เนื่องจากขนาดรัศมีอะตอมใกล้เคียงกัน จึงมีผลกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ สำหรับขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคทุกเงื่อนไขที่คำนวณได้จากสมการของ Scherrer ดังตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.19 รูปขยายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุอนุภาคอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย แกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

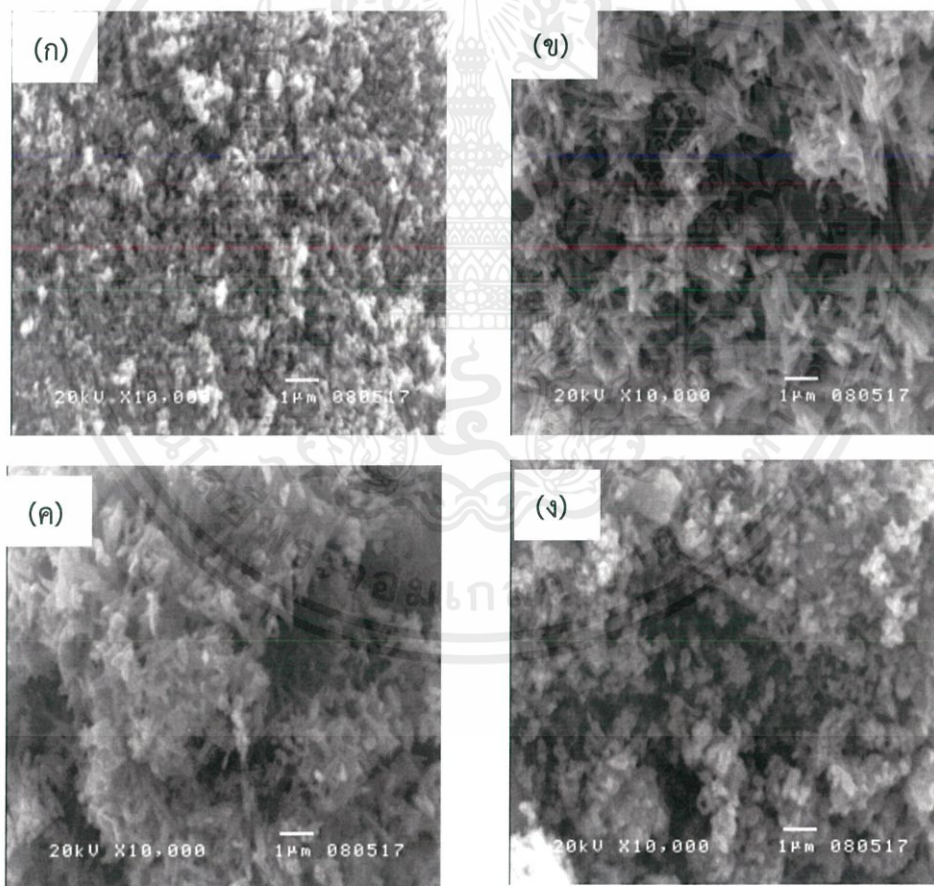
ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือแกลเลียมอัตราส่วนต่างๆ

ความเข้มข้นของ การเจือแกลเลียม	ขนาดผลึกเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าคงที่แลตทิซ (อังสตรอม)		ค่าการบิดเบี้ยว
		a-axis	c-axis	
0	21	0.324	0.520	1.019
1%	19	0.325	0.520	1.020
3%	31	0.324	0.520	1.020
5%	37	0.324	0.518	1.019
7%	35	0.323	0.518	1.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

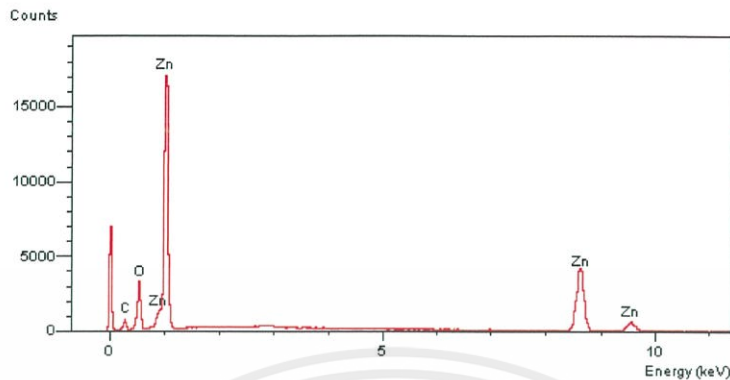
การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.20 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคขนาดเล็ก แต่เมื่อเจือโบรอนปริมาณเพิ่มขึ้นที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์จะเป็นแท่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณไปที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์จะเป็นแท่งผสมกับอนุภาคขนาดเล็ก และเมื่อเพิ่มปริมาณไปที่ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์จะเป็นอนุภาคขนาดเล็กคล้ายกับปริมาณการเจือที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการเจือโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นผลทำให้ผลลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า เมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเกิดการเปลี่ยนแปลงไป



