

การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของอัตราส่วนระหว่างซิงค์ออกไซด์และ  
อะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด

STRUCTURAL STUDIES ON ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PREPARED BY MECHANICAL BALL  
MILLING PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของอัตราส่วนระหว่างซิงค์ออกไซด์และ  
อะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRUCTURAL STUDIES ON ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PREPARED BY MECHANICAL  
BALL MILLING 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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

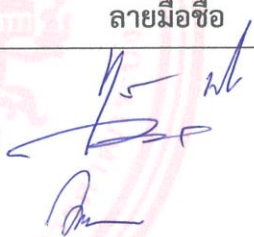
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของอัตราส่วนระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์  
ด้วยกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด

Special Project Title STRUCTURAL STUDIES ON ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PREPARED BY MECHANICAL BALL MILLING  
PROCESS

นักศึกษา นาย ญาณวุฒิ วงศ์หอม  
รหัสประจำตัว 55110015  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วณิชยา เมฆประสาท  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ทศติยาภรณ์	ทิวาวงศ์	
รศ.ดร. วิษณุ	เพชรภา	
ดร. วณิชยา	เมฆประสาท	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่.....(17).....เดือน.....(พฤษภาคม).....พ.ศ. 2559  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของอัตราส่วน  
ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์  
ด้วยกระบวนการบัดเชิงกลด้วยลูกบิด

นักศึกษา

นายญาณวุฒิ วงศ์หอม

รหัสประจำตัว

55110015

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วณิชยา เมฆประสาท

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เมื่อมีอัตราส่วนเปลี่ยนไป โดยมีกระบวนการบัดเชิงกลด้วยลูกบิดเป็นกระบวนการในการผสมและทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง มีการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นปัจจัยเพิ่มเติม ผ่านการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปี การตรวจสอบระนาบโครงผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สารผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง เกิดเป็นวัสดุประกอบ โดยสารผสมอัตราส่วนโมล 10:90 และ 20:80 จะเกิดเป็นวัสดุประกอบของสารอะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนต ที่อัตราส่วนโมล 30:70 และ 40:60 เป็นสารซิงค์อะลูมิเนต อัตราส่วน 50:50 และ 70:30 เป็นสารประกอบระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เผาสูงขึ้น สารจะมีการหลอมติดกันมากขึ้น ซิงค์ออกไซด์มีความเป็นโครงผลึกลดลง และซิงค์อะลูมิเนตที่เกิดขึ้นมีความเป็นโครงผลึกชัดเจนมากขึ้น

คำสำคัญ : กระบวนการบัดเชิงกลด้วยลูกบิด, ซิงค์ออกไซด์, อะลูมิเนียมออกไซด์

Special Project Title	Structural Studies on ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Prepared by Mechanical Ball Milling Process
Student	Mr. Yannawut Wonghom
Student ID	55110015
Degree	Bachelor of Engineer
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project advisor	Dr. Wanichaya Mekprasart

### Abstract

This special project studies on structural properties of the different ratios between zinc oxide (ZnO) and aluminium oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) via mechanical ball milling process. The products from this process were in homogenous feature and reduced particle size compared with starting materials. Moreover, calcination temperature at 900 and 1000 °C were additional factor to study its structure and morphology. Chemical bonding structure of the mixture was analyzed by Raman spectroscopy. The crystalline structure and plane were characterized by X-ray diffractometer. Overall morphology of the product was monitored by scanning electron microscope. Structural transformation of the mixture was occurred by calcined at 1000 °C. For ZnO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 10:90 and 20:80, the products were properly in composite form between Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and zinc aluminate (ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Meanwhile, the product in ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> phase was obtained at ZnO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio 30:70 and 40:60. For increasing ZnO phase at 50:50 and 70:30, the composite material between zinc oxide and zinc aluminate was obviously obtained. Moreover, the decrease of zinc oxide crystalline was occurred in XRD pattern after increasing calcination temperature resulting in the increase of preferred ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> phase in the mixture at high temperature in the system.

Keywords : Ball milling, Zinc oxide, Aluminium oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จบลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วณิชยา เมฆประสาท สำหรับคำแนะนำ และแนวทางในการดำเนินโครงการพิเศษ ตลอดจนวิธีแก้ไขปรับปรุง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินโครงการ แม้ในตอนแรกผู้ดำเนินโครงการจะรู้สึกไม่พอใจ บ้าง แต่พอได้นั่งคิด พิจารณาก็พบว่าคำพูดที่ท่านอาจารย์แนะนำนั้นมีค่ายิ่งกว่าเพชร ยิ่งกว่าทองคำ ใดๆเสียอีก ขอขอบคุณอีกครั้งสำหรับความเมตตากรุณาที่มอบให้แก่ผู้ดำเนินโครงการ ขอขอบคุณ คณาจารย์ รุ่นพี่ เพื่อนๆ ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่านที่คอยแนะนำใน หลากๆเรื่อง คอยเตือนสติ และให้กำลังใจ ขอขอบคุณคุณพ่อบุญถึง และคุณแม่เทียนพร วงศ์หอมที่คอย ให้คำปรึกษาในปัญหาต่างๆ คอยช่วยเหลือ และพูดคุยสร้างกำลังใจ ขอขอบคุณผู้ผลิตงานวิจัย สื่อ เว็บไซต์ต่างๆที่ผลิตผลงานคุณภาพดีที่ทำให้ข้าพเจ้าได้เข้าใจเรื่องราวต่างๆจนทำให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่ อำนวยความสะดวก ทั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆในการดำเนินโครงการ กล่าวได้ว่าวิทยาลัยนาโนฯเปรียบเสมือน บ้านหลังที่ 2 ของข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษของข้าพเจ้าจะเป็นประโยชน์ให้แก่บุคคล ที่สนใจต่อไป

ญาณวุฒิ วงศ์หอม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO).....	4
2.1.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ.....	4
2.1.2 การนำไปใช้งาน.....	6
2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	8
2.2.1 ลักษณะและสมบัติทางภาพ.....	8
2.2.2 การนำไปใช้งาน.....	9
2.3 กระบวนการบัดด้วยลูกบิด.....	9
2.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	9
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบัดด้วยลูกบิด.....	10
2.4 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง.....	15
2.4.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Particle size analyzer).....	15
2.4.2 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	16
2.4.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer).....	17
2.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	19
2.5 ทบทวนวรรณกรรม.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.1.1 สารเคมี.....	26
3.1.2 อุปกรณ์.....	26
3.2 ขั้นตอนในกระบวนการบดด้วยลูกบดระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์. 28	
3.2.1 การคำนวณหาอัตราส่วนโมลระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียม- ออกไซด์.....	28
3.2.2 การเตรียมสารที่ใช้ในกระบวนการบดด้วยลูกบด.....	29
3.2.3 การเตรียมสารเพื่อนำไปวัดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค.....	29
3.2.4 ขั้นตอนการนำสารผ่านการเผา.....	30
3.3 เทคนิคการวิเคราะห์.....	30
3.3.1 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Particle Size Analyzer).....	30
3.3.2 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy).....	31
3.3.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer).....	31
3.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	32
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง.....	33
4.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการบดด้วยลูกบด.....	33
4.2 การเปรียบเทียบการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมอัตรา ส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการ บดเชิงกลด้วยลูกบดก่อน และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	34
4.2.1 ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของสารผสม.....	35
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลของสารผสม.....	38
4.3 การเปรียบเทียบการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียม ออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบดก่อน และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	46

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ.....	46
4.3.2 การคำนวณขนาดโครงสร้างผลึกด้วยสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer Equation).....	47
4.3.3 การตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารอัตราส่วนโมลต่างๆ.....	48
4.4 การเปรียบเทียบการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เมื่อผ่านกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	57
4.4.1 ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของสารผสมสัณฐานวิทยาของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	57
4.4.2 การตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารอัตราส่วนโมลต่างๆ.....	59
4.5 การวิเคราะห์ลักษณะสารผสมที่อัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ.....	65
4.5.1 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	65
4.5.2 ผลจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	70
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงชนิดและสมบัติของลูกบิด.....	13
3.1 ตารางแสดงอัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ในการบัด.....	28
4.1 ตารางแสดงขนาดโครงผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการบัดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	47
4.2 ตารางแสดงขนาดโครงผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ อัตราส่วน 5:5 ผ่านการบัดก่อนเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศา เซลเซียส.....	68



# สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

2.1 ลักษณะของซิงค์ออกไซด์.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	5
2.3 ลักษณะของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	8
2.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	9
2.5 กระบวนการบัดด้วยลูกบด.....	10
2.6 การคำนวณความเร็ววิกฤต.....	11
2.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดที่ความเร็วในการหมุนต่างกัน.....	12
2.8 มุมคาตาแล็กซ์ตั้ง.....	13
2.9 ปริมาตรลูกบดที่ใส่ในหม้อบด.....	14
2.10 เครื่องวัดขนาดของอนุภาค.....	15
2.11 การกระเจิงของแสงตามทฤษฎีของมี.....	15
2.12 หลักการทำงานของเครื่องวัดขนาดอนุภาค.....	16
2.13 รามานสเปกโตรสโคปี.....	17
2.14 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	18
2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	19
2.16 ผลจากการวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	20
2.17 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ MCM-41 ที่เวลาบดต่างๆ.....	22
2.18 ผลจากการวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่เวลาบดต่างๆ.....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.3 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค.....	30
3.4 รามานสเปกโตรสโคปีที่ใช้.....	31
3.5 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้.....	31
3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่บดด้วยเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง.....	33
4.2 เปรียบเทียบผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา.....	35
4.3 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	36
4.4 เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	37
4.5 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อน และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	38
4.6 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	39
4.7 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	40
4.8 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่วโมง และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	41
4.9 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	42
4.10 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	44
4.12 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของซิงค์ออกไซด์หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	45
4.13 เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	47
4.14 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ตั้งต้น และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	49
4.15 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	50
4.16 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	51
4.17 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	52
4.18 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	53
4.19 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 ผลจากการตรวจสอบระบบนาบโครงสร้างของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	56
4.21 ผลจากการตรวจสอบระบบนาบโครงสร้างของสารซิงค์ออกไซด์ตั้งต้น และหลังจากผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	57
4.22 ลักษณะอสังฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบด และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) 0:100, (ข) 10:90, (ค) 20:80, (ง) 30:70, (จ) 40:60, (ฉ) 50:50, (ช) 70:30 และ (ซ) 100:0.....	58
4.23 ลักษณะอสังฐานของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ก่อนผ่านกระบวนการบดและเผาเทียบกับหลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 600 เท่า.....	60
4.24 ลักษณะอสังฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 10:90 ที่ผ่านกระบวนการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสกำลังขยาย (ก) 10,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 600 เท่า.....	60
4.25 ลักษณะอสังฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 20:80 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 600 เท่า (ก) และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	61
4.26 ลักษณะอสังฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 600เท่า.....	62
4.27 ลักษณะอสังฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ที่ผ่านกระบวนการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 600 เท่า.....	62
4.28 ลักษณะอสังฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบด (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่าก่อนเผา และ (ข) หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ค) ที่กำลังขยาย 600 เท่าก่อนเผา (ง) และหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.29 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดหลังการเผาที่อุณหภูมิ (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 600 เท่า .....	64
4.30 ลักษณะสัณฐานของสารซิงค์ออกไซด์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) สารตั้งต้น (ข) หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 600 เท่า (ค) สารตั้งต้น (ง) หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	64
4.31 ผลการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 50:50 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส.....	66
4.32 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 50:50 (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (ค) 1000 องศาเซลเซียส และ (ง) 1100 องศาเซลเซียส.....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

โลกเรามีการวิจัยและพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ก่อนที่มนุษย์จะเป็นมนุษย์ในทุกวันนี้ ล้วนผ่านการวิวัฒนาการเรื่อยมาตั้งแต่การนำหินมาทำเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ การนำแร่ในธรรมชาติมาใช้ การผสมสารและวัสดุหลายชนิดเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ สำหรับการใช้งานที่หลากหลาย การวิจัยและพัฒนาในด้านของขนาดวัสดุแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบล่างขึ้นบน (bottom-up) และแบบบนลงล่าง (Top-down)

การศึกษาแบบบนลงล่างหรือการศึกษาแบบเชิงลึก เป็นการศึกษาเทคโนโลยีที่ทำให้วัสดุมีขนาดเล็กลงเพื่อศึกษาสมบัติใหม่ของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุที่มีขนาดเล็กลง เช่น มีพื้นที่ผิวมาก มีการเกาะตัวของวัสดุได้ดีและมีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นต้น การทำให้วัสดุมีขนาดเล็กลงแบ่งตามขนาดวัสดุได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบหยาบ และแบบละเอียด การลดขนาดแบบละเอียดเป็นการลดขนาดวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 60 ไมครอน หรือมีลักษณะเป็นผงอนุภาคเล็กๆ การลดขนาดแบบละเอียดสามารถทำได้ 2 กระบวนการ คือ การโม่ และการบด ในงานวิจัยนี้การลดขนาดแบบละเอียดด้วยกระบวนการบด กระบวนการบดสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท เช่น การบดด้วยความเร็วสูง (Jet Mill) การบดด้วยแรงสั่นสะเทือน (Vibration Mill) การบดแบบลูกตุ้ม (Pendula Mill) และการบดด้วยลูกบด (Ball Mill) เป็นต้น [1] โดยกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็ก เพิ่มพื้นที่ผิว สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด ใช้พลังงานต่ำ ไม่มีการปล่อยแก๊ส [2-3] สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาผลจากกระบวนการบดด้วยลูกบดเพื่อลดขนาดของอนุภาค โดยบดผสมด้วยอัตราส่วนโมลที่ต่างกันระหว่างอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) กับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จากนั้นนำไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อดูลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีการเริ่มศึกษาอย่างกว้างขวางในปี.ศ.1935 เนื่องจากมีสมบัติหลากหลาย เช่น ดัชนีหักเหสูง การนำความร้อนสูง ความจุความร้อนสูง มีแถบพลังงานกว้าง จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง เป็นต้น จึงสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมหลายด้าน นิยมนำไปเป็นตัวเติมผสมลงไปในวัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นผสมกับสารสำหรับเคลือบบนเซรามิก ผสมในน้ำยางเพื่อป้องกันเชื้อราและแสงยูวี นำไปผสมเคลือบลงบนเหล็กเพื่อรักษาความยืดหยุ่นป้องกันการแตกหักและเพิ่มการยึดเกาะบนพื้นผิวให้ยาวนาน เป็นต้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซิงค์ออก

ไซด์ออกมาอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าซิงค์ออกไซด์ยังคงเป็นที่สนใจของนักวิจัยและสามารถนำไปคิดต่อยอดเป็นงานวิจัยใหม่ๆ ได้อย่างมากมาย [4]

อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีสมบัติเด่นคือ เป็นฉนวนไฟฟ้า จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยประมาณร้อยละ 90 จะถูกใช้ในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม อีกร้อยละ 10 นำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สารดูดความชื้น วัสดุทนไฟในเตาเผา แผ่นรองวงจรรวม ตัวเร่งปฏิกิริยาและผสมในแก้ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอวัยวะทดแทน เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น จากการสำรวจของกระทรวงการต่างประเทศและอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น พบว่าในปี ค.ศ.1997 ญี่ปุ่นมีตลาดผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมออกไซด์ถึง 2.5 แสนล้านบาท หรือประมาณ 1 แสนล้านบาท [5-6]

ในปัจจุบันซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ทำให้สามารถนำไปหล่อหรือผสมกับวัสดุอื่นๆ ได้ง่าย เช่น การใช้เป็นฟิล์มบางอะลูมิเนียม-ซิงค์ออกไซด์ (Aluminium-doped Zinc oxide : AZO) ซึ่งราคาถูกกว่าฟิล์มบางแบบ ทิน-อินเดียมออกไซด์ (ITO) นอกจากนี้สารทั้ง 2 ชนิดยังมีสมบัติหลากหลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำสารสองชนิดนี้มาผสมกันเพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งอาจจะได้วัสดุที่มีสมบัติบางอย่างดีกว่าซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ก็เป็นได้ โดยคาดว่าจะเกิดสารซิงค์อะลูมิเนต (Zinc Aluminate;  $ZnAl_2O_4$ ) และวัสดุผสมซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $ZnO/Al_2O_3$  composite)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์โดยใช้กระบวนการบัดด้วยลูกบดระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์
- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยในกระบวนการบัดด้วยลูกบดที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสาร
- 1.2.3 ศึกษาการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง ทางเคมี และสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 การเตรียมกระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ผ่านการบดด้วยลูกบดระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ร่วมกับการเผาที่อุณหภูมิสูง
- 1.3.2 ทำการบดด้วยลูกบดระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ จากนั้นนำไปเผาโดยมีปัจจัยต่างๆ ดังนี้
  - 1.3.2.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการบด
  - 1.3.2.2 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์
  - 1.3.2.3 อุณหภูมิที่ใช้เผา
- 1.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก การวัดขนาดอนุภาค โครงสร้างพันธะเคมี และสัญญาณวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ได้