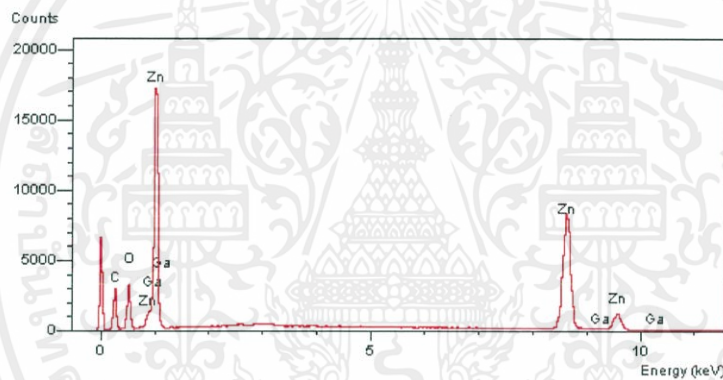
ภาพที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น (ก) 1, (ข) 3, (ค) 5 และ (ง) 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

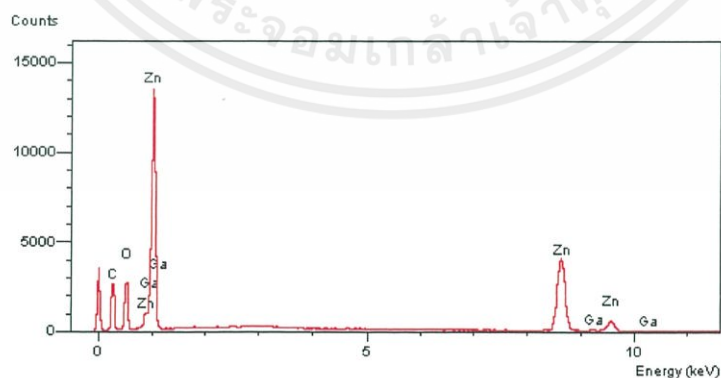
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ



ภาพที่ 4.21 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



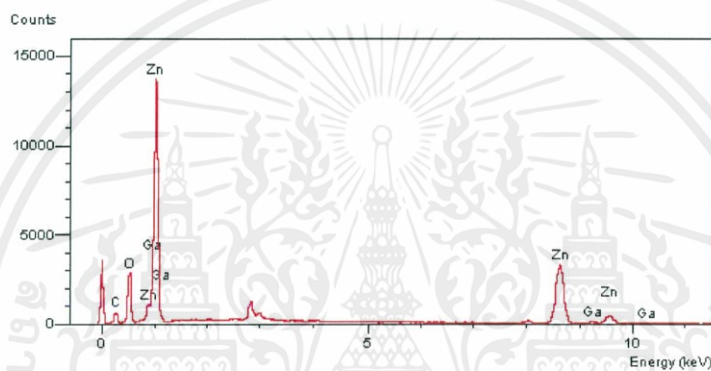
ภาพที่ 4.22 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยเกลือลิเทียมที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



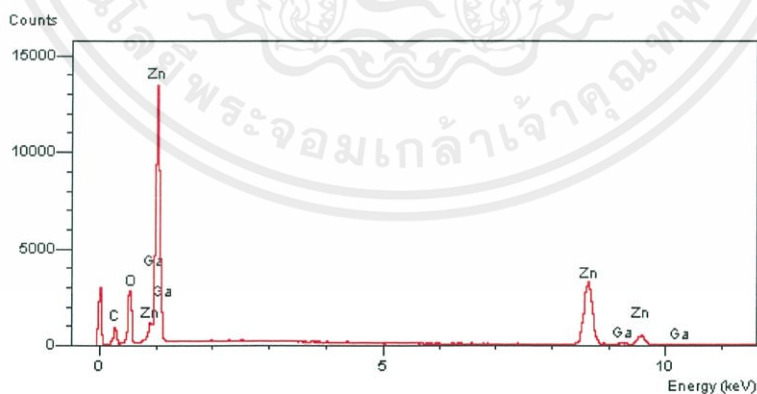
ภาพที่ 4.23 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยเกลือลิเทียมที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังภาพที่ 4.21 พบว่ามีซิงค์จากพลังงานชั้น K_{α} K_{β} L_{α} และ L_{β} อยู่ร้อยละ 76.030 และมีออกซิเจนอยู่ร้อยละ 23.970 ซึ่งสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เจือและปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.22 - 4.25 พบธาตุซิงค์, ออกซิเจน, และแกลเลียม ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสามารถเจือสารเข้าไปในอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ต้องการเจือเข้าไป



ภาพที่ 4.24 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.25 ปริมาณสารเจือจากเครื่องการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

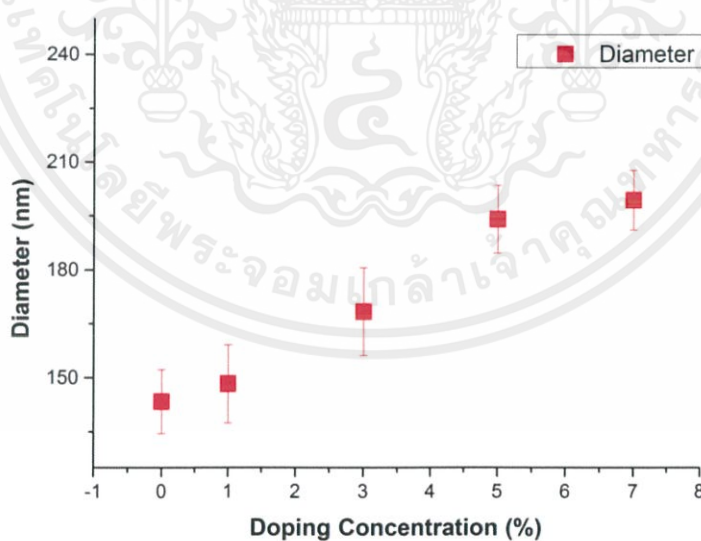
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงความเข้มข้นของเกลือของธาตุที่เป็นสารประกอบของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	ออกซิเจน	ซิงค์	เกลือ
1%	15.260	84.600	0.140
3%	19.470	77.760	2.780
5%	25.420	70.450	4.120
7%	24.940	70.000	5.060

4.4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต

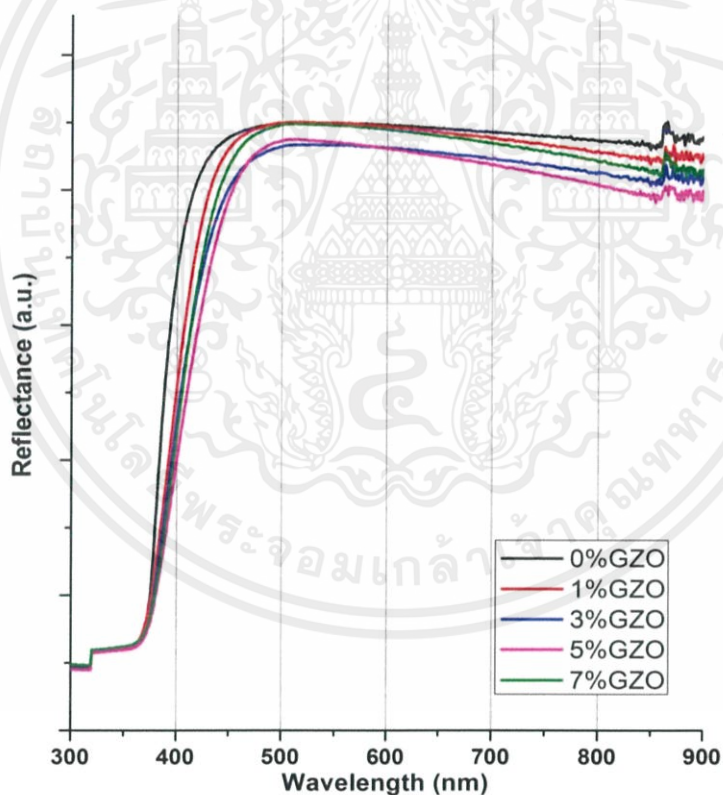
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสงแบบพลวัต พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยเกลือที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.26 โดยจะเห็นว่าอนุภาคที่เจือด้วยเกลือที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 143, 148, 168, 194 และ 199 นาโนเมตร ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการเจือด้วยเกลือ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



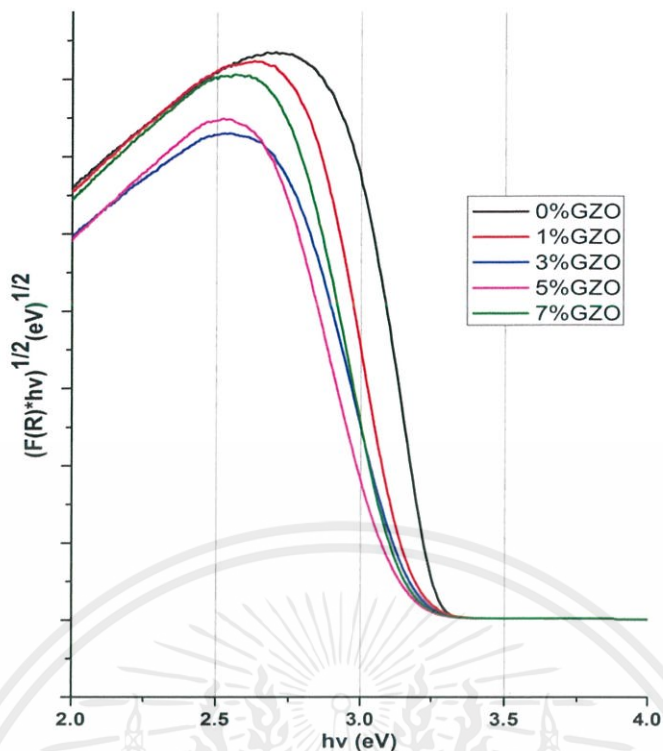
ภาพที่ 4.26 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยเกลือที่มีความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการสะท้อนแสง