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารจากกระบวนการบดด้วยลูกบด
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์จากกระบวนการบดด้วยลูกบดที่เงื่อนไขแตกต่างกัน
- 1.4.4 ทราบถึงกระบวนการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างผลึก การวัดขนาดอนุภาค โครงสร้างทางพันธะเคมีและสัญญาณวิทยาด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ได้แก่ เครื่องวัดขนาดอนุภาค เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รามานสเปกโตรสโคปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.4.5 ทราบถึงองค์ประกอบของสารที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับวิจัยและพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide:ZnO) เป็นวัสดุซึ่งถูกขนานนามว่า “วัสดุแห่งอนาคต” เป็นวัสดุที่อยู่ในชีวิตประจำวันของคนเราโดยที่เราอาจจะไม่รู้ตัว ซิงค์ออกไซด์ถูกเริ่มพัฒนาอย่างกว้างขวางตั้งแต่ปี ค.ศ.1935 และในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาในเชิงทำเป็นสารเคลือบกระจก หรือจะเป็นการปลูกฟิล์มบางผลึกเดี่ยวลงบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กำลังเป็นที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ซิงค์ออกไซด์มีแถบพลังงานกว้างถึง 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และมีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ประมาณ 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงในย่านแสงสีน้ำเงินและสีม่วง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาในด้านอื่นๆมากมายไม่ว่าจะเป็น การนำไปใช้ในกระบวนการกักกรองทางเคมี การนำไปทำปัมป์เพื่อช่วยเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับใช้งานด้านแสง หรือการนำไปใช้งานทางการแผ่รังสี และในอนาคตอาจมีการนำไปใช้ในการผลิตหน้าจอต่างๆโดยเป็นการใช้เทคโนโลยีระดับนาโนเข้ามาช่วย ก็เป็นไปได้ [4]

##### 2.1.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

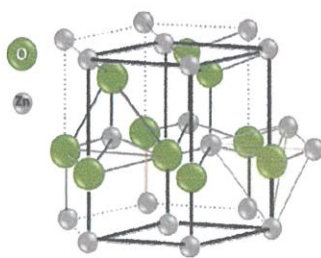
###### 2.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ซิงค์ออกไซด์สารที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ไม่มีกลิ่น มวลโมเลกุล 81.38 กรัม/โมล ความหนาแน่น 5.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 1,975 องศาเซลเซียส (°C) จุดเดือด 2,360 องศาเซลเซียส พลังงานของแถบพลังงานกว้าง 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ดัชนีหักเห 2.0041 [7-8]

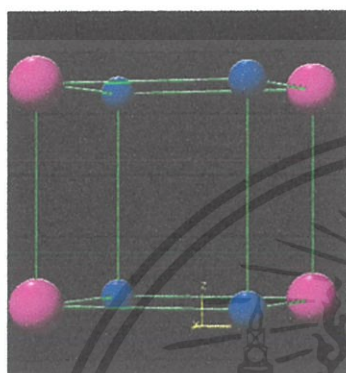


ภาพที่ 2.1 ลักษณะของซิงค์ออกไซด์ [9]

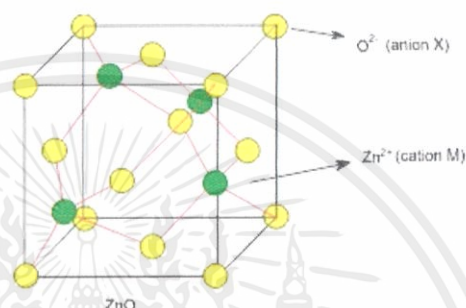
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.2 โครงผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ก) แบบเวิร์ทไซด์ (Wurtzite) (ข) ผลึกเกลือ (Rocksalt) (ค) ซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende) [10-12]

ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกลักษณะทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) แบบเวิร์ทไซด์ (Wurtzite) ลักษณะเป็น (Hexagonal) ซึ่งยูนิตเซลล์นี้จะมีค่าความกว้าง  $a = 3.2495$  อังสตรอม ค่าความสูง  $c = 5.2069$  อังสตรอม นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังมีโครงสร้างในลักษณะลูกบาศก์ (Cubic) ได้แก่ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende) และ โครงสร้างแบบผลึกเกลือ (Rocksalt) [4]

#### 2.1.1.2 สมบัติเชิงกล

ซิงค์ออกไซด์มีค่าความแข็งประมาณ 5 กิกกะปาสคาล (Gigga Pascal) ที่การทดสอบระบบเจาะพลาสติก (Plastic penetration) [4] มีความจุความร้อนและค่าการนำความร้อนสูง ค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งเหมาะจะใช้กับงานในด้านเซรามิก [10]

#### 2.1.1.3 สมบัติเชิงไฟฟ้า

ซิงค์ออกไซด์มีค่าแถบพลังงานประมาณ 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นวัสดุเปียโซอิเล็กทริก (วัสดุที่สามารถเปลี่ยนแรงเชิงกลเป็นไฟฟ้า) นำไปทำเป็นฟิล์มบางสำหรับพื้นผิวรับสัญญาณของอุปกรณ์ เป็นวัสดุทำเซ็นเซอร์รับสัญญาณการสั่นของอากาศหรือของของเหลว

## 2.1.2 การนำไปใช้งาน [13]

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่มีสมบัติหลากหลาย จึงสามารถนำไปใช้งานได้หลายๆด้าน เช่น ใช้ผสมในเครื่องสำอาง ใช้ในแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า ยาง สบู่ เป็นต้น ตัวอย่างการนำซิงค์ออกไซด์ไปใช้ในด้านต่างๆ เช่น

### 2.1.2.1 ยาง

ซิงค์ออกไซด์กว่าร้อยละ 50 จะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาง โดยจะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซิ่ง (Vulcanizing) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ยางผสมกับกำมะถันทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทนต่อแสงแดดและความร้อนมากขึ้น ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน เพิ่มความแข็งแรงพันธะระหว่างยางกับโลหะที่ผสมเข้าไป เพิ่มการกระจายความร้อนในยางสำหรับกระจายความร้อนที่ได้รับจากความเค้นที่เกิดขึ้นจากการม้วนหรือการกดทับต่างๆ เพิ่มความทนทานต่อการขีดถู ช่วยลดการหดตัวของยางเมื่อนำไปใส่แม่พิมพ์และทำให้แม่พิมพ์สะอาด

ซิงค์ออกไซด์กระจายเข้าไปในยางเพื่อเพิ่มสมบัติให้ทั่วถึง แต่ในบางกรณี เช่น การเคลือบซิงค์ออกไซด์ร่วมกับการใช้กรดไขมัน จะทำให้เกิดสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งเป็นสมบัติไม่ชอบน้ำ และเพิ่มเวลาในการกระจายตัวของสารอินทรีย์ในยาง

### 2.1.2.2 เซรามิกและคอนกรีต

เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีค่าความจุความร้อนสูง ค่าการนำความร้อนสูงและค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ จึงสามารถนำไปใช้งานในด้านเซรามิกได้ ในการใช้งานสำหรับเคลือบนั้น ซิงค์ออกไซด์จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความหนืดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ช่วยลดการราน (การเกิดเป็นรอยแตกเล็กๆบนเซรามิกแล้วค่อยๆขยายออกไป) และการร่อน (เกิดการหลุดออกของเนื้อเซรามิกบริเวณที่เคลือบไม่ติด) ช่วยเพิ่มการไหลของเนื้อเซรามิกสำหรับนำไปหล่อกำแพงเซรามิก พื้น และการใช้งานเซรามิกอื่นๆ

ในด้านคอนกรีต ซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการเซรามิกและช่วยป้องกันน้ำเข้ามาในคอนกรีตด้วย ในส่วนของการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปูนซีเมนต์ประเภท1) ซิงค์ออกไซด์ช่วยในการผลิตปูนซีเมนต์เม็ด (Cement Clinker) การเติมซิงค์ออกไซด์ลงในปูนซีเมนต์จะลดความชื้นในซีเมนต์ได้ (จากการทดลองพบว่าเติมซิงค์ออกไซด์ 0.25% จะทำให้ความชื้นเป็นศูนย์ได้ 12 ชั่วโมง หากเติม 1 ทำให้ความชื้นเป็นศูนย์ได้ 2 วัน)

### 2.1.2.3 พลาสติก

เมื่อนำซิงค์ออกไซด์มาใช้ในการผลิตพลาสติกและพอลิเมอร์ ทำให้อะคริลิกพอลิเมอร์ (Acrylic polymers) เพิ่มการป้องกันความร้อน และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลมากขึ้น ใช้เป็นตัวรักษาสมดุล ป้องกันรังสียูวี และเพิ่มความทนต่อแรงดึงในพอลิเมอร์ตระกูลพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) พอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) พอลิคลอโรฟลูออโรเอทิลีน (Polychlorofluoroethylene) และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ผสมกับพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสามารถนำไปใช้ผลิตหมวกนิรภัย แก้วใสในสนามแข่งขัน เสื่อ กระเป๋า และเส้นใยต่างๆ

### 2.1.2.4 เครื่องสำอาง

ซิงค์ออกไซด์จะทำให้เครื่องสำอางติดไปกับผิว ช่วยลดรังสียูวีเอ (UVA 320-400 nm) และยูวีบี (UVB 290-320 nm) ซึ่งขนาดของซิงค์ออกไซด์ที่ช่วยลดรังสียูวีได้ดีอยู่ในช่วง 20-30 นาโนเมตร แต่โดยทั่วไปจะใช้ขนาด 30-200 นาโนเมตร มีการผสมน้ำมันซิลิโคน ซิลิโคนออกไซด์หรืออะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์เมื่อนำไปทบบนผิวหนัง

ในทางการแพทย์ ซิงค์ออกไซด์มีส่วนช่วยรักษา ทำให้แผลมีความชุ่มชื้นและสะอาด นอกจากนี้เมื่อผสมลงไปในโลชั่นหรือครีมจะช่วยรักษาสิวหรือการติดเชื้อราต่างๆ เช่น เกื้อบนบริเวณเท้า และยังสามารถผสมลงไปในแชมพูสระผมสูตรกำจัดรังแคเพื่อรักษาอาการคันที่ผิวหนังศีรษะ

### 2.1.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปัจจุบันในการสังเคราะห์เมทานอล (methanol) สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยความดันต่ำ (50-100 บาร์) และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น คอปเปอร์ ซิงค์ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตเมทานอลจะถูกเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วม ระหว่าง คอปเปอร์คาร์บอเนต ซิงค์คาร์บอเนต และอะลูมิเนียมคาร์บอเนต จากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์ผสม อัตราส่วนของออกไซด์ผสมนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละแห่ง แต่จะมี คอปเปอร์คาร์บอเนตประมาณ 40-80 % ซิงค์ออกไซด์ 10-30% และอะลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 5-10%

## 2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide:  $Al_2O_3$ ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อะลูมินา เป็นวัสดุที่อยู่ในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมหลายประเภท พบได้ในรูปของแร่คอร์รันดัม (Corundum) หากมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างของอะลูมินาจะทำให้เกิดสี เกิดเป็นแร่ใหม่ซึ่งมีความสวยงาม เช่น ทับทิมเกิดจากแร่โครเมียมอยู่ในเนื้ออะลูมินา เหล็กและไทเทเนียมจะทำให้เกิดสีฟ้า เป็นต้น นิยมนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมเซรามิก เช่น ลูกบดสาร วัสดุทนไฟ และถ้วยเผาสาร นำไปใช้ในการผลิตโลหะอะลูมิเนียมและใช้เป็นสารดูดความชื้น [6]

### 2.2.1 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

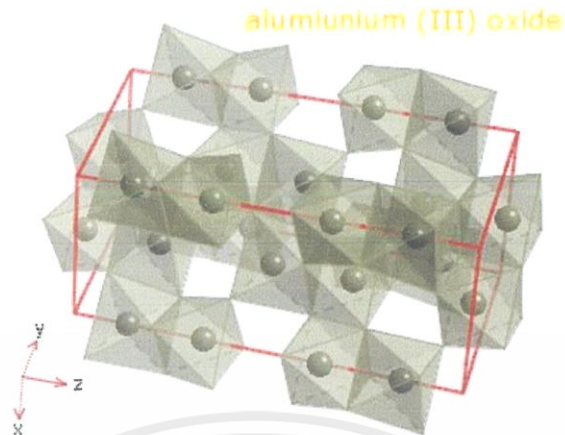
#### 2.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

อะลูมิเนียมออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ พบได้ในรูปของแร่คอร์รันดัม (Corundum) หากมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างของอะลูมินาจะทำให้เกิดสี เกิดเป็นแร่ใหม่ซึ่งมีความสวยงาม เช่น ทับทิมเกิดจากแร่โครเมียมเข้าไปอยู่ในเนื้ออะลูมินา เหล็กและไทเทเนียมจะทำให้เกิดสีฟ้า เป็นต้น มวลโมเลกุล 101.96 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 3.4-4.0 กรัมต่อโมล จุดเดือด 2,977 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 2,072 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงรองจากเพชร มักพบเป็นโครงสร้างผลึกเฟสโพลีมอร์ฟิก (Polymorphic phase;  $\alpha$ ) [14]



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของอะลูมิเนียมออกไซด์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ [16]

#### 2.2.1.2 สมบัติในด้านต่างๆ

อะลูมิเนียมออกไซด์มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีจุดหลอมเหลวสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นสารดูดความชื้น มีความแข็งสูง มีความต้านทานต่อสารเคมี ทนต่อการขีดข่วนและสึกกร่อนสูง เป็นต้น อะลูมิเนียมออกไซด์จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย [6]

#### 2.2.2 การนำไปใช้งาน

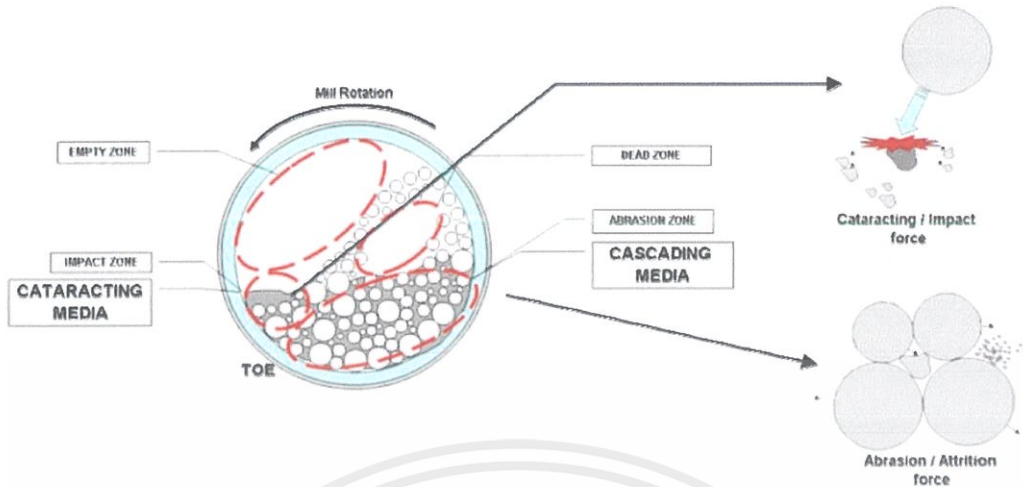
อะลูมิเนียมออกไซด์โดยส่วนใหญ่ (กว่า90%) จะถูกนำไปใช้ในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม นอกจากนั้นใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ฟิลเลอร์สำหรับบรอน วัสดุขัดถู แบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบุพื้น ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร เป็นต้น

### 2.3 กระบวนการบดด้วยลูกบด

#### 2.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

กระบวนการบดด้วยลูกบด (Ball Mill) เป็นกระบวนการบดละเอียดโดยอาศัยการหมุนของหม้อบด เพื่อให้ลูกบดภายในตกลงมากระทบอนุภาควัสดุภายในจนเกิดการแตกหัก และเกิดการขัดสี (Abrasion) กันระหว่างลูกบดกับอนุภาค ทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่เล็กและขนาดใกล้เคียงกัน การบดด้วยลูกบดสามารถแบ่งตามลักษณะการบดได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การบดแบบแห้ง (Dry Milling) และแบบเปียก (Wet Milling) ในเชิงอุตสาหกรรมจะนิยมใช้การบดแบบเปียกมากกว่าแบบแห้ง ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการบดแบบเปียกจึงจะกล่าวถึงกระบวนการบดแบบเปียกเป็นหลัก [17-18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 กระบวนการบดด้วยลูกบด

กระบวนการบดแบบเปียกจะคล้ายๆกับแบบแห้ง ต่างกันตรงที่มีการใส่สารลอยตัว (Medium) เพื่อช่วยในการลอยตัวของอนุภาคภายในหม้อบด เนื่องจากหากไม่ใส่สารลอยตัว อนุภาคภายในหม้อบดจะตกอยู่ด้านล่างของหม้อบดทำให้การบดมีประสิทธิภาพน้อยลง

ในการเคลื่อนที่ของลูกบดในหม้อบด ลูกบดจะถูกหมุนขึ้นไปจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วจึงตกลงมากระทบกับอนุภาค (Catacracting Media) ด้านล่างบริเวณรับแรง (Impact Zone) จากนั้นจะไหลลงมาเกิดการเสียดสีระหว่างลูกบดที่ไหลลงมาและไหลขึ้นไปกับอนุภาคสาร (Cascading Media) บริเวณที่เกิดการเสียดสี/ขัดสีจะเรียกว่า Abrasion Zone ในการบดบางครั้งจะเกิดบริเวณที่เป็นช่องว่างซึ่งเกิดจากการขึ้นและตกของลูกบดจากการหมุน (Dead Zone) และบริเวณที่ไม่มีลูกบดอยู่เลย (Empty Zone) ซึ่งเกิดจากแรงเหวี่ยงที่ได้จากการหมุนไม่เพียงพอ จึงตกก่อนที่จะถึงบริเวณดังกล่าว แสดงในภาพที่ 2.5

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบดด้วยลูกบด [1]

การบดด้วยลูกบดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพดีนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ชนิดของลูกบด
2. ความเร็วที่ใช้ในการบด
3. ปริมาณลูกบดที่เติมในหม้อบด
4. ขนาดของอนุภาคสารวัตถุดิบที่ต้องการจะบด และความแข็งแรงของวัตถุดิบ
5. ชนิดของหม้อบด
6. ปริมาณของวัตถุดิบและสารลอยตัวที่เติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ความละเอียดของวัตถุคิบ

8. ขนาดของลูกบดและอัตราส่วนของขนาดลูกบดที่ใส่ในหม้อบด

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงความเร็วที่ใช้ในการบด ชนิดของลูกบด และปริมาณลูกบด