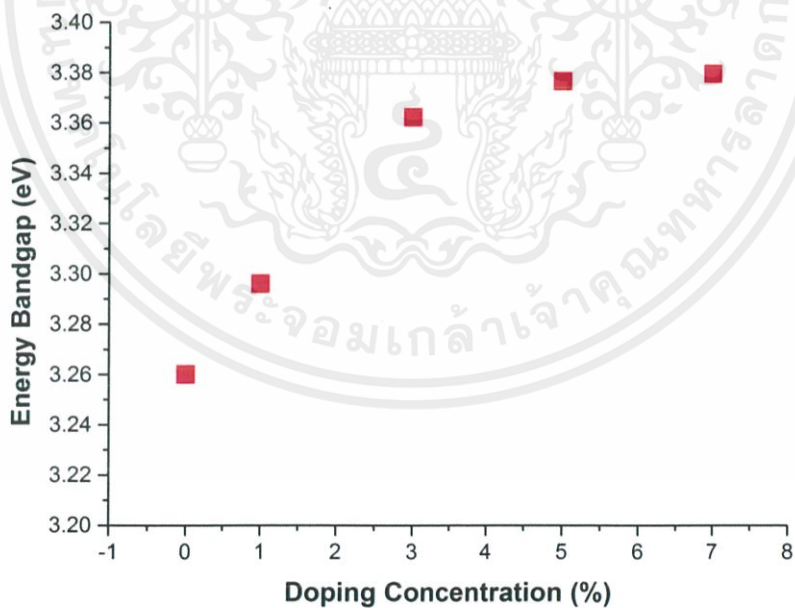
การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าจากการสเปกตรัมการสะท้อนแสงของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.27 สามารถนำมาหาช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy gap; E_g) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของสารที่มีสมบัติทางแสงได้โดยสามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Kubelka Munk เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(F(R) \cdot hv)^{1/2} (eV)^{1/2}$ กับพลังงานโฟตอน (photon energy, $h\nu$) ดังภาพที่ 4.28 จะสามารถหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้จากการหาค่าอนุพันธ์ และทำการลากเส้นตรงตัดแกน x ที่ความชันสูงสุด จากนั้นนำค่าจุดตัดแกน x มาหารด้วยค่าความชันของเส้นตรง จะได้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน ดังภาพที่ 4.29 ซึ่งค่าช่องว่างของแถบพลังงานที่ได้มีค่าประมาณ 3.261, 3.296, 3.362, 3.376 และ 3.387 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมการสะท้อนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.28 การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย
 แกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยสมการของ Kubelka-Munk

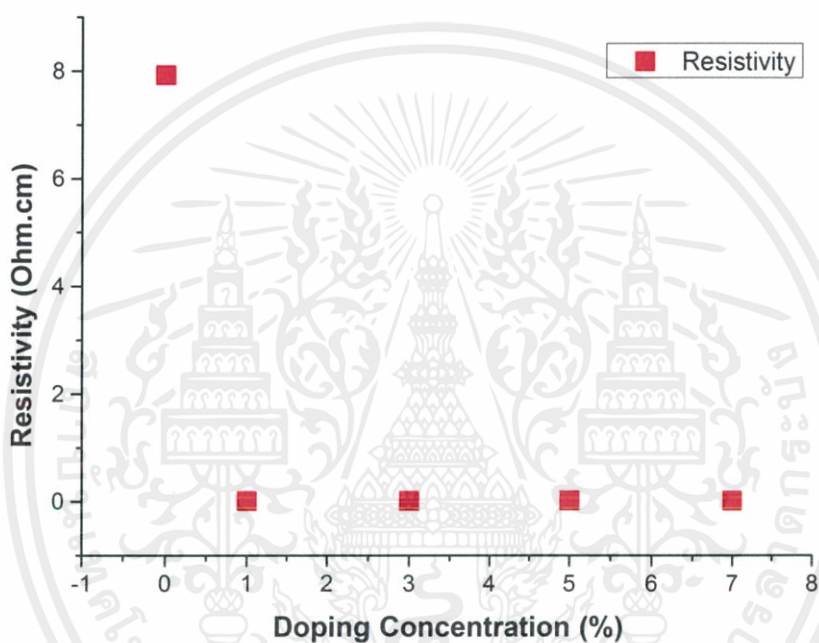


ภาพที่ 4.29 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม
 ที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยวิเคราะห์จากสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.30 สามารถคำนวณได้จากสมการความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานที่ได้มีค่าประมาณ 7.920, 0.008, 0.008, 0.016 และ 0.008 โอห์ม•เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ค่าสภาพความต้านทานของผลิตภัณฑ์ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก



ภาพที่ 4.30 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้มุ่งเน้นเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุหมู่ IIIA ได้แก่ โบรอน และแกลเลียม ด้วยกระบวนการโซโนเคมี เพื่อให้ได้ความเป็นผลึกที่ดีและเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคโดยอาศัยลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นอนุภาคทรงกลม โดยศึกษาเงื่อนไขทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือการเปลี่ยนแปลงเวลาในการให้คลื่นเหนือเสียง การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ใช้ในปฏิกิริยา และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเจือทั้งสองชนิดโดยที่สารตั้งต้นทั้งสองมีอัตราส่วนเท่ากันในปฏิกิริยา โดยการศึกษาเวลาในการให้คลื่นเหนือเสียง ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0, 10 และ 20 นาที เพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาที่มีผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการนำไปสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และในปฏิกิริยาได้ทำการศึกษาค่า pH ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 9, 10 และ 11 เพื่อศึกษาผลกระทบของค่า pH ในปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว เพื่อหาค่า pH ที่เหมาะสมในการนำไปสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สำหรับเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือสารได้ทำการศึกษาทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 0, 1, 3, 5, และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า

ผลการศึกษาเวลาการให้คลื่นเหนือเสียงที่แตกต่างกัน พบว่าที่เวลา 10 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากไม่มีวิวัฒนาการเจือปนในโครงสร้างและจากนั้นเมื่อสังเกตภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นฐาน ไม่มีความซับซ้อน สะดวกต่อการควบคุมและเติบโตในทุกระนาบเท่ากันเมื่อเทียบกับการให้คลื่นเหนือเสียงที่เวลาอื่น

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่แตกต่างกัน พบว่าที่ pH9 เป็นค่าที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากมีขนาดผลึกเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 21 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับค่า pH อื่น และใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 10 มิลลิลิตร ลดการใช้สารสิ้นเปลือง และหากสารตั้งต้นเหลือใช้อาจเกิดการก่อตัวของสารขึ้นมาใหม่

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเจือทั้งสองชนิดคือ โบรอน และแกลเลียม โดยที่สารตั้งต้นทั้งสองมีอัตราส่วนเท่ากันในปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ทำให้ขนาดผลึกไม่แตกต่างกันมาก ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุเบาที่มีเลขอะตอม 5 (รัศมีอะตอมขนาดเล็ก) จึงส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ไม่มากนัก และจากผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณพบธาตุซิงค์กับออกซิเจน แต่ไม่พบธาตุโบรอน เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนในชั้น K_{α} เท่านั้น จึงอาจจะเกิดการสลายตัวเมื่อถูกยิงด้วยรังสีเอ็กซ์ขณะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้รังสีเอ็กซ์ในการวิเคราะห์ผลสำหรับสมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าช่องว่างของแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง 3.257 ถึง 3.269 อิเล็กตรอนโวลต์ และสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าค่าสภาพความต้านทานของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง 7.920 - 7.990 โอห์ม•เซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่าการเจือธาตุโบรอนลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไม่มากนัก

ผลจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของการเจือแกลงเลียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าแกลงเลียมทำให้เกิดปฏิกิริยารวดเร็วขึ้น ทำให้สารตั้งต้นรวมตัวเข้ากับผลิตภัณฑ์ จึงส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้นยังคงหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของการเจือแกลงเลียม ส่งผลให้เกิดการเลื่อนไปทางมุมสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รวมถึงมีวัฏภาคแปลกปลอมเกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอนุภาคจากทรงกลมไปเป็นแท่ง และกลับมาเป็นทรงกลมอีกครั้งเมื่อปริมาณการเจือแกลงเลียมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอะตอมของแกลงเลียมจะเข้าไปแทนที่อะตอมของซิงค์ในโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งรัศมีอะตอมของซิงค์กับแกลงเลียมมีขนาดรัศมีอะตอมใกล้เคียงกัน จึงมีผลกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ พบว่าแกลงเลียมมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณสารที่เจือเข้าไปในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สำหรับสมบัติทางแสงของผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าช่องว่างของแถบพลังงานมีเปลี่ยนแปลงในช่วง 3.296 ถึง 3.376 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากค่าสภาพความต้านทานของผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 7.920 ไปยัง 0.008 โอห์ม•เซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่าการเจือธาตุแกลงเลียมลงในอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถปรับปรุงสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการโซเคมี เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ใช้เวลาน้อย และไม่ต้องเผาที่อุณหภูมิสูง การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์โดยการโซเคมีจึงเป็นวิธีที่ที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

5.2.1 ก่อนเริ่มทำการทดลองควรศึกษาข้อมูลให้เข้าใจก่อนลงมือทำเพื่อช่วยลดขั้นตอนก่อนและความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง

5.2.2 ในกระบวนการล้างตะกอนต้องทำซ้ำเพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์เป็นกลาง หากวัดค่า pH ด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ ควรจะมีค่าเป็น pH 4.5 - 5

5.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการไล่ความชื้นแล้ว หากโดนความชื้นในอากาศจะทำให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนและสูญเสียสมบัติต่างๆไป ซึ่งแก้ไขได้โดยเก็บผลิตภัณฑ์ใส่ขวดที่แห้งสนิท ป้องกันความชื้นด้วยจุกยางในทันที

5.2.4 ทำการทดลองซ้ำ เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อลดข้อผิดพลาด

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในทำการทดลองควรสวมอุปกรณ์ป้องกันตนเองทุกครั้ง ตัวอย่างเช่น การสวม สวมหน้ากาก สวมชุดกาวน์ แวนตา เป็นต้น เพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมี

5.3.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคขนาดอนุภาค ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นั้นสามารถช่วยยืนยันสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปได้ แต่อาจจะยังไม่ชัดเจนนัก และจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานสำหรับการทดลองนี้ยังไม่สามารถตรวจพบธาตุโบรอนได้ เพื่อเป็นการพัฒนางานวิจัยควรจะนำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ตัวอย่างเช่น (Field Emission Scanning Electron Microscopy; FESEM) ทำให้ทราบขนาดของอนุภาคที่แม่นยำ (Photo Luminescence; PL) ทำให้ทราบสมบัติทางแสงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS) ทำให้ทราบว่าสารที่เจือเข้าไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานใด (Inductively Coupled Plasma; ICP) ทำให้วิเคราะห์ธาตุได้โดยใช้พลาสมาที่อุณหภูมิสูงและวิเคราะห์ธาตุจำนวนมากได้พร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] A. Hedayati, Z.Golestan ,Kh.Ranjbar and G.H. Borhani (2011). Effect of ball milling on formation of $ZnAl_2O_4$ by reduction reaction of ZnO and Al powder mixture. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 50: 27-34.
- [2] Khanitta Intarasuwan, Pongsaton Amornpitoksuk, Sumetha Suwanboon. (2013). Effect of the mixing rate on the morphology and photocatalytic activity of ZnO powders prepared by a precipitation method. Advanced Powder Technology. 24: 999-1005.
- [3] Lichen Zhao, Gang Chen , Yansong Zhou, *et al.* (2014). Synthesis of GaN:ZnO solid solution photocatalysts with hollow polyhedral morphology through a molten-salt-assisted nitridation method. Materials Letters. 128: 319-321.
- [4] L. Muñoz-Fernandez, A. Sierra-Fernandez, et al. (2016). Solvothermal synthesis of Ag/ZnO and Pt/ZnO nanocomposites and comparison of their photocatalytic behaviors on dyes degradation. Advanced Powder Technology. 27: 983-993.
- [5] Qusay A.H. Al-Nasera ,Jian Zhou ,Guizhen Liua, Lin Wang. (2016). ZnO single crystal microtubes: Synthesis, growth mechanism, and geometric structure using direct microwave irradiation. Ceramics International. 42: 828-833.
- [6] Nimesh Pokhrel ,Phani Kiran Vabbina ,Nezih Pala. (2016). Sonochemistry: Science and Engineering. Ultrasonics Sonochemistry. 29: 104-128.
- [7] Sonochemical (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://www.sonochemistry.info/introduction.htm> [5 พฤศจิกายน 2559]
- [8] โชนเคมี (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://www.vcharkarn.com/vblog/40232> [5 พฤศจิกายน 2559]
- [9] Dung The Nguyen and Kyo-Seon Kim. (2015). Structural evolution of highly porous/hollow ZnO nanoparticles in sonochemical process. Chemical Engineering Journal. 276: 11-19
- [10] S.D. Senol ,O.Ozturkb and C.Terziođlu.(2015). Effect of boron doping on the structural, optical and electrical properties of ZnO nanoparticles produced by the hydrothermal method. Ceramics International. 41:11194-11201.

- [11] Prantik Banerjee, et al. (2012). Zinc oxide nano-particles – Sonochemical synthesis, characterization and application for photo-remediation of heavy metal. *Ultrasonics Sonochemistry*. 19: 85-93.
- [12] นาโนเทคโนโลยี (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก : <http://www2.nanotec.or.th/th/?p=1137>
[14 มิถุนายน 2560]
- [13] นาโนเทคโนโลยี (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก : <http://www.vcharkarn.com/varticle/324>
[14 มิถุนายน 2560]
- [14] การใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการแปรรูปอาหาร (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : conf.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/79_file.pdf [12 พฤศจิกายน 2559]
- [15] การสังเคราะห์วัสดุนาโน (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm> [13 พฤศจิกายน 2559]
- [16] R. Swapnaa, K. Venkateswarlub and M.C.Santhosh Kumar. (2015). Heat Treatment Impact on the Properties of Na and N Dual Doped ZnO Thin Flms by Spray Pyrolysis. *Procedia Materials Science*. 10: 714-722.
- [17] M. Hjiri, et al. (2015). CO sensing properties of Ga-doped ZnO prepared by sol-gel route. *Journal of Alloys and Compounds*. 634: 187-192.
- [18] Ali Khorsand Zak, et al. (2016). XPS and UV-vis studies of Ga doped zinc oxide nanoparticles synthesized by gelatin based sol-gel approach. *Ceramics International*. 42: 13605-13611.
- [19] Seung-Ho Jung, et al. (2008). Sonochemical Preparation of Shape-Selective ZnO Nanostructures. *Crystal Growth and Design*. 8: 265-269
- [20] นางสาวพัชรา นวลเพชร. (2555). การตรวจวิเคราะห์ห้มย้อมสีทางนิติวิทยาศาสตร์โดยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry และเทคนิค Attenuated Total Refection Fourier Transform Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [21] I. Ghiloufi, et al. (2016). Ga-doped ZnO for adsorption of heavy metals from aqueous solution. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 42: 102-106
- [22] Sung-Doo Baek, et al. (2016). Low-Temperature Facile Synthesis of Sb-Doped p-Type ZnO Nanodisks and Its Application in Homojunction Light-Emitting Diode. *Applied Materials and Interfaces*. 8: 13018-13026
- [23] โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://www.chemexplore.net/wurtzites.htm> [10 พฤศจิกายน 2559]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