### 2.3.2.1 ความเร็วที่ใช้ในการบด [1]

ในกระบวนการบดด้วยลูกบดสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ความเร็วที่ใช้ในการบด ในการบดด้วยหม้อบดเราจะคิดจากความเร็ววิกฤต ซึ่งเป็นความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้วัตถุรักษาสภาพการหมุนไปตามขอบหม้อบดโดยไม่ตกลงมาได้ ความเร็วนี้จะทำให้ลูกบดมีความเร็วเท่ากับความเร็วหนีศูนย์กลาง การคำนวณความเร็ววิกฤตต้องคำนึงถึงแรงสองแรง คือ แรงกระทำอันเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก แรงหนีศูนย์กลางขณะหมุนของลูกบด สามารถคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 2.6 การคำนวณความเร็ววิกฤต

แรงที่กระทำกับลูกบดขณะเคลื่อนที่ตามการหมุนของหม้อบด มี 2 แรง คือ [16]

แรงโน้มถ่วงของโลก  $P = mg$

แรงหนีศูนย์กลาง  $F_c = mV^2/R$

กำหนดให้  $R$  คือ รัศมีของหม้อบด

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อบด

$N$  คือ จำนวนรอบในการหมุน

$P$  คือ จุดที่แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับแรงหนีศูนย์กลาง

$m$  คือ มวลของลูกบด

$V$  คือ ความเร็วเชิงเส้นของหม้อบด

หาความเร็ววิกฤต ฉะนั้นแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับแรงหนีศูนย์กลาง จึงทำให้ลูกบดไม่ตกลงมา

$$mg = mV^2/R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$mg \cos \alpha = mV^2/R \quad (2.1)$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad V = 2\pi RN / 60 \text{ รอบ/นาที} \quad (2.2)$$

$$\text{แทน (2.2) ลงใน (2.1) } \cos \alpha = 4\pi^2 N^2 R \quad (2.3)$$

จาก (2.3) เมื่อทำการหาค่าคงที่ กอปรกับ  $R = 2D$  จะได้

$$\cos \alpha = 0.0011 N^2 D \quad (2.4)$$

แต่ที่จุด P ลูกบดจะหมุนต่อไปโดยไม่ตก ฉะนั้นมุม  $\alpha$  (มุมที่ลูกบดเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ ทำมุมกับแนวตั้ง) จะเป็น 0 องศา ซึ่ง  $\cos 0 = 1$  และค่า N รอบต่อนาที แทนค่าใน (2.4)

$$W_c = \left(\frac{60}{2\pi}\right) \left(\frac{2g}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

$$= \left(\frac{42.3}{D}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

โดยที่  $W_c$  คือ ความเร็ววิกฤตของการหมุนหม้อบด (รอบต่อนาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อบด (เซนติเมตร)

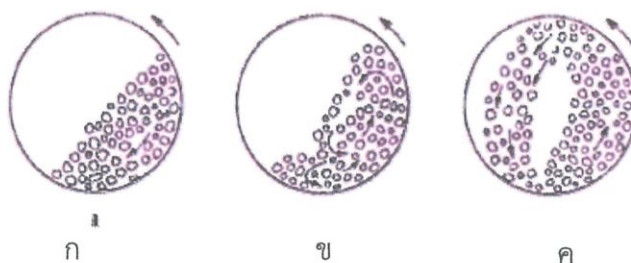
g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ประมาณ 9.83456 เมตร/วินาที<sup>2</sup>

เนื่องจากการบดเราต้องการให้ลูกบดตกลงมากระทบกับอนุภาคด้านล่าง ความเร็วที่ใช้จึงต้องต่ำกว่าความเร็ววิกฤต (Critical Speed) [1]

การบดแบบแห้งจะใช้เวลาประมาณ 60-70% ของความเร็ววิกฤต

การบดแบบเปียกจะใช้เวลาประมาณ 70-80% ของความเร็ววิกฤต

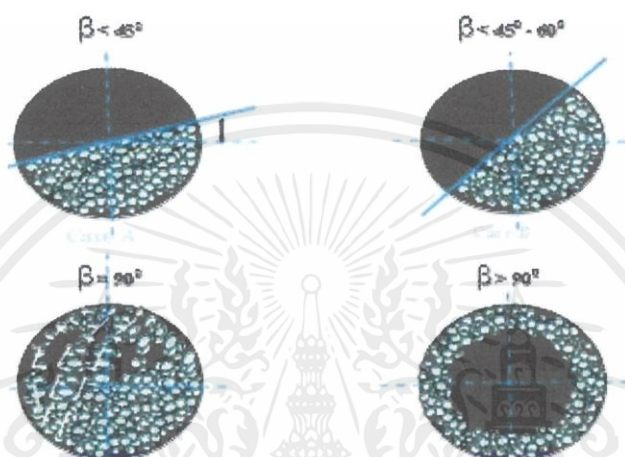
หากใช้ความเร็วน้อยเกินไปจะทำให้ลูกบดไม่สามารถหมุนขึ้นไปจนตกลงมาได้และหากขึ้นไปได้แรงตกกระทบก็น้อย จึงต้องใช้เวลาดึกที่นานมากกว่าปกติในการทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง หากใช้ความเร็วมากกว่า 80% จะทำให้ลูกบดหมุนแล้วตกลงมาแรงเกินไป อาจทำให้ลูกบดกระทบกันเองจนเกิดการสึกหรอได้ ดังภาพ



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดที่ความเร็วในการหมุนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.7 (ก) เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดที่ความเร็วต่ำจะสังเกตว่าแทบไม่มีการเกิดการตกกระทบเลย จะเกิดเพียงการขัดสีของลูกบดกับอนุภาคสารเล็กน้อยเท่านั้น (ข) เป็นการบดด้วยความเร็วปานกลางซึ่งจะเกิดทั้งการตกกระทบและการขัดสีทำให้การบดมีประสิทธิภาพมากที่สุด (ค) เป็นการบดด้วยความเร็วสูง เป็นการบดด้วยแรงกระทบสูงซึ่งทำให้อนุภาคแตกออกได้ไวแต่ก็ข้อเสียคือลูกบดอาจจะแตกเสียหายได้ ดังที่กล่าวไปข้างต้น



ภาพที่ 2.8 มุมคตาตาลีกซ์ติง

ในการเคลื่อนที่ที่ขึ้นไปตามแรงหมุนของลูกบดจะมีมุมซึ่งเทียบกับระนาบปกติของลูกบดกับจุดที่ขึ้นไปได้สูงสุดก่อนจะตกลงมา เราจะเรียกมุมที่เกิดขึ้นนี้ว่า มุมคตาตาลีกซ์ติง (Cataracting;  $\beta$ ) ซึ่งมุมคตาตาลีกซ์ติงที่เหมาะสมที่สุดคือ 45 องศาทำมุมกับแนวเพลลาของหม้อบด

### 2.3.2.2 ชนิดของลูกบดที่ใช้ [1]

กระบวนการบดด้วยลูกบดนั้นมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงหลายอย่าง และหนึ่งในนั้นคือชนิดของลูกบด ลูกบดมีหลายชนิดขึ้น แต่ละชนิดจะมีลักษณะ ข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งเรื่องของราคาลูกบด ความถ่วงจำเพาะ ประสิทธิภาพในการบด รวมไปถึงร้อยละของการสึกหรอ ดังแสดงในตาราง 2.1

ในการเลือกลูกบดควรจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ชนิดของสารที่จะนำมาบด ชนิดของหม้อบด ความถ่วงจำเพาะของลูกบด ประสิทธิภาพในการบด งบประมาณที่มี เป็นต้น เนื่องจากหากเลือกใช้ลูกบดที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณ ลูกบดเกิดความเสียหายและเจือปนลงในสารที่ต้องการบด รวมไปถึงการใช้เวลาในการบดนาน หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการบด เราสามารถใช้ลูกบด 2 ชนิดผสมกันได้ แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยดังที่กล่าวไปข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงชนิดและสมบัติของลูกบด

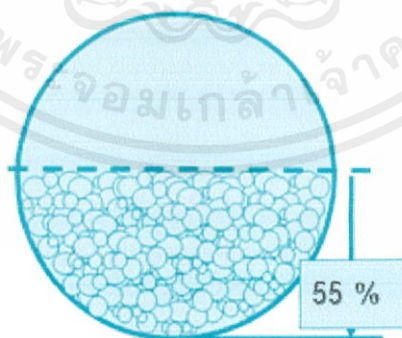
ชนิดของลูกบด	ส่วนประกอบ	ความถ่วงจำเพาะ	ประสิทธิภาพ	ราคา	%การสึกหรอ
Flint	SiO <sub>2</sub>	2.5-2.6	ต่ำ	ถูก	สูง
Porcelain	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.3-2.6	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
Steatite	SiO <sub>2</sub> ,MgO,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.6-2.8	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5-3.7	สูง	สูง	น้อย
Zirconia	ZrO <sub>2</sub>	5.8-6.0	สูงมาก	สูงมาก	ต่ำ

### 2.3.2.3 การคำนวณปริมาณลูกบด อนุภาคควัตถุดิบและสารลอยตัวที่จะเติมลงในหม้อบด

ในส่วนของการใส่ลูกบดลงในหม้อบดนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงถึงปริมาณสารที่จะใส่เข้าไป รวมไปถึงถึงพื้นที่ว่างในหม้อบดด้วย เนื่องจากการบดด้วยลูกบดนั้นจำเป็นต้องมีพื้นที่เพื่อให้ลูกบดเคลื่อนที่ตกลงมากระทบอนุภาคของสารที่ใส่เข้าไป จากการทดสอบแล้วพบว่า การใส่ลูกบดที่ปริมาตร 50-55% ของหม้อบดจะทำให้ใช้เวลาในการบดน้อยที่สุดและมีการกระจายตัวของอนุภาคดีที่สุด

ปริมาตรของหม้อบด (ทรงกระบอก) สามารถคำนวณได้จากสูตรคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของหม้อบด} &= \text{พื้นที่หน้าตัด} \times \text{ความยาวหม้อบด} \\
 &= \pi r^2 \times h \\
 &= \pi r^2 h
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$



ภาพที่ 2.9 ปริมาตรลูกบดที่ใส่ในหม้อบด

หลังจากใส่ลูกบดลงไปในหม้อบดแล้ว พบว่าจะมีช่องว่างระหว่างลูกบดด้วยตัวเอง ช่องว่างนี้จะมีพื้นที่ปริมาณ 40% ของปริมาตรลูกบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้นจะมีช่องว่างเหลือทั้งหมดรวมทั้งหม้อบด} &= (40\% \times 55) + 45 \\ &= 67\% \text{ ของปริมาตรหม้อบดทั้งหมด} \end{aligned}$$

ในเติมวัตถุบดและสารลอยตัวต้องเผื่อพื้นที่ว่างประมาณ 25% ของหม้อบดสำหรับให้ลูกบดเคลื่อนที่ ฉะนั้นปริมาตรที่ใส่วัตถุบดและสารลอยตัวจะเหลือ  $= 67-25 = 42\%$  ของปริมาตรทั้งหมด

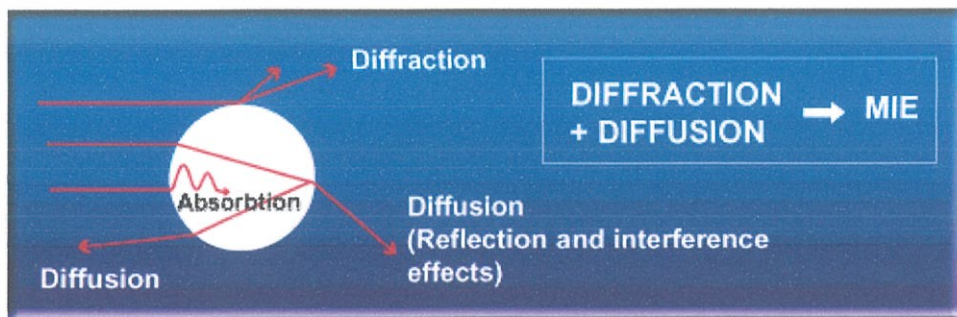
## 2.4 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง

### 2.4.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Particle Size Analyzer) [19-21]

เป็นเครื่องที่ใช้วัดที่กระจายตัวของอนุภาคในสารตัวอย่าง โดยการใช้การเลี้ยวเบนของเลเซอร์ ซึ่งแก๊สที่ใช้ในการกำเนิดเลเซอร์จะเป็น ฮีเลียม-นีออน (Helium-Neon Laser) เมื่อแสงเลเซอร์เข้าไปกระทบอนุภาคภายในสารตัวอย่าง เกิดการกระเจิงของแสง (Diffusion) บางส่วนดูดกลืน (Absorption) บางส่วนเลี้ยวเบน (Diffraction) ตามทฤษฎีของมี (Mie Theory)



ภาพที่ 2.10 เครื่องวัดขนาดของอนุภาค [22]



ภาพที่ 2.11 การกระเจิงของแสงตามทฤษฎีของมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคภายในและตัวของเหลวในสารตัวอย่างจะมีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน มุมที่เกิดจากการกระเจิงของแสงจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่แสงได้เข้าไปกระทบ โดยมุมของการกระเจิงจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค ขนาดอนุภาคเล็กมุมที่ได้จะกว้าง ขนาดอนุภาคใหญ่มุมที่ได้จะแคบ แต่จะถูกจำกัดด้วยความกว้างของลำแสงเลเซอร์ ขนาดอนุภาคนี้อาจขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Focal Plane Detector) ที่วางตั้งฉากกับระนาบแสงเลเซอร์ เกิดภาพเป็นปรากฏการณ์เลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) จากในภาพที่ 2.13 จุดโฟกัสที่เลนส์รวมแสงจะเป็นวงกลมมืด-สว่าง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของอนุภาค สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคโดยใช้ค่าดัชนีหักเหและค่าดัชนีการดูดซับแสงของอนุภาคและตัวกลางได้

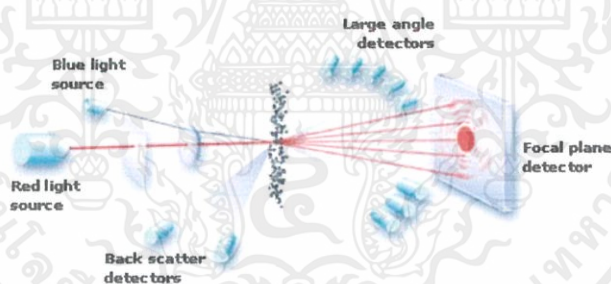
คำนวณมุมที่เลี้ยวเบน คำนวณได้จากสมการ

$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{d} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแสงที่กระทบอนุภาค

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

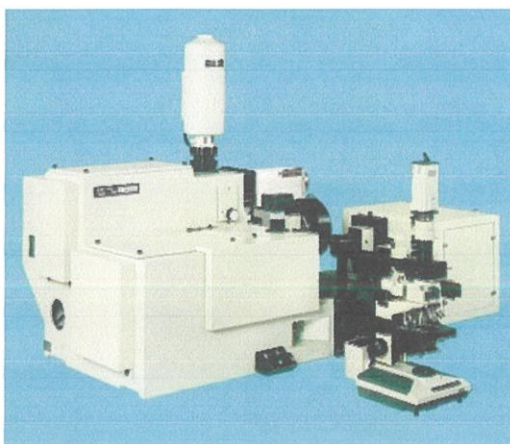


ภาพที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่องวัดขนาดอนุภาค

#### 2.4.2 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เป็นเทคนิควัดที่ใช้การกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman Scattering) เกิดจากแสงที่มีคลื่นเดี่ยว เช่น เลเซอร์ ยิงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง ซึ่งแสงส่วนใหญ่จะสามารถทะลุผ่านไปได้ แต่จะมีบางส่วนเกิดการชนและกระเจิงออกมา แสงที่เกิดการชนมีทั้งแบบไม่เสียพลังงาน และแบบเสียพลังงาน ซึ่งแบบที่เสียพลังงาน พลังงานจะถูกดูดกลืนโดยสาร ความถี่ของแสงที่กระเจิงออกมาจึงเปลี่ยนไป สารแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนพลังงานไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถเทียบผลของสารที่วัดกับสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลได้ รามานสเปกโตรสโคปีสามารถใช้วัดสารได้หลากหลาย เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวสาร [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 รามานสเปกโตรสโคปี [24]

### 2.4.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction : XRD)

เป็นเครื่องที่ใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์วิเคราะห์ชนิดและความเป็นโครงสร้างของสาร โดยที่มาของหลักการนี้มาจากกฎของแบร็ก (Bragg's Law) ภาพที่ 2.14 เมื่อรังสีตกกระทบลงบนระนาบ โครงสร้างของสาร จะเกิดการสะท้อนออกมาทำมุมเซตากับแนวระนาบเท่ากับมุมตกกระทบ และมีบางส่วนเข้าไปในโครงสร้างแล้วเกิดการเลี้ยวเบนออกมา รังสีที่ออกมาของแต่ละสารจะมีความเข้มต่างกัน ทำให้สามารถเทียบความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนที่มุมต่างๆได้ [25]

สมการที่ได้จากกฎของแบร็ก คือ

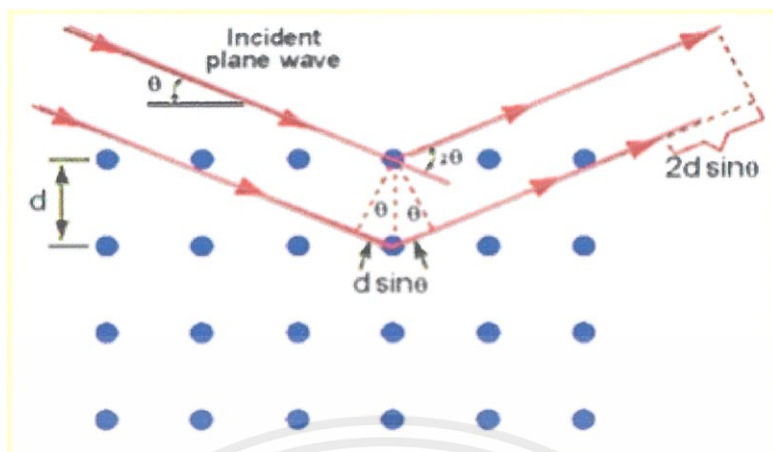
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.9)$$

โดยที่  $\lambda$  แทน ความยาวของรังสีเอกซ์

$n$  แทน ลำดับการสะท้อน

$d$  แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

ตัวอย่างที่เหมาะสมจะนำมาวัดด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือตัวอย่างที่เป็นผง หรือเป็นในรูปแบบของแข็ง ขนาดเล็กกว่า 40 ไมครอน



ภาพที่ 2.14 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การคำนวณขนาดโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer Equation) สมการ 2.10 สมการเชอร์เรอร์เป็นสมการที่ไม่นำอิทธิพลของความเครียดมาคิด ทำให้คำนวณได้ง่ายขึ้น แต่สมการนี้จะใช้เมื่อขนาดของอนุภาคไม่เกิน 100-200 นาโนเมตร และจะไม่คำนวณองค์ประกอบอื่นที่ส่งผลต่อความกว้างของกราฟ [26]

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.10)$$

$t$  คือ ขนาดอนุภาค

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (คอปเปอร์ 0.154 นาโนเมตร)

$\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงที่สุดของกราฟพระฆัง (Full width half Maximum : FWHM)

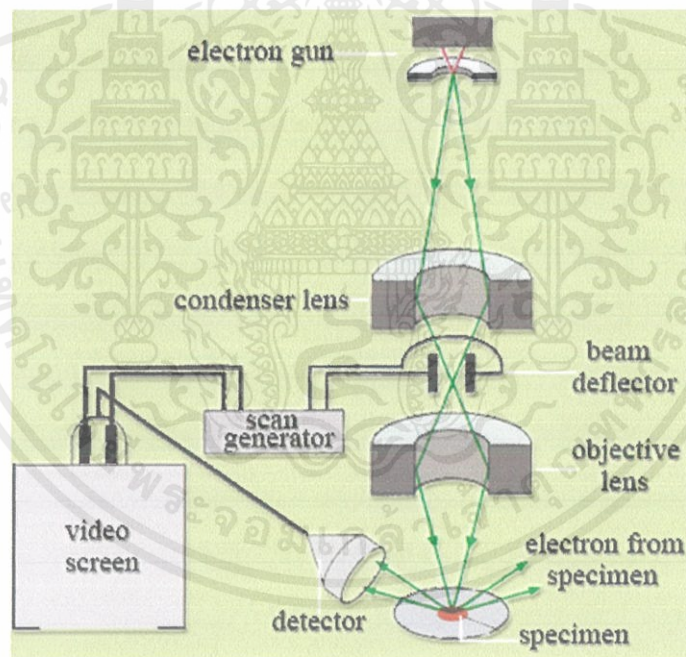
$\theta$  คือ มุมของแบรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 นาโนเมตร ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ควรจะนำไฟฟ้า หรือหากไม่นำไฟฟ้าต้องนำไปเคลือบทองเพื่อให้หน้าไฟฟ้าเสียก่อน ภาพที่ได้ออกมาจะเป็นสามมิติ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวและรายละเอียดพื้นหลัง ลักษณะการวางตัวของตัวอย่างได้ชัดเจน [27]

หลักการทำงานของกล้องชนิดนี้จะใช้หลักการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) โดยเริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จากนั้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านเลนส์รวมรังสี (Condenser lens) เพื่อปรับขนาดลำอิเล็กตรอนให้เหมาะกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อลำอิเล็กตรอนส่องลงบนชิ้นงาน จะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนในตัวอย่าง อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพปรากฏขึ้นบนจอคอมพิวเตอร์

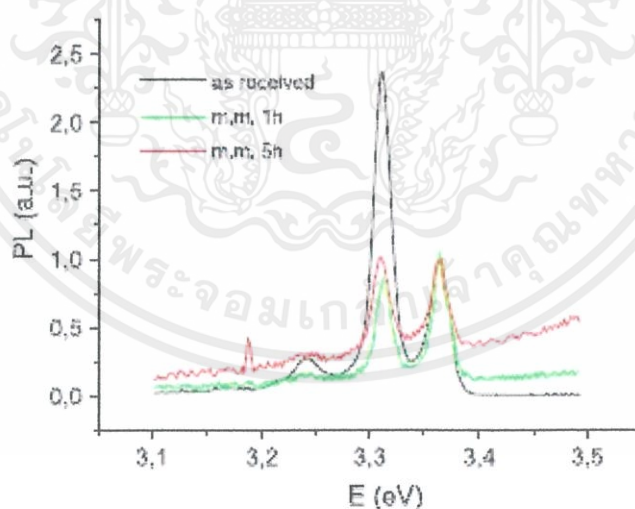


ภาพที่ 2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรม

L.C. Damonte และคณะ [28] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตรด้วยกระบวนการบดด้วยลูกบด ซิงค์ออกไซด์ตั้งต้นขนาดประมาณ 500 นาโนเมตร บดในหม้อบดเหล็ก ปริมาณ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลูกบดเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร อัตราส่วนของน้ำหนัก ลูกบดต่อซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็น 14:1 บดด้วยเวลา 0 1 และ 5 ชั่วโมง หลังจากบดเสร็จนำไปผ่านความดัน 1.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อบดด้วยเวลามากจะมีการตอบสนองของรังสีเอกซ์มาก แต่จากการนำไปคำนวณขนาดของเกรน(Grain Size) พบว่าที่เวลาบด 1 ชั่วโมง จะให้ขนาดของเกรนเล็กที่สุด ผลจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าซิงค์ออกไซด์ยังไม่ผ่านการบดอนุภาคมีขนาดประมาณ 170-500 นาโนเมตร เมื่อบด 1 ชั่วโมง จะมีขนาดของอนุภาคประมาณ 50-110 นาโนเมตร และเมื่อบด 5 ชั่วโมงจะมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 17 นาโนเมตร จากการตรวจวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทสโคปี (Photoluminescence Spectroscopy, PL spectroscopy) พบว่าเส้นกราฟของเวลา 0 1 และ 5 ชั่วโมง มีเส้นกราฟขั้นสูงที่ตำแหน่งพลังงาน 3.364 3.365 และ 3.364 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ตามลำดับ โดยเส้นกราฟของการบดที่เวลา 0 จะมีค่าโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงสุด แสดงให้เห็นว่าเอกซิตรอนเกิดการข้ามไปยังชั้นโดเนอร์ (donor level) ในขณะที่เวลาบด 1 และ 5 ชั่วโมงซึ่งเกิดเส้นกราฟขั้นนั้น คาดว่าเป็นผลจากการตอบสนองของ เอ็มทีเอช แอลโอ-โฟโนน รีพลิคา (mth LO-phonon replicas) โดย  $m=1$  และ  $2$  ตามลำดับ ภาพที่ 2.16



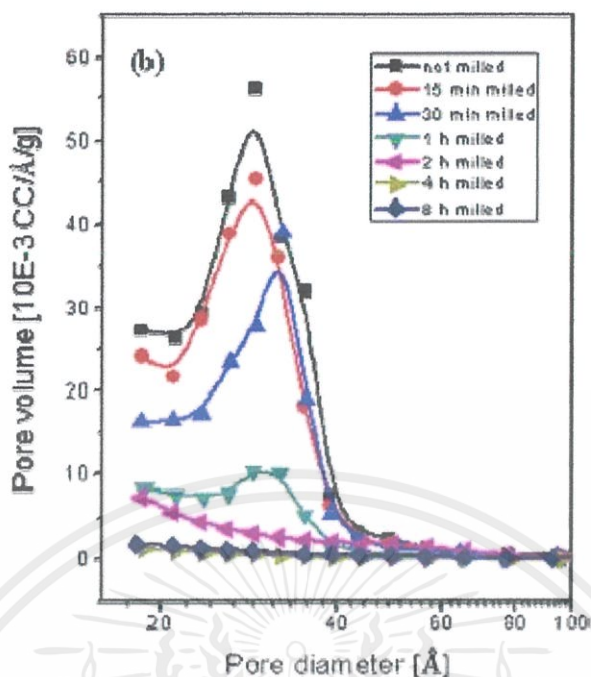
ภาพที่ 2.16 ผลการวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y.W. Lao และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาผลจากการบดซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดด้วยลูกบด ใช้ซิงค์ออกไซด์ 60 กรัม ลูกบดอิตเทรียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (Yttria-Stabilized Zirconia;YSZ) 535.5 กรัม และ ลูกบดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 328.2 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบด 10 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการบดด้วยลูกบดต่างชนิด หม้อบดทำจากโพลีเอสเตอร์มีปริมาตร 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเอทานอล 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร บดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ชั่งตัวอย่างสารที่เกิดการสูญเสีย ทำกระบวนการข้างต้น 4 ครั้ง หลังจากที่ได้ตัวอย่างสารแห้งแล้วนำมาผ่านการกรองที่รูพรุน 150 สีฟเพื่อแยกสารที่รวมตัวออก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ผลจากการวัดปริมาณสารที่สูญเสีย พบว่าการบดด้วยลูกบดอะลูมิเนียมออกไซด์จะสูญเสียสารมากกว่าลูกบดอิตเทรียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้เห็นภาพการวางตัวของซิงค์ออกไซด์และเศษลูกบดที่เกิดจากการแตกหักเนื่องจากการบด จัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ขนาดเฉลี่ยของซิงค์ออกไซด์ที่การบดด้วยลูกบดอะลูมิเนียมจะเล็กกว่าการบดด้วยลูกบดอิตเทรียสเตบิลไลซ์เซอร์โคเนียและซิงค์ออกไซด์ที่ยังไม่ได้บด ในส่วนของการกระจายขนาดอนุภาค ที่การบดด้วยลูกบดอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีการกระจายขนาดอนุภาคน้อย อนุภาคจะมีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่า

Bahaa M. Abu-Zied และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างและลักษณะของวัสดุเมโซพอร์รัสซิลิกา MCM-41 จากกระบวนการบดด้วยลูกบด เตรียมวัสดุ MCM-41 ด้วยวิธีการ sol-gel จากนั้นนำ MCM-41 5 กรัมมาเข้ากระบวนการบดด้วยลูกบด 5 ลูก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร) บดด้วยเวลา 0.25, 0.5, 1, 2, 4 และ 8 ชั่วโมง ผลจากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าเมื่อบดเป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง MCM-41 จะสูญเสียความสามารถในการสะท้อนกลับ ซึ่งคาดว่าเกิดจากโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงจากเป็นโครงผลึกกลายเป็นแบบอสัณฐาน จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโตรสโคปี (FT-IR) พบกราฟดังลงที่เลขคลื่น 968, 808 และ 463 หนึ่งส่วนเซนติเมตร (cm<sup>-1</sup>) เป็นสมบัติของพันธะ ν<sub>as</sub>(Si-OH), ν<sub>s</sub>(Si-O-Si), δ(Si-O-Si) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1250-1040 ที่เวลา 8 ชั่วโมงกราฟเกือบจะอยู่ในระนาบเดียวกัน จากการตรวจวัดการดูดซับไนโตรเจนพบว่า การบดทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลง การตรวจวัดการกระจายตัวของขนาดรูพรุนด้วยทฤษฎีบาเร็ดจอยเนอร์ฮาเลนด้า (BJH method) ภาพที่ 2.17 ผลก็คือ ขนาดของรูพรุนลดลงเมื่อบดด้วยเวลาที่มากขึ้น การบดที่เวลา 4 และ 8 ชั่วโมงแทบจะไม่มีรูพรุนเหลืออยู่เลย แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบดด้วยลูกบดทำให้โครงสร้างของสาร MCM-41 เปลี่ยนไปได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ MCM-41 ที่เวลาบดต่างๆ

ภาพที่ได้จากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดฟิลิ์มมิชชันพบว่า MCM-41 ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 8 ชั่วโมงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 300-700 นาโนเมตร ซึ่งพบว่าอนุภาคที่อยู่ใกล้ๆเกิดการรวมตัวกันในบริเวณที่มีการกระจายตัวของอนุภาคมาก ซึ่งภาพที่ได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบทะลุผ่านให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลซิส (Thermogravimetric analysis; TGA) แสดงให้เห็นว่ายิ่งบดด้วยเวลานานจะลดการสูญเสียมวลซึ่งเกิดจากอุณหภูมิสูงได้

K.P. Shinde และคณะ [31] ศึกษากระบวนการบดด้วยลูกบดของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวิธีการตกตะกอนร่วม โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride;  $ZnCl_2$ ) และสารละลายแอมโมเนีย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกตะกอนร่วมจะถูกนำไปบดเป็นเวลา 0 3 และ 5 ชั่วโมง ด้วยความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ พบว่าผลที่ได้ตรงกับซิงค์ออกไซด์ โครงสร้างทรงหกเหลี่ยม โดยมีค่า  $a = 3.249$  อังสตรอม และค่า  $c = 5.208$  อังสตรอม ไม่มีเส้นกราฟที่แสดงความไม่บริสุทธิ์ของผลที่ได้ ผลนำไปคำนวณขนาดโครงสร้างผลึกเฉลี่ยพบว่า การบดเป็นเวลา 5 3 และ 0 จะมีขนาดโครงสร้างผลึกจากขนาดเล็กไปขนาดใหญ่ตามลำดับ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิว (Texture coefficient ;  $T_c$ ) ด้วยการใช้การวิเคราะห์ของฮาร์ลิส (Harris analysis) จากสมการ

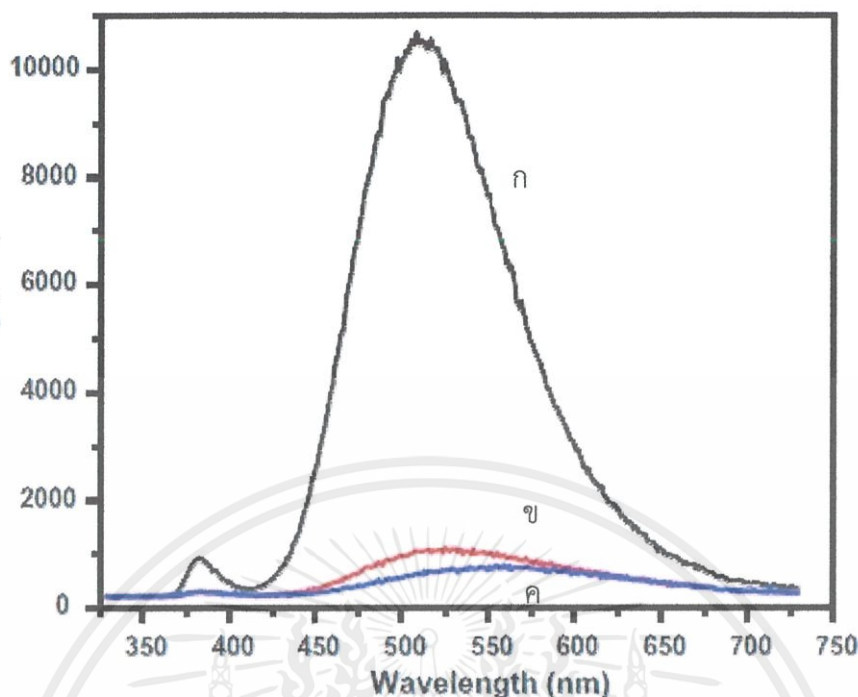
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{c(hkl)} = \frac{\frac{I_{(hkl)}}{I_{0(hkl)}}}{\left(\frac{1}{N}\right) \sum I_{(hkl)} / I_{0(hkl)}}$$

โดยที่  $I_{(hkl)}$  คือ การวัดความสัมพันธ์ระหว่างความชัดเจนของระนาบ

$I_{0(hkl)}$  คือ ค่าความชัดเจนของระนาบปกติจากคลังข้อมูล

ผลจากการวัดระนาบ  $T_c(101)$  ที่เวลาการบด 0 3 และ 5 ชั่วโมงได้ค่าออกมาเป็น 0.57, 0.59 และ 0.70 ซึ่งแนวโน้มของค่าที่ได้จะแปรผกผันกับขนาดโครงสร้างผลึกของวัสดุที่คำนวณได้ ผลจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดขนาดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่เวลาบด 5 ชั่วโมงจะมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร จากการวัดด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโตรสโคปี (FT-IR) ด้วยเลขคลื่น 400-4,000 หนึ่งส่วนเซนติเมตร มีเส้นกราฟการดูดซับเด่นที่เลขคลื่น 3434, 1616, 1423, และ 441 หนึ่งส่วนเซนติเมตร โดยการดูดซับที่เลขคลื่น 3434 หนึ่งส่วนเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของพันธะหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) คาดว่าเป็นโมเลกุลของน้ำระหว่างการวัด การดูดซับที่เลขคลื่น 441 หนึ่งส่วนเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดหดของพันธะระหว่างซิงค์กับออกไซด์ (Zn-O) การดูดซับที่เลขคลื่น 1616 และ 1423 หนึ่งส่วนเซนติเมตร สามารถเทียบเคียงได้กับซิงค์ออกไซด์ จากการวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโตรสโคปี (Photoluminescence Spectroscopy, PL spectroscopy) ภาพที่ 2.18 ใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 325 นาโนเมตรยิงเข้าไปยังตัวอย่างที่ได้ พบว่าเส้นกราฟของการบดเวลา 0 ชั่วโมง มีเส้นกราฟเด่นขนาดเล็กในความยาวคลื่น 383 นาโนเมตร คาดว่าเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) ของเอ็กซิตรอนอิสระ (Free excitation) ในการชนกันของเอ็กซิตรอน และมีเส้นกราฟเด่นขนาดใหญ่ในความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร เป็นการปลดปล่อยรังสีในช่วงสีเขียว คาดว่ารังสีที่เกิดจากการรวมตัวใหม่ของแสงซึ่งเกิดจากการที่มีอิเล็กตรอนหลุดออกไปจากโมเลกุล ในขณะที่เส้นกราฟของการบดด้วยเวลา 3 และ 5 ชั่วโมงจะไม่เกิดเส้นกราฟเด่นใดๆเลย แสดงให้เห็นว่าการบดด้วยลูกบดที่เวลานานมากขึ้นจะช่วยลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของประจุอิเล็กตรอนในวัสดุ



ภาพที่ 2.18 ผลจากการวัดด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่เวลาบดต่างๆ (ก) การบดที่เวลา 0 ชั่วโมง (ข) การบดที่เวลา 3 ชั่วโมง (ค) การบดที่เวลา 5 ชั่วโมง

R.K. Gupta และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงและการทนต่อการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการบดด้วยลูกบดพลังงานสูง (High Energy Ball Milling; HEMB) และการผสมโครเมียม อะลูมิเนียมผงที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาดอนุภาคประมาณ 300 ไมครอน และโครเมียมความบริสุทธิ์ 99.95% ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 50 ไมครอน ใช้ลูกบดสแตนเลสเหล็กแข็งเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดต่อผงเป็น 20:1 ทำการบดในหม้อบดที่มีแก๊สไนโตรเจน ทำการบด 2 อัตราส่วนคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมโครเมียมโดยมีสัดส่วนของโครเมียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการสปาร์คพลาสมา ซินเตอร์ริง (Spark plasma sintering; SPS) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 600 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 5 นาที ผลจากการวัดด้วยเทคนิคโพเทนติโอดนามิกส์ โพลาไรซ์เรอซ์เซชัน (Potentiodynamic polarization) พบว่า โลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมกับโครเมียมจะมีค่าความหนาแน่นกระแสแคโทดิก (Cathodic current density) มากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่ในทางกลับกันค่าความหนาแน่นกระแสแอโนดิก (Anodic current density) จะน้อยกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งความหนาแน่นกระแสแอโนดิกที่ลดลงนี้คาดว่าเป็นการสาเหตุความสามารถในการป้องกันประจุ ซึ่งเกิดจากกระบวนการบดและการที่มีโครเมียมผสมอยู่ จากการทดสอบการบีบอัดโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมกับโครเมียมมีความแข็งแรงต่อการดึงมากกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จากการตรวจวัดด้วย เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คำนวณขนาดของอนุภาคพบว่า ขนาดอนุภาคของโลหะผสมมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่านชนิดแสง สว่างแสดงให้เห็นขนาดโครงสร้างผลึกของสารทั้ง 2 ชนิด โดยอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีขนาดประมาณ 101 ( $\pm 21$ ) นาโนเมตร โลหะผสมมีขนาดประมาณ 37 ( $\pm 11$ ) นาโนเมตร

M.W. Wu และ [33] คณะทำการศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม เติมนลงในซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีการกดดันแบบร้อน (Hot isotatic pressing) โดยใช้อะลูมิเนียม ออกไซด์ต่อซิงค์ออกไซด์ 2:98 โดยมวล สารทั้ง 2 ชนิดผสมกันจากนั้นนำไปสเตอร์พร้อมซิงค์ออกไซด์ ปกติ สารผสมทั้ง 2 ชนิดจะถูกอบแห้งที่ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นจะถูกนำไปกดด้วยความดัน 150 เมกะปาสคาลขนาด 12.5 มิลลิเมตร ความหนา 7 มิลลิเมตรอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 30 นาที อัตราเร่ง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจะนำไปเผาด้วยอัตราเร่ง 10 องศาเซลเซียสต่อ นาทีจนถึงอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง สารผสมดังกล่าวจะถูกนำไปกดดันแบบ ร้อนที่อุณหภูมิ 1000 หรือ 1250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความดันแก๊ส 150 เมกะปาสคาล ผลที่ได้จากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเกิดความเข้มข้นที่สอดคล้องกับสารซิงค์ อะลูมิเนียม ความหนาแน่นของสารผสมดังกล่าวสูงกว่าซิงค์ออกไซด์ปกติ ความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ขนาดเกรนเล็กลง ความแข็งเพิ่มขึ้น และทนต่อแรงดึงได้ดีมากขึ้น

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลิตภัณฑ์จากการใช้กระบวนการบัดด้วยลูกบดเพื่อทำการผสมและการลดขนาดของอนุภาคของสารซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ อีกทั้งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับพลังงานความร้อนจากการเผาทำให้ง่ายต่อการเกิดเป็นสารชนิดใหม่ โดยการเตรียมสารสำหรับการบดจะคิดจากอัตราส่วนโมลระหว่างสาร 2 ชนิด ในการทดลองเบื้องต้นจะเริ่มจากการบดซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์บริสุทธิ์เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดของอนุภาคสารทั้ง 2 ชนิดเล็กที่สุด เมื่อได้เวลาในการบดที่เหมาะสมจะทำการบดผสมสารซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ตามเงื่อนไขอัตราส่วนโมลที่ได้คำนวณไว้ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ พร้อมกับนำไปวิเคราะห์ผลด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือทางด้านโครงสร้างทางเคมี โครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยา เพื่อนำผลที่ได้มาสรุปและอภิปราย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)
- อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide;  $Al_2O_3$ )
- เอทานอล (Ethanol) ความเข้มข้น 95%
- โซเดียม เฮกซะเมตาฟอสเฟต (Sodium hexametaphosphate)
- น้ำปอดประจุ (De-ionization water)

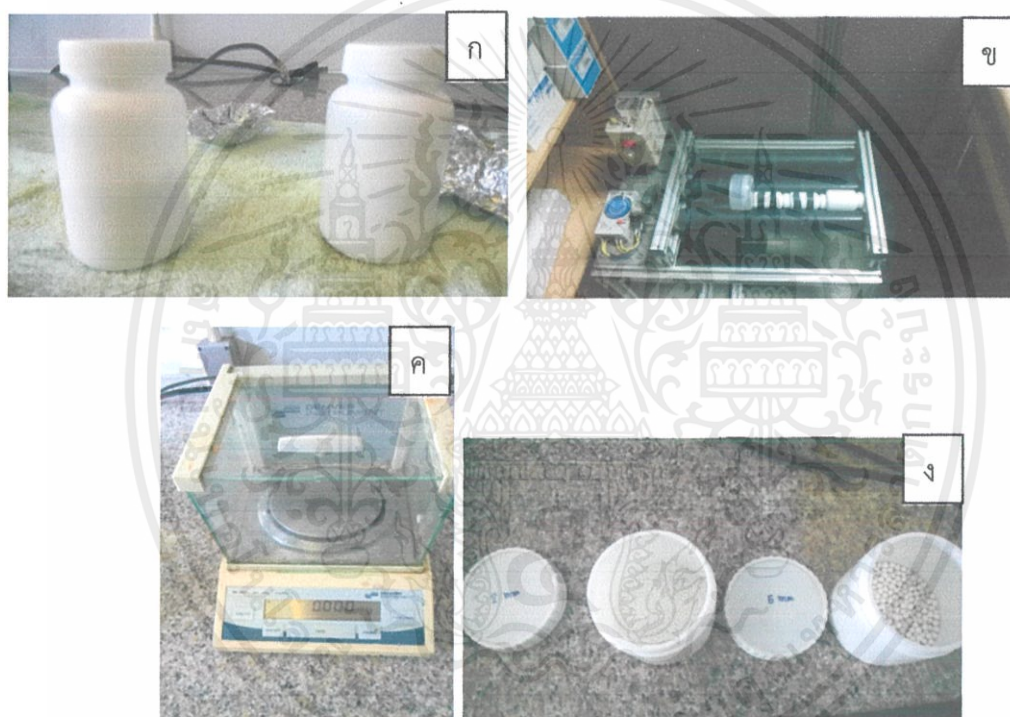
##### 3.1.2 อุปกรณ์

- หม้อบดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร
- เครื่องหมุนสายพานสำหรับบด
- เครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง
- ลูกบดเซอร์โคเนียออกไซด์ (Zirconia Oxide;  $ZrO_2$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 5 มิลลิเมตร
- เตาอบความร้อน
- ครกบดสาร
- ถ้วยเผาสาร (Crucible)
- เตาเผาสาร อัตราเพิ่มความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที
- เครื่องล้างด้วยความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ก) อะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์  
(ข) โซเดียม-เฮกซะเมตาฟอสเฟส



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) หม้ออบพลาสติก (ข) เครื่องหมุนสายพานสำหรับบด  
(ค) เครื่องชั่งสาร 3 ตำแหน่ง (ง) ลูกบดเซอร์โคเนียออกไซด์ (จ) เตาอบความร้อน  
(ฉ) เครื่องโชนิคเคตต์ (ช) เตาเผา (ซ) ถ้วยเผาสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 (ต่อ) อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) หม้ออบพลาสติก (ข) เครื่องหมุนสายพานสำหรับบัด (ค) เครื่องซังสาร 3 ตำแหน่ง (ง) ลูกบดเซอริโคเนียออกไซด์ (จ) เตาอบความร้อน (ฉ) เครื่องโซนิกเคดด์ (ช) เตาเผา (ซ) ถ้วยเผาสาร

### 3.2 ขั้นตอนในกระบวนการบัดด้วยลูกบดของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์

#### 3.2.1 การคำนวณหาอัตราส่วนโมลระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์

การคำนวณหาอัตราส่วนโมลระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์ในแต่ละเงื่อนไขเพื่อใช้ในการงานวิจัยนี้ได้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงอัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ในการบัด

อัตราส่วนโมลของ $ZnO:Al_2O_3$	น้ำหนักของอนุภาค (กรัม)
0 : 100	0.000 : 25.490
10 : 90	2.034 : 22.941
20 : 80	4.069 : 20.392
30 : 70	6.103 : 17.843
40 : 60	8.137 : 15.294
50 : 50	10.172 : 12.245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ตารางแสดงอัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ในการบด

อัตราส่วนโมลของ ZnO:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	น้ำหนักของอนุภาค (กรัม)
70 : 30	14.240 : 7.647
100 : 0	20.343 : 0.000

### 3.2.2 ขั้นตอนการทำกระบวนการบดด้วยลูกบด

- 3.2.2.1 ชั่งลูกบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 5 มิลลิเมตรอย่างละ 125 กรัม ใส่ลงในหม้อบด
- 3.2.2.2 ใส่สารลงในหม้อบดตามค่าที่คำนวณในตารางที่ 3.1 โดยใส่ในหม้อบด 2 หม้อ
- 3.2.2.3 เติมน้ำในหม้อ 30 มิลลิลิตร
- 3.2.2.4 นำไปบดด้วยความเร็วรอบ 140 รอบต่อนาที โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้บดเป็น 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง
- 3.2.2.5 นำสารหลังจากการบดไปผ่านกระบวนกรล้าง จากนั้นนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 3.2.2.6 นำสารที่ได้มาบดและกรองด้วยผ้าไนลอนเพื่อแยกอนุภาคสารที่อยู่รวมกันออก
- 3.2.2.7 นำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค เพื่อหาเวลาที่ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จากนั้นวัดผลสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ตามอัตราส่วนโมลที่คำนวณไว้ในตารางที่ 3.1
- 3.2.2.8 นำสารผลิตภัณฑ์ทุกเงื่อนไขเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส (อัตราเร่งความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที) เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้ว นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ ถัดไป

### 3.2.3 การเตรียมสารเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค

- 3.2.3.1 ชั่งตัวอย่างสาร 20 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปilotประจุ 10 มิลลิลิตร
- 3.2.3.2 เตรียมสารลดแรงตึงผิวจากการละลายโซเดียม-เฮกซะเมตาฟอสเฟต ลงในน้ำปilotประจุ 50 มิลลิลิตร
- 3.2.3.3 หยดสารลดแรงตึงผิวที่ได้ ลงในสารละลายตัวอย่างสาร 10 หยด
- 3.2.3.4 นำไปผ่านเครื่องสั่นด้วยความถี่สูงเป็นเวลา 480 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 ขั้นตอนการนำสารผ่านการเผา

- 3.2.4.1 ชั่วตัวอย่างสาร 2 กรัม จากนั้นนำบรรจุใส่ถ้วยเผาสาร
- 3.2.4.2 นำสารเข้าเตาเผา ตั้งค่าเวลาที่จะใช้เผาเป็น 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสพร้อมทั้งคำนวณเวลาที่เตาจะเร่งความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิดังกล่าว
- 3.2.4.3 นำสารออกจากเตาเผา บรรจุในขวดใส่สาร จากนั้นเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

## 3.3 เทคนิคการวิเคราะห์

### 3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Particle Size Analyzer)

วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการบดด้วยลูกบดที่เวลาต่างๆ เพื่อหาช่วงเวลาที่อนุภาคจะมีขนาดเล็กที่สุด

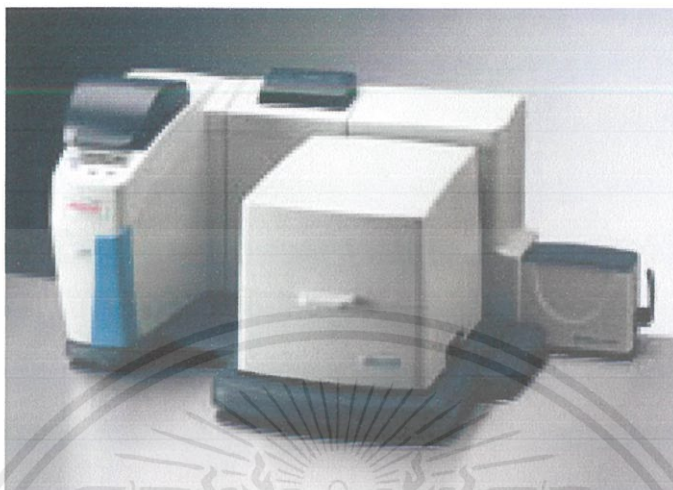


ภาพที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ใช้ (Particle Size Analyzer; BECKMAN COULTER-DelsaTM Nano Submicron) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 รามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

วิเคราะห์ชนิดของสารที่ได้จากกระบวนการบดด้วยลูกบดและการเผา เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพันธะทางเคมีเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสาร และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.4 รามานสเปกโตรสโคปีที่ใช้ (Raman Spectroscopy : DXR™ 2 SmartRaman Spectrometer) [34]

### 3.3.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

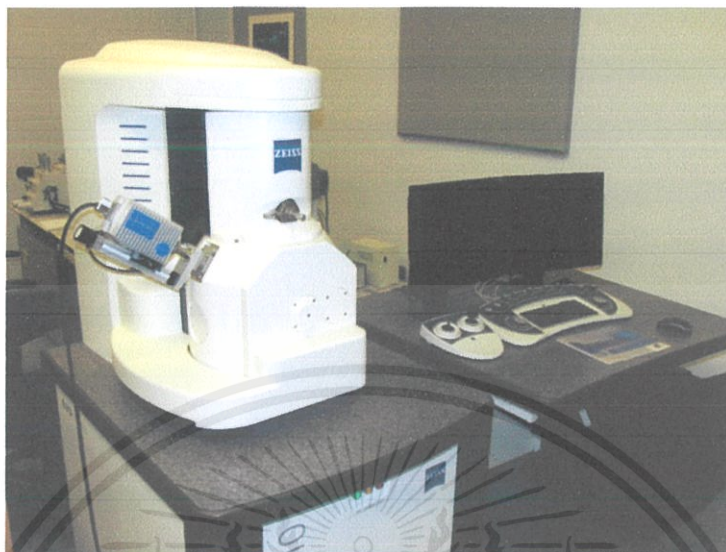
วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากนั้นเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อดูว่ามีสารชนิดอะไรบ้าง และความเป็นโครงสร้างผลึกเป็นอย่างไร



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ (X-ray diffractometer ; Rigaku Smartlab) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) คุณลักษณะการวางตัว การอยู่รวมตัวกันของสารและลักษณะสีฐานฐานวิทยาของสารผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ (Scanning Election microscope :  
Zeiss EVO MA10) [36]

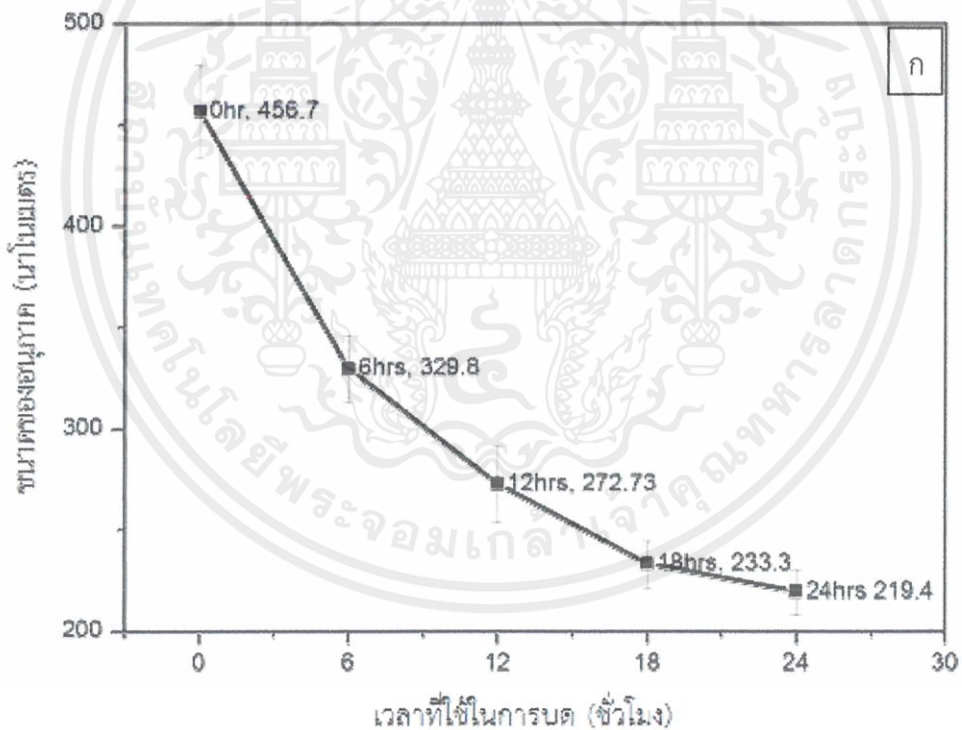
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

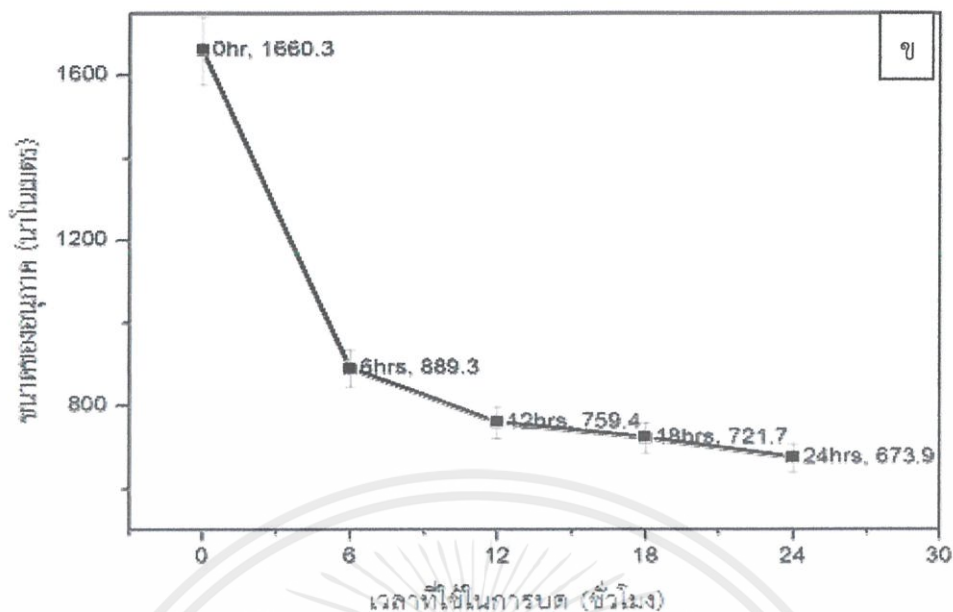
### ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการบัดด้วยลูกบด

การวัดขนาดของอนุภาคในที่นี่จะวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยทำการวัดสารตัวอย่าง 2 ชนิดคือ ภาพที่ 4.1 (ก) ซิงค์ออกไซด์ และ (ข) อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เวลาบด 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่าขนาดอนุภาคของสารทั้ง 2 ชนิดจะเล็กเมื่อบดด้วยเวลายาวขึ้น และการบดที่เวลา 24 ชั่วโมงจะให้สารที่มีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวในการรับความร้อนของสารเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดเป็นวัสดุประกอบหรือการเกิดเป็นสารชนิดใหม่ได้ง่าย ผู้วิจัยจึงเลือกการบดที่เวลา 24 ชั่วโมงสำหรับกระบวนการบดผสมระหว่างสารทั้ง 2 ชนิด



ภาพที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของ (ก) ซิงค์ออกไซด์ และ (ข) อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่บดด้วยเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.1 (ต่อ) ขนาดอนุภาคของ (ก) ซิงค์ออกไซด์ และ (ข) อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ทำการบดด้วยเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง

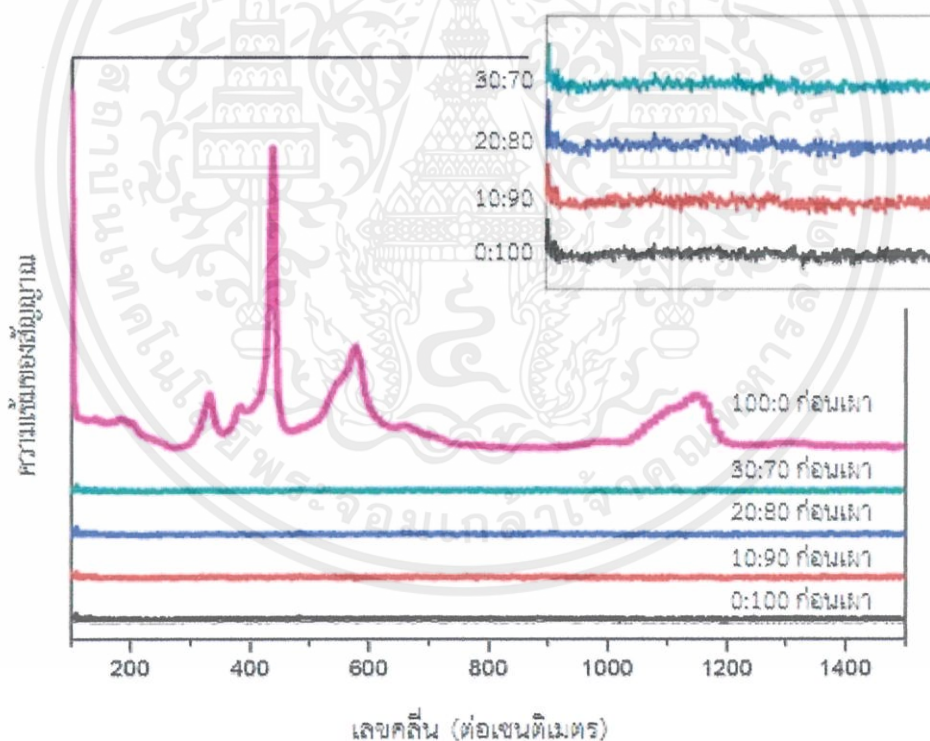
#### 4.2 การเปรียบเทียบการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด

ในเบื้องต้นจะทำการเปรียบเทียบการตรวจสอบพันธะสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเริ่มจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี เปรียบเทียบลักษณะของสารเมื่ออัตราส่วนเปลี่ยนไป เทียบว่าที่การเผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ ผลของแต่ละอัตราส่วนออกมาเป็นอย่างไร แตกต่างกันอย่างไรร

#### 4.2.1 ภาพรวมการเปรียบเทียบอัตราส่วนโมลต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

##### 4.2.1.1 สารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการอบ ก่อนเผา

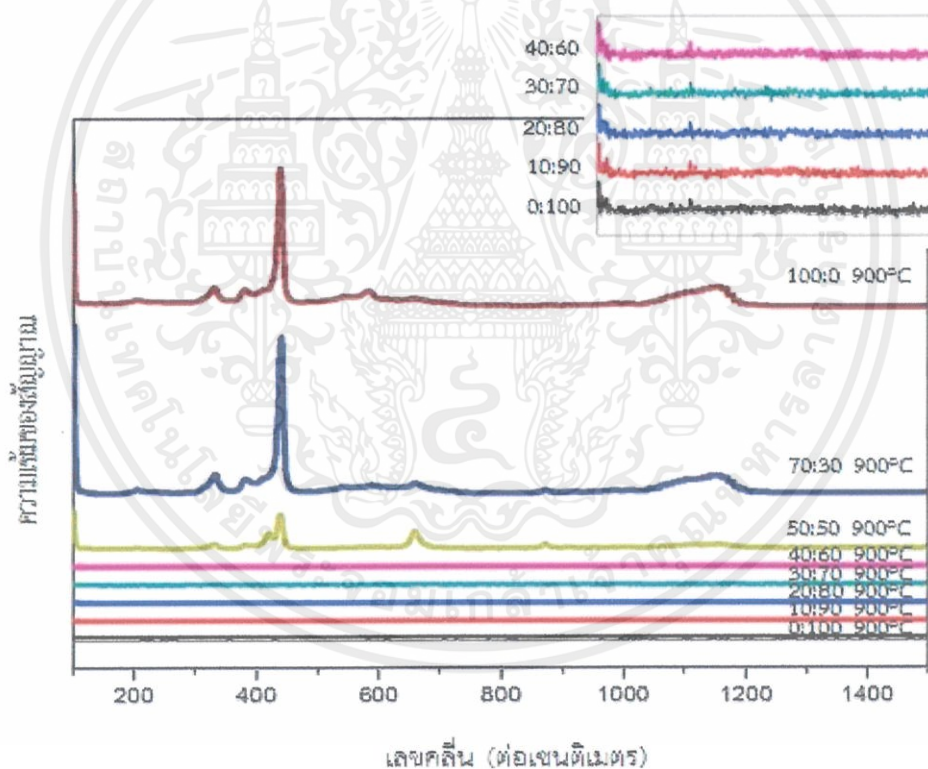
ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการอบด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าสารผสมที่อัตราส่วนโมล 0:100, 10:90, 20:80 และ 30:70 ไม่ปรากฏความเข้มสัญญาณแต่อย่างใด ซึ่งในขณะที่ทำการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วน 40:60, 50:50 และ 70:30 ไม่ปรากฏสัญญาณแม้แต่ชนิดเดียว (กราฟเป็นเส้นตรง) แต่ที่อัตราส่วน 100:0 แสดงความเข้มสัญญาณซึ่งสอดคล้องกับวิฤภาคของซิงค์ออกไซด์ จากผลการตรวจสอบพันธะดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ก่อนเผ่าจะปรากฏความเข้มสัญญาณเพียงอัตราส่วน 100:0 สาเหตุหลักคาดว่ามาจากความชื้นในอากาศ เนื่องจากสารอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งความชื้นในอากาศจะเข้าไปจับตัวกับสาร ทำให้การวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีแสดงผลได้ไม่ชัดเจน



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการอบด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา

#### 4.2.1.2 สารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการบด และเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

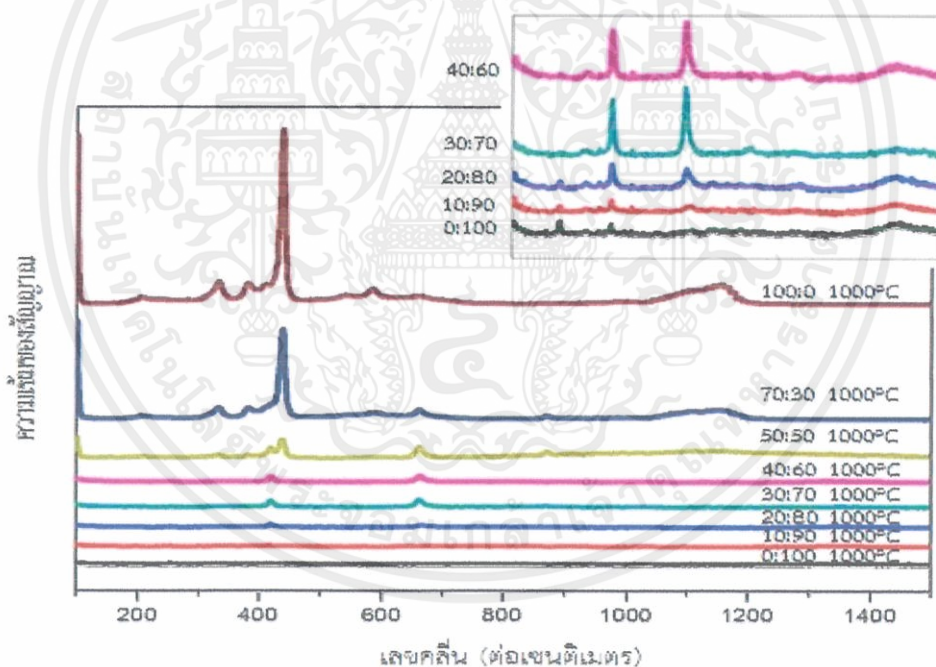
ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าสารผสมที่อัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70 และ 40:60 ยังคงไม่พบความเข้มสัญญาณที่ชัดเจน ที่อัตราส่วน 50:50 พบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 419 และ 662 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวิฎภาคพันธะของซิงค์อะลูมินิต และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 438 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวิฎภาคพันธะของซิงค์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน 70:30 ยังคงพบความเข้มที่สัญญาณของซิงค์อะลูมินิต แต่พบเพียงเล็กน้อย จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า สารผสมที่ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70 และ 40:60 ยังคงไม่แสดงความเข้มสัญญาณที่ชัดเจน ที่อัตราส่วน 50:50 และ 70:30 เป็นสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมินิต



ภาพที่ 4.3 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

#### 4.2.1.3 สารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการบด และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.4 ที่อัตราส่วนโมล 0:100, 10:90 และ 20:80 แสดงความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 255 ต่อเซนติเมตร เป็นสารเจือปนซึ่งไม่ทราบว่าเป็นตรงกับสารชนิดใด แต่พบว่าเมื่ออัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ความเข้มสัญญาณของสารเจือปนจะลดลง หมายความว่าสารเจือปนดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียมออกไซด์ อัตราส่วนโมล 10:90, 20:80, 30:70 และ 40:60 พบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 419 และ 660 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคของซิงค์อะลูมินา โดยอัตราส่วน 30:70 และ 40:60 จะเกิดสารซิงค์อะลูมินาได้ดี ที่อัตราส่วนโมล 50:50 และ 70:30 จะเกิดเป็นสารประกอบระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมินา แต่จะเกิดน้อยลงและเริ่มแสดงความเข้มสัญญาณของสารซิงค์ออกไซด์มากขึ้น

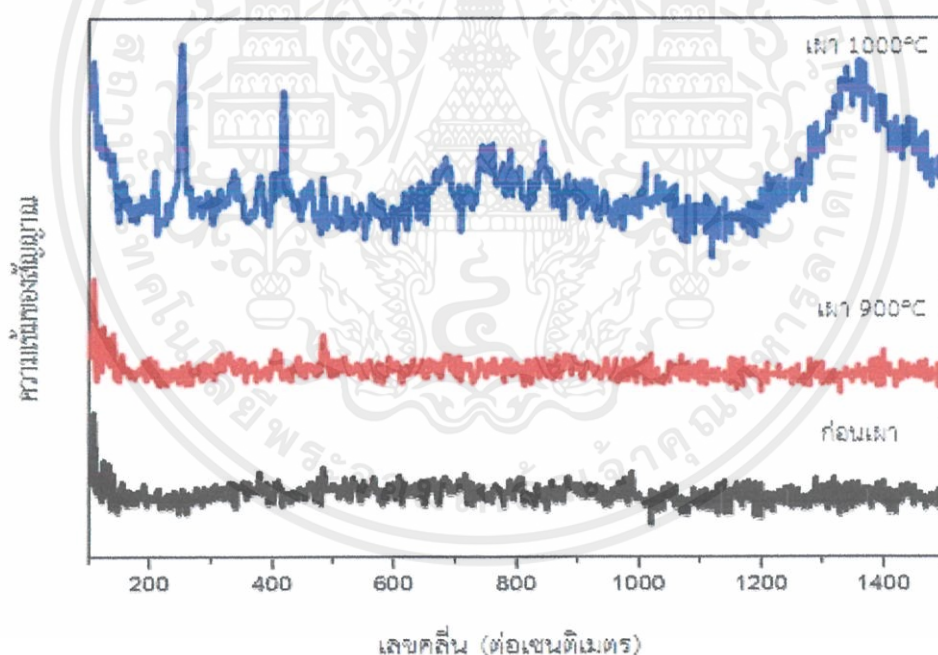


ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

## 4.2.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลต่างๆ ของสารผสม เมื่อเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

### 4.2.2.1 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 0:100

ผลการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนและหลัง เผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.5 การเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสแสดงความเข้มของสัญญาณเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่งเลขคลื่น 483 ต่อเซนติเมตร ซึ่งไม่สอดคล้องกับสารอะลูมิเนียมออกไซด์แต่อย่างใด แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะมีการแสดงความเข้มของสัญญาณชัดเจนมากขึ้น โดยปรากฏความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 419 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ และสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 254 ต่อเซนติเมตร ซึ่งไม่สอดคล้องกับวัฏภาคพันธะสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นสารอะลูมิเนียมออกไซด์ แต่มีสารอื่นเจือปนซึ่งคาดว่าอาจมาจากผู้ผลิตสารตั้งต้นหรือผสมในระหว่างขั้นตอนการทำ

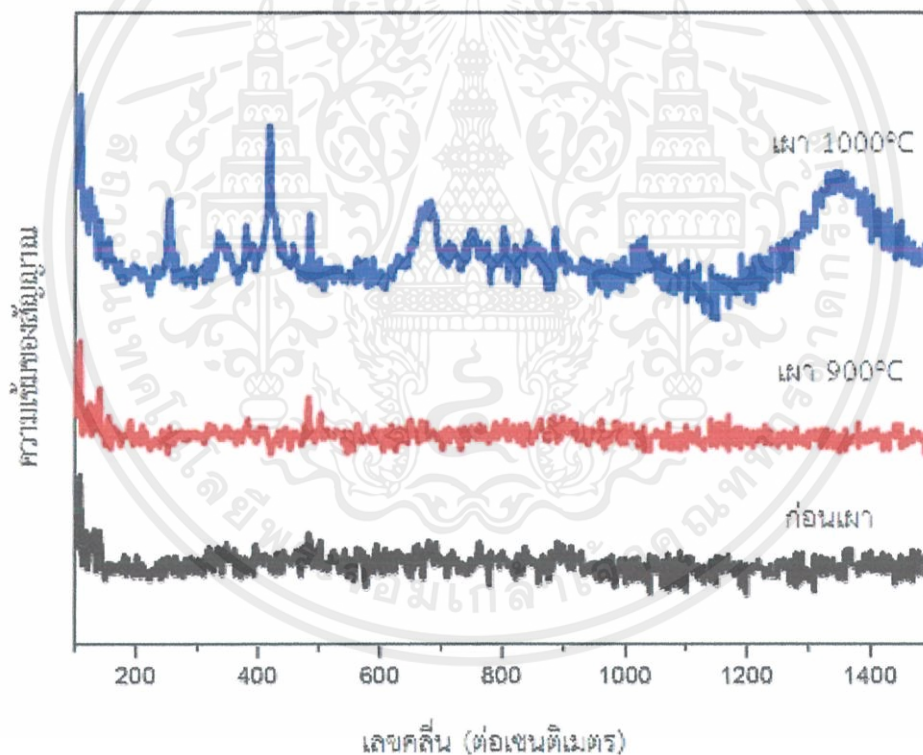


ภาพที่ 4.5 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อน และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 10:90

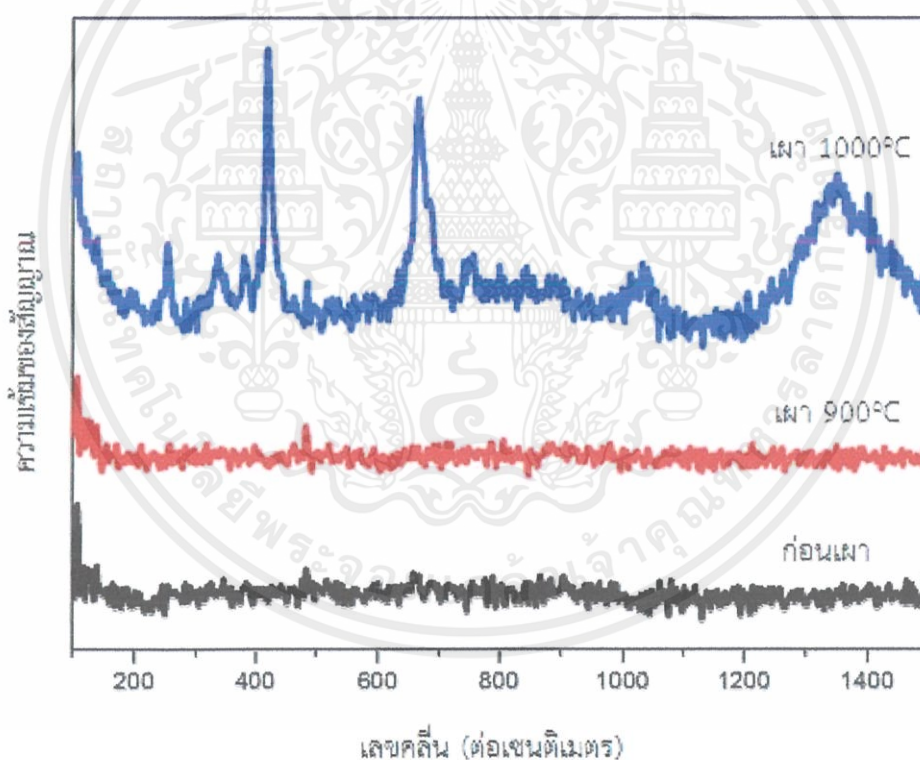
ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.6 ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมีการแสดงความเข้มของสัญญาณน้อย แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 419 และ 665 ต่อเซนติเมตรซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมิเนต และพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 252 และ 483 ต่อเซนติเมตร ซึ่งไม่ทราบว่า เป็นสารชนิดใด ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีสามารถสรุปได้ว่า สารผสมที่อัตราส่วน 10:90 เมื่อสารผสมผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจะแสดงสัญญาณของซิงค์อะลูมิเนตและสารเจือปน



ภาพที่ 4.6 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.3 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 20:80

ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.7 ที่ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมีการแสดงความเข้มของสัญญาณน้อย แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 419 และ 664 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมิเนียม และยังพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 252, 483 และ 1349 ต่อเซนติเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นสารเจือปนที่ไม่ทราบว่าเป็นสารใด ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารผสมที่อัตราส่วน 20:80 และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเกิดสารซิงค์อะลูมิเนียมขึ้น และมีสารอื่นเจือปน

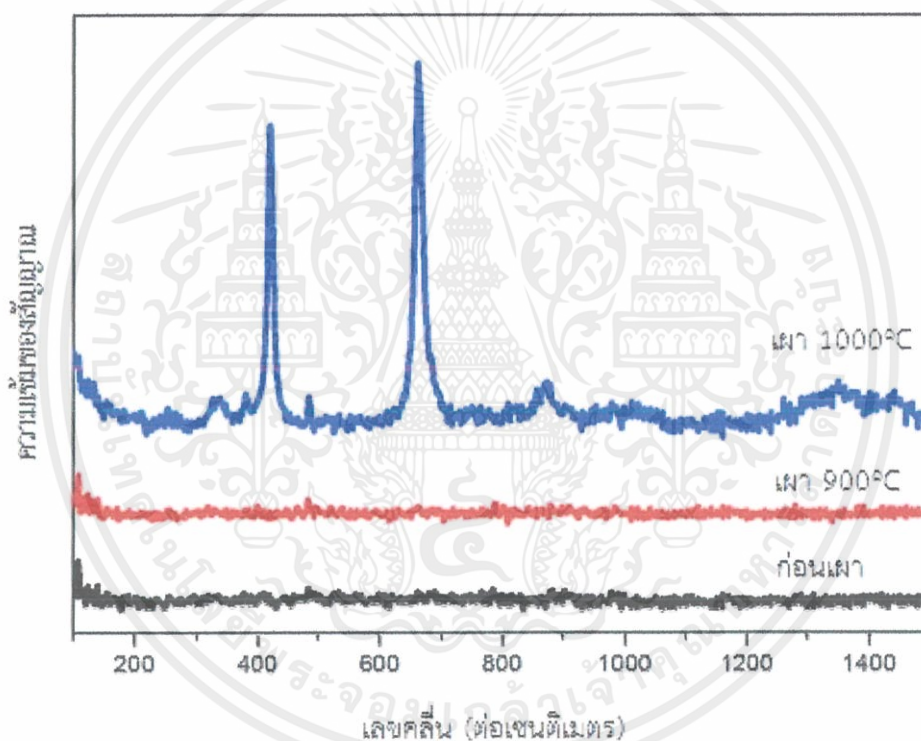


ภาพที่ 4.7 ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.4 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 30:70

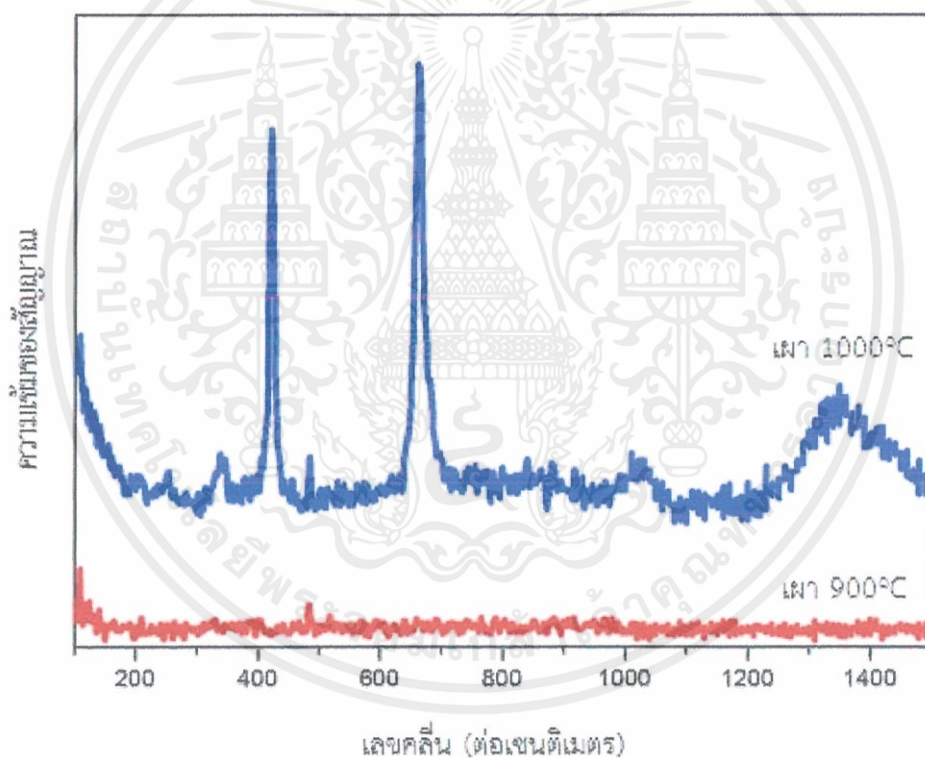
การตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.8 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมีความเข้มของสัญญาณเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่งเลขคลื่น 483 ต่อเซนติเมตร เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวจะมีความเข้มสัญญาณมากขึ้น และมีความเข้มสัญญาณชัดเจนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 420 และ 660 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวิภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมินิต ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 เมื่อผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะเกิดเป็นสารซิงค์อะลูมินิต ซึ่งมีสารอื่นๆ เจือปน



ภาพที่ 4.8 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อน และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.5 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 40:60

ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.9 สารผสมถูกเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะแสดงความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 483 ต่อเซนติเมตรเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะปรากฏความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 421 และ 662 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมินเนต นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 345, 485, 1040 และ 54.8 ซึ่งเป็นสารอื่นๆ เจือปน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า เมื่อสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นสารซิงค์อะลูมินเนต โดยที่มีสารอื่นๆ เจือปนเล็กน้อย

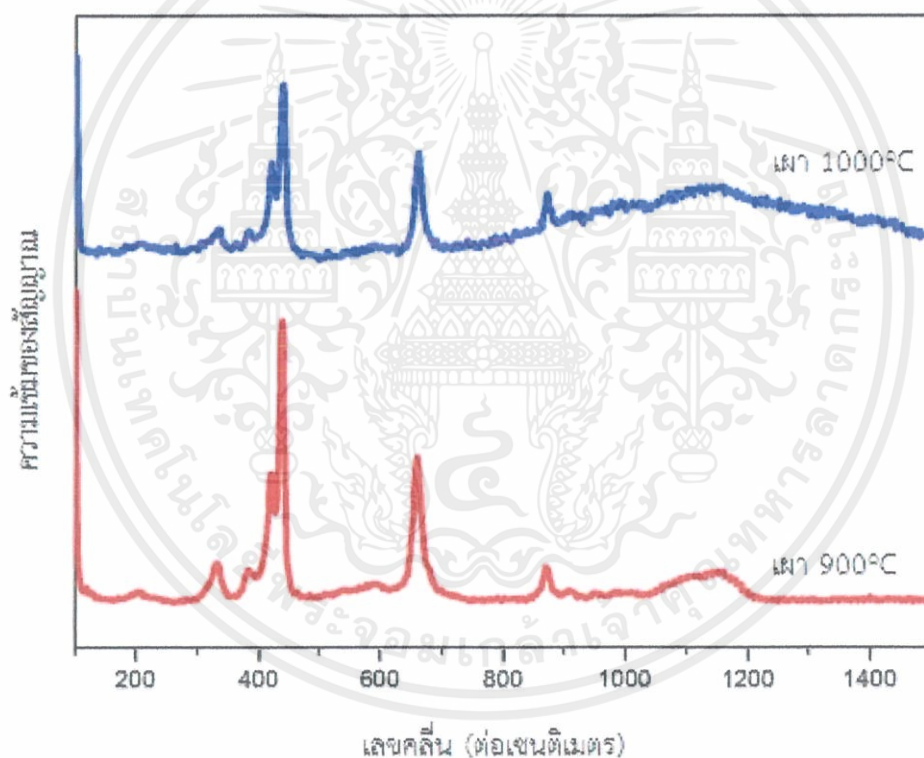


ภาพที่ 4.9 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.6 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 50:50

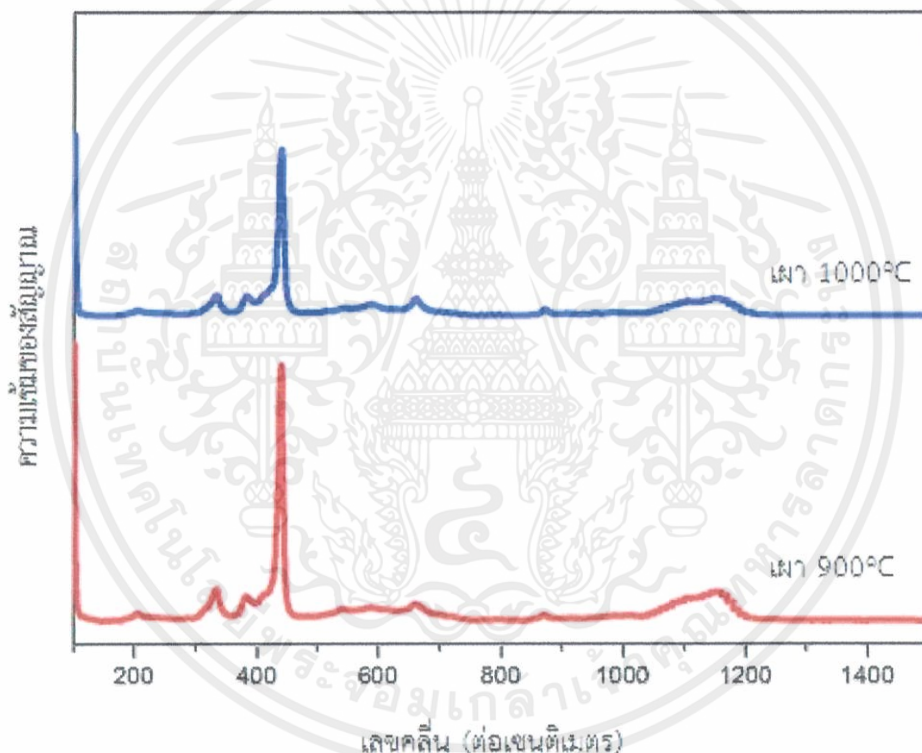
ผลจากการตรวจสอบพันธะของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.10 เมื่อเผาสารที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ให้ผลในทิศทางเดียวกัน พบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 420 และ 661 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมินา ทั้งนี้ยังพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 439 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของสารซิงค์อะลูมินา และพบสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 872 ต่อเซนติเมตรซึ่งไม่ทราบว่าเป็นสารชนิดใด จากผลการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วน 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมินา



ภาพที่ 4.10 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.7 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 70:30

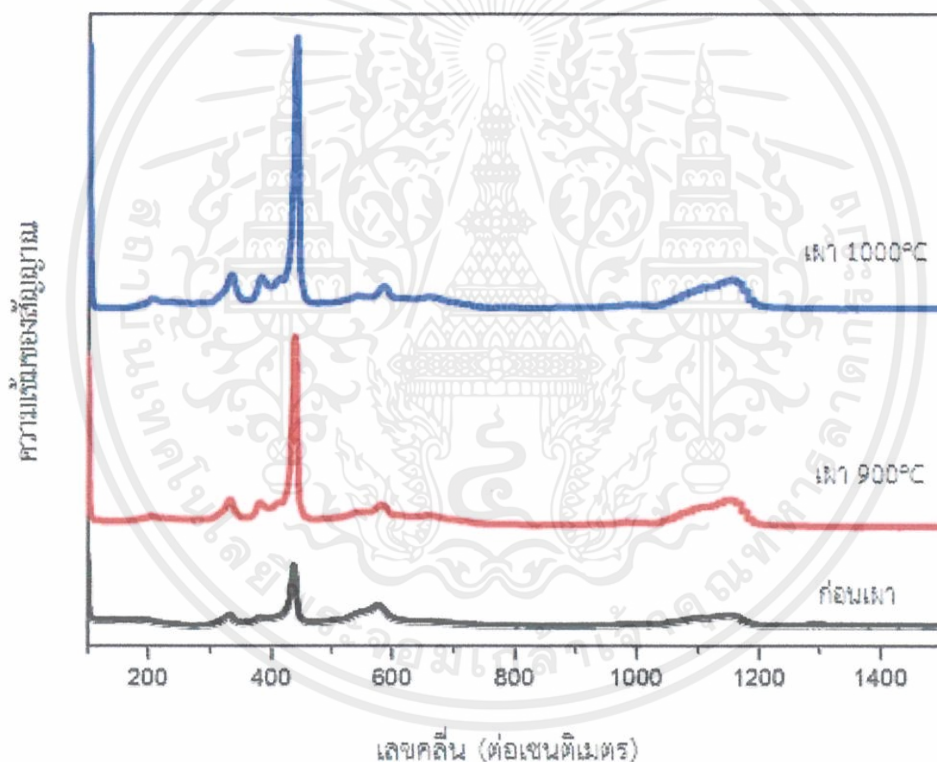
ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.11 สารผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีความเข้มสัญญาณชัดเจนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 333 383 และ 440 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเลขคลื่น 660 ต่อเซนติเมตรซึ่งสอดคล้องกับสารซิงค์อะลูมินา จากผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดสารซิงค์อะลูมินาขึ้นโดยผสมอยู่กับซิงค์ออกไซด์



ภาพที่ 4.11 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.8 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 100:0

ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.12 สารก่อนเผา และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส มีความเข้มสัญญาณใกล้เคียงกัน โดยมีความเข้มสัญญาณชัดเจนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 333 383 และ 440 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับวัฏภาคพันธะของซิงค์ออกไซด์ โดยความเข้มสัญญาณของสารก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสจะมีค่าจากน้อยไปหามาก จากผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีจึงสรุปได้ว่า สารซิงค์ออกไซด์เมื่อผ่านการเผาจะทำให้มีความเข้มสัญญาณของรามานสเปกโตรสโคปีเพิ่มขึ้น



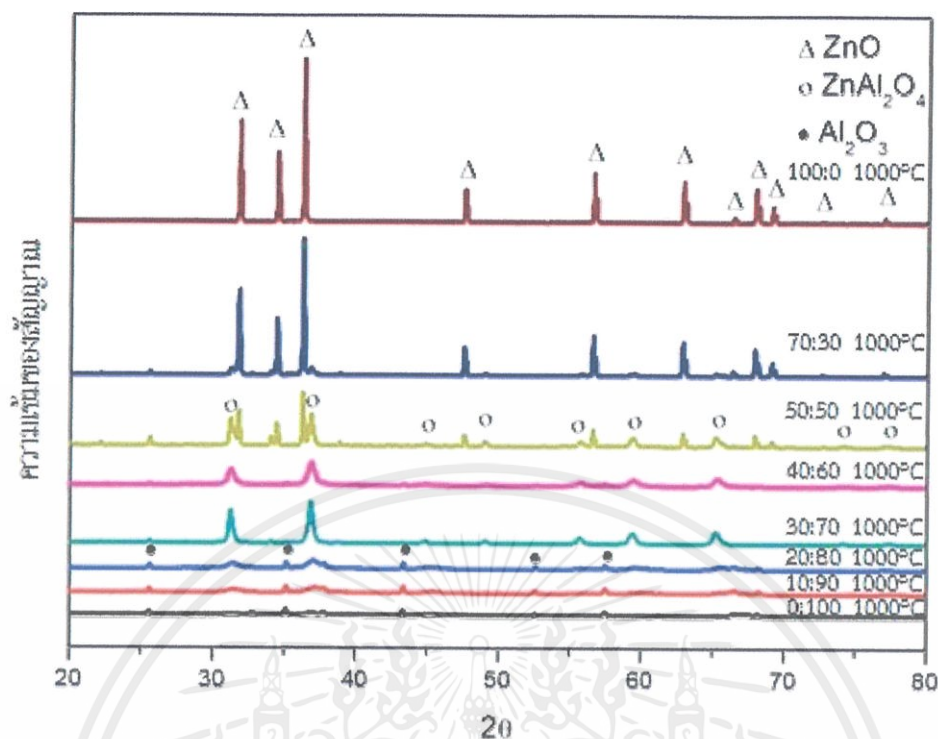
ภาพที่ 4.12 ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปีของซิงค์ออกไซด์หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

### 4.3 การเปรียบเทียบการตรวจสอบระนาบโครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด

จากการตรวจสอบพันธะของสารผสมผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สารผสมน่าจะมีลักษณะโครงสร้างที่ดีกว่า เนื่องจากมีการดูดกลืนพลังงานของพันธะดีกว่า ดังนั้นในการตรวจสอบระนาบโครงสร้างของสารผสม จึงเลือกเปรียบเทียบสารผสมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาน่าจะทำให้โครงสร้างของสารเกิดความเปลี่ยนแปลง จึงมีการตรวจสอบระนาบระหว่างก่อนเผา และหลังเผาเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของสารแต่ละอัตราส่วนโมลว่าหลังผ่านการเผาจะเป็นอย่างไร

#### 4.3.1 ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ

การเปรียบเทียบผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.13 ที่อัตราส่วนโมล 10:90 และ 20:80 แสดงความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับวัฏภาคระนาบโครงสร้างของอะลูมิเนียมออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนตเล็กน้อย เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 และ 40:60 จะแสดงวัฏภาคระนาบโครงสร้างของซิงค์อะลูมิเนตชัดเจน โดยที่อัตราส่วน 30:70 จะมีความเข้มสัญญาณสูงที่สุด ที่อัตราส่วน 50:50 และ 70:30 แสดงสัญญาณทั้งซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนตผสมในรูปแบบของวัสดุประกอบ จากผลการตรวจสอบระนาบโครงสร้างดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า สารผสมที่อัตราส่วนโมล 10:90 และ 20:80 จะเป็นสารประกอบระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมเป็นวัสดุประกอบกับซิงค์อะลูมิเนต ที่อัตราส่วนโมล 30:70 และ 40:60 จะเป็นสารซิงค์อะลูมิเนตชัดเจน ที่อัตราส่วนโมล 50:50 และ 70:30 จะเป็นสารประกอบระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนต



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.2 การคำนวณขนาดโครงสร้างผลึกด้วยสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer Equation)

ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนโมลของสาร (ซิงค์ออกไซด์:อะลูมิเนียมออกไซด์)	ขนาดโครงสร้างผลึก (นาโนเมตร)
0:100 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	53
10:90 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	60
20:80 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	63
30:70 ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ )	22
40:60 ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ )	15
50:50 ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ )	30
(ZnO)	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ขนาดโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

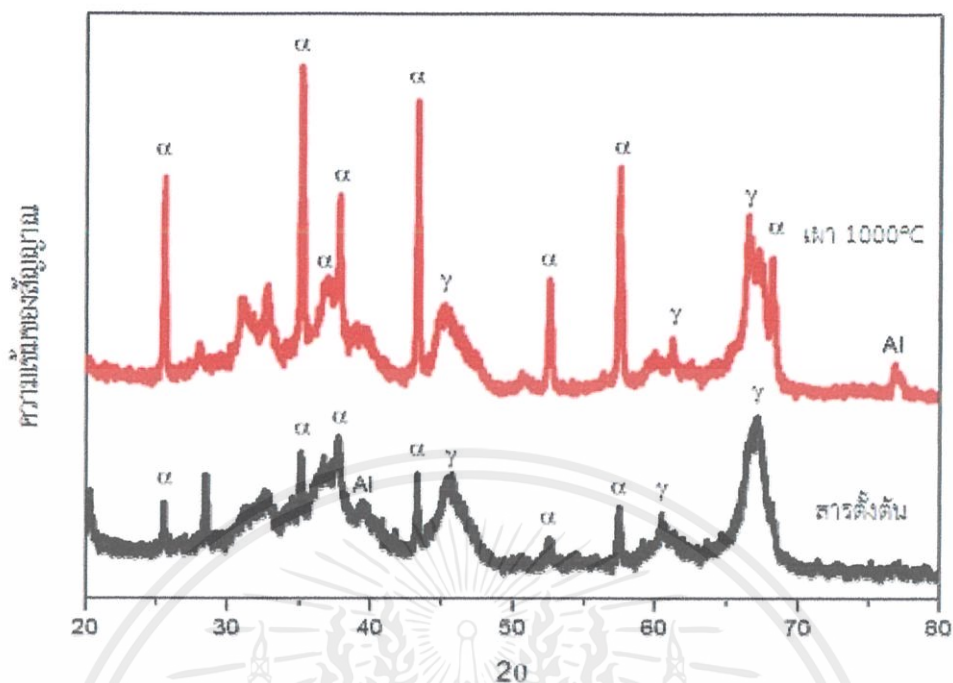
อัตราส่วนโมลของสาร (ซิงค์ออกไซด์:อะลูมิเนียมออกไซด์)	ขนาดโครงสร้างผลึก (นาโนเมตร)
70:30 (ZnO)	100
100:0 (ZnO)	108

### 4.3.3 การตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ

#### 4.3.3.1 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 0:100

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ตั้งต้น และอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศา แสดงในภาพที่ 4.14 พบว่าความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่ง  $2\theta = 45.7^\circ$ ,  $60.5^\circ$  และ  $67^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคสัญญาณเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสของแกรมมา (Y) และ ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.54^\circ$ ,  $35.1^\circ$ ,  $37.6^\circ$ ,  $43.3^\circ$ ,  $52.5^\circ$ ,  $57.47^\circ$  และ  $68.17^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับอะลูมิเนียมออกไซด์เฟสแอลฟา ( $\alpha$ ) โดยหลังจากที่สารผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะมีความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนเฟสแอลฟาเพิ่มขึ้น และมีความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนของเฟสแกรมมาลดลง อย่างไรก็ตาม พบความเข้มของสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 28.52^\circ$  ซึ่งคาดว่าเป็นสารเจือปนที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม มีการเจือปนในระหว่างการทำงานวิจัยหรือสืบเนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ นอกจากนี้การเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสมีการแสดงความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 76.84^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของอะลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า เมื่อสารอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการเผา จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารอะลูมิเนียมออกไซด์จากเฟสแกรมมาเป็นเฟสแอลฟา สอดคล้องกับงานวิจัยของ E. Yalamac [37] และคณะที่ได้ และมีสารอื่นๆ เจือปนเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



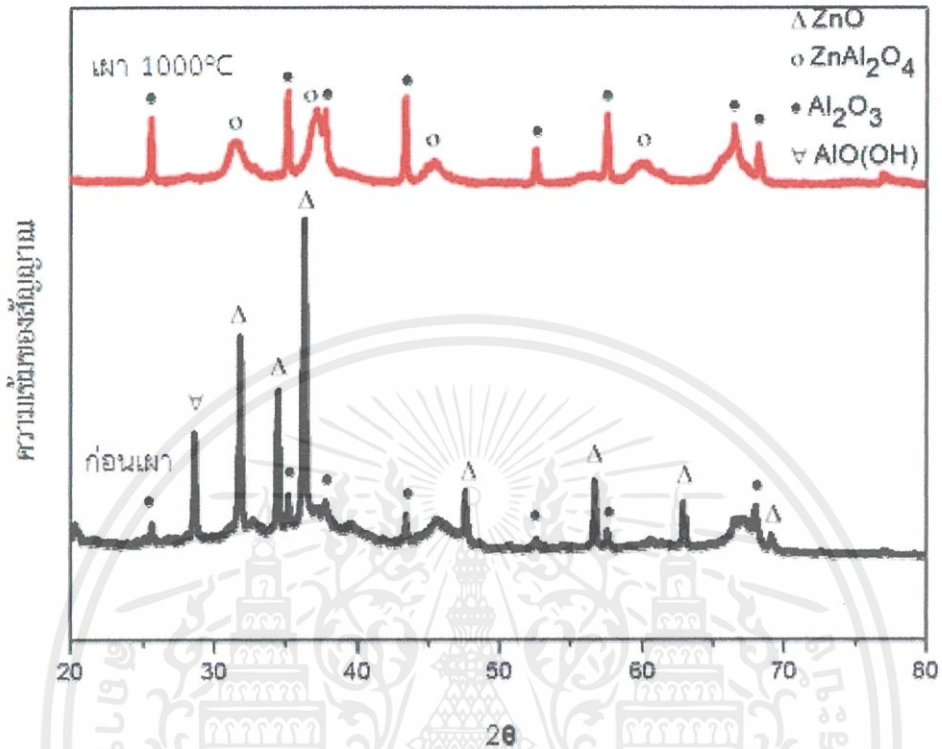
ภาพที่ 4.14 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ตั้งต้น และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการบัดด้วยลูกบิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.2 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 10:90

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 10:90 ผ่านกระบวนการบัดด้วยลูกบิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.15 สารก่อนเผาจะแสดงความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.82^\circ, 34.48^\circ, 36.31^\circ, 47.57^\circ, 56.54^\circ, 62.88^\circ, 67.95^\circ$  และ  $69.11^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [112] และ [201] ของซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.61^\circ, 35.19^\circ, 43.38^\circ, 57.52^\circ$  และ  $67.17^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของอะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 28.64^\circ$  คาดว่าเป็นสารเจือปนที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม เมื่อสารผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์จะชัดเจนมากขึ้นและสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ลดลง พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.32^\circ, 35.15^\circ, 37.10^\circ, 66.5^\circ$  และ  $68.18^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคการเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มเติม ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สรุปได้ว่า สารผสมที่อัตราส่วน 10:90 ก่อนเผ่าจะแสดงสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ แต่เมื่อผ่านการเผาแล้วจะแสดงสัญญาณเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์เป็นสารโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อเผาสารจึงค่อยๆจัดเรียงตัวเป็นโครงผลึก มีความชัดเจนของระนาบมากขึ้น ทั้งนี้ยังไม่พบสัญญาณเลี้ยวเบนของสารชนิดใหม่แต่อย่างไร ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี



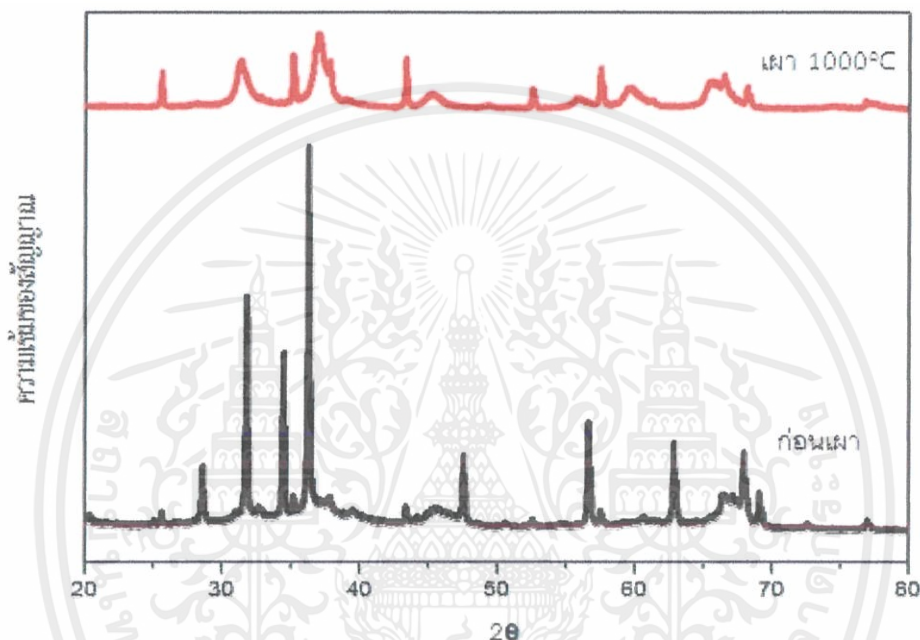
ภาพที่ 4.15 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.3 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 20:80

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.16 สารก่อนเผาจะแสดงความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.83^\circ, 34.5^\circ, 36.31^\circ, 47.6^\circ, 56.64^\circ, 62.9^\circ, 67.97^\circ$  และ  $69.11^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [112] และ [201] ของซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.61^\circ, 35.20^\circ, 43.40^\circ, 57.51^\circ$  และ  $67.15^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของอะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 28.65^\circ$  คาดว่าเป็นสารเจือปนที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม เมื่อสารผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์จะชัดเจนมากขึ้นและสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ลดลง พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.25^\circ, 35.16^\circ, 36.95^\circ, 66.51^\circ$  และ  $68.19^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคการเลี้ยวเบนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.25^\circ, 36.95^\circ, 45.143^\circ, 55.67^\circ, 59.4^\circ$  และ  $65.51^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ [220], [311], [400], [422], [511] และ [400] ของสารซิงค์อะลูมิเนียมเนต ซึ่งความเข้มสัญญาณดังกล่าวยังไม่ค่อยชัดเจน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่าสารผสมที่อัตราส่วน 20:80 ก่อนเผาจะแสดงสัญญาณการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ แต่เมื่อผ่านการเผาแล้วจะแสดงสัญญาณการเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และเกิดสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปี



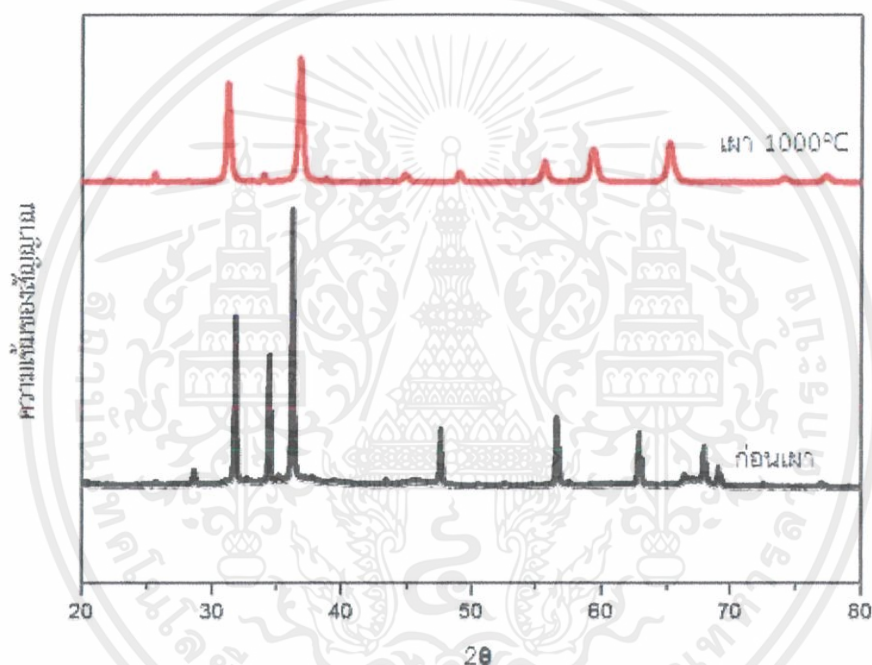
ภาพที่ 4.16 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 20:80 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.4 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 30:70

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 30:70 ที่ผ่านการบดก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.17 ก่อนบดมีความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.82^\circ, 34.48^\circ, 36.3^\circ, 47.58^\circ, 56.63^\circ, 62.9^\circ, 67.98^\circ$  และ  $69.11^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคการเลี้ยวเบนของสารซิงค์ออกไซด์ที่ระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [112] และ [201] และพบความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 28.64^\circ$  คาดว่าเป็นสารเจือปนที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม เมื่อสารผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะพบความเข้มสัญญาณการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.2^\circ, 36.81^\circ, 44.72^\circ, 48.95^\circ, 55.57^\circ, 59.31^\circ, 65.15^\circ, 73.96^\circ$  และ  $77.3^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลี้ยวเบนของสารซิงค์อะลูมิเนียมที่ระนาบ [220], [311], [400], [331], [422], [511], [440], [620] และ [533] และยังพบความเข้มการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.57^\circ$  และ  $44.72^\circ$  ซึ่งเป็นสารเจือปนเพิ่มเติม จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า เมื่อทำการเผา สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 30:70 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดสารซิงค์อะลูมิเนียมขึ้น และมีสารอื่นเจือปนเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากรามานสเปกโตรสโคปี