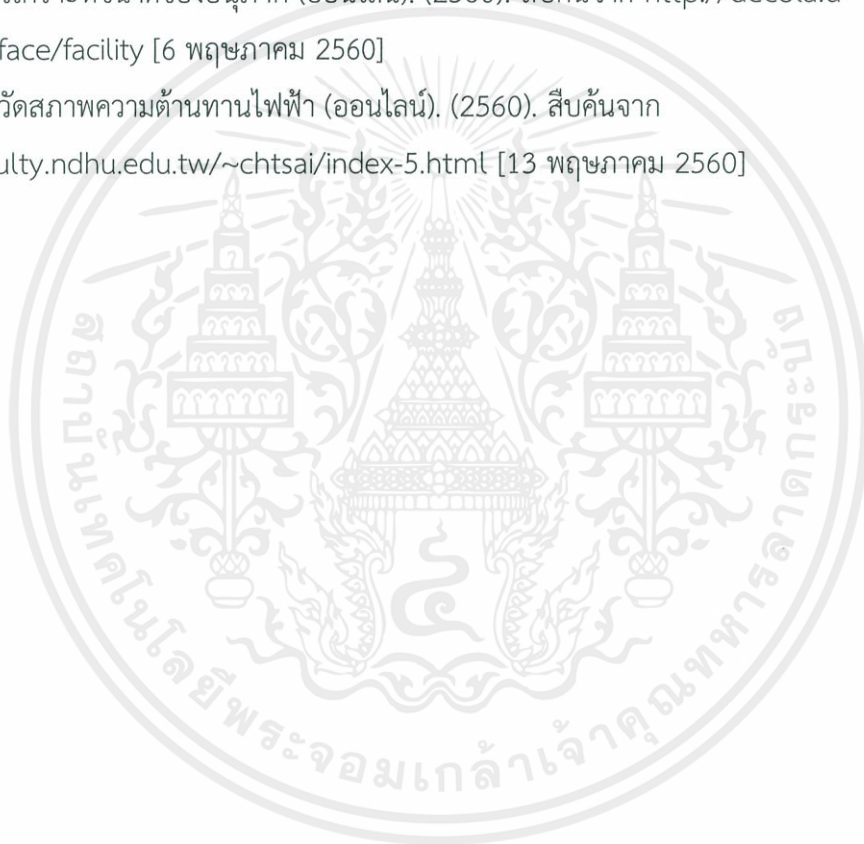
- [24] ประเภทของคลื่นเสียง (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<https://www.pinterest.com/pin/482800022527330728/> [5 ธันวาคม 2559]
- [25] เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<http://www.sonochemistry.info/introduction.htm> [6 ธันวาคม 2559]
- [26] อัลตราโซนิกฟลอตเทคเตอร์ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<http://www.directindustry.com/prod/beijing-time-high-technology/product-21684-376781.html> [8 ธันวาคม 2559]
- [27] หลักการเกิดปรากฏการณ์ดอปเปอ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<http://www.plaindsp.com/unravelling-doppler-effect-plaindsp/> [8 ธันวาคม 2559]
- [28] อ่างอัลตราโซนิกแบบทั่วไป (ออนไลน์). (2559). สืบค้น
จาก :http://www.coleparmer.com/Product/Cole_Parmer_ultrasonic_cleaner_
[8 ธันวาคม 2559]
- [29] อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น (ออนไลน์). (2559). สืบค้น
จาก :<http://www.sonicator.com/55-cup-horn-15-cup.html> [9 ธันวาคม 2559]
- [30] ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://www.nano-lab.com/ultrasonic-probe-dispersion-equipment.html> [10 ธันวาคม 2559]
- [31] ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (ออนไลน์). (2559). สืบค้น
จาก :<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.54.07HE13> [10 ธันวาคม 2559]
- [32] มิติของวัสดุนาโนแบบต่างๆ (ออนไลน์). (2559). สืบค้น
จาก :<https://www.researchgate.net/topic/nanoarchitecture> [15 ธันวาคม 2559]
- [33] ระบบการโซโนเคมี (ออนไลน์). (2559). สืบค้น
จาก :<https://www.hielscher.com/ultrasonic-crystallization-and-precipitation.htm>
[17 ธันวาคม 2559]
- [34] การเจือสาร (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก : <http://slideplayer.com/slide/9384773/>
[21 ธันวาคม 2559]
- [35] การสั่นในโมเลกุลการสั่นแบบยืดและการสั่นแบบงอ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302265/Spectro.pdf
[26 ธันวาคม 2559]
- [36] หลักการของอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์โหมด ATR (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<http://www.sesame.org.jo/sesame/machine-and-beamlines/beamlines/phase-1/day-one-beamlines/infrared-beamline-emira/85-uncategorised/281-performing-ft-ir-spectroscopy-at-sesame.html> [26 ธันวาคม 2559]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] แสดงหมู่ฟังก์ชันสามัญที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/spectro-IR.pdf
[26 ธันวาคม 2559]
- [38] ตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัม (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/spectro-IR.pdf
[26 ธันวาคม 2559]
- [39] กฎของแบรกก์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในระนาบผลึก (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<https://cantorscience.org/2016/07/15/x-rays-arsenic-and-essie-top-coat/>
[29 ธันวาคม 2559]
- [40] การเกิดรังสีเอกซ์ (ออนไลน์). (2559). สืบค้นจาก :
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1882761614000258>
[29 ธันวาคม 2559]
- [41] ระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก :
<https://sseaim.es.wordpress.com/tag/lattice-structure/> [15 มกราคม 2560]
- [42] ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก
<http://www.slideshare.net/TheSlaps/microbiology-ch-04-ecturepresentation>
[15 มกราคม 2560]
- [43] การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ออนไลน์). (2560).
สืบค้นจาก <https://sites.ualberta.ca/~ccwj/teaching/microscopy/> [15 มกราคม 2560]
- [44] ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงพลังงาน (ออนไลน์). (2560). สืบค้น
จาก http://mccff.mtu.edu/acmal/electronmicroscopy/MA_EDS_Basic_Science.htm
[14 กุมภาพันธ์ 2560]
- [45] หลักการของเครื่องวัดการสะท้อนแสง (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก http://www.fhi-berlin.mpg.de/acnew/departement/pages/teaching/pages/teaching__wintersemester__2016_2017/annette_trunschke__diffuse_reflectance_spectroscopy__161111.pdf
[13 กุมภาพันธ์ 2560]
- [46] เครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงแบบลำแสงคู่ (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก
<http://www.coffeelabequipment.com/COFFEETRAK2.html> [13 มีนาคม 2560]
- [47] เครื่องวัดสภาพการต้านทานของไฟฟ้าด้วยเข็มวัด 4 จุด (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก
[file:///C:/Users/Umim%20Pornchanok/Downloads/254_74-79%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Umim%20Pornchanok/Downloads/254_74-79%20(1).pdf)
[13 มีนาคม 2560]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก <http://www.htds.fr/fr/laboratoire/instrumentationanalytique/spectroscopie-moleculaire/spectrometre-ftir-nir/spectrometre-ftir-spectrum-2/> [6 เมษายน 2560]
- [49] เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก <https://www.oxfordinstruments.com/businesses/nanotechnology/nanoanalysis/campaigns/aztec-2-2> [13 เมษายน 2560]
- [50] เครื่องวัดการทะลุผ่านของแสง (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก <http://www.chemeng.upatras.gr/en/content/shared-research-facili> [4 พฤษภาคม 2560]
- [51] เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก <http://decola.u-strasbg.fr/face/facility> [6 พฤษภาคม 2560]
- [52] เครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ออนไลน์). (2560). สืบค้นจาก <http://faculty.ndhu.edu.tw/~chtsai/index-5.html> [13 พฤษภาคม 2560]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการทำงานวิจัย									
	พ.ศ. 2559					พ.ศ. 2560				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
1.ศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือB/Ga โดยวิธีโซโนเคมี	→									
2.ออกแบบการทดลอง		→								
3.ทำการทดลองสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือ B/Ga			→							
4.ตรวจวิเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือ B/Ga				→						
5.ทดสอบผลการทดลอง								→		
6.วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล								→		
7.จัดพิมพ์รูปเล่ม				→					→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นางสาวพรชนก ศิริจตุรพร เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาในปีการศึกษา 2556 จากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย แขวงสามเสนใน เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร และในปีการศึกษา 2556 ได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการ

1. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการในงาน Science and Technology of Emerging Materials (STEMa 2016). ในระหว่างวันที่ 27 – 29 กรกฎาคม 2559 ณ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการในงาน The 4th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics (SACT 2016). ในระหว่างวันที่ 15 – 18 ธันวาคม 2559 ณ จังหวัดดานัง ประเทศเวียดนาม
3. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการในงาน The 3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA 2017). โดยนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ ในระหว่างวันที่ 31 – 2 มิถุนายน 2560 ณ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้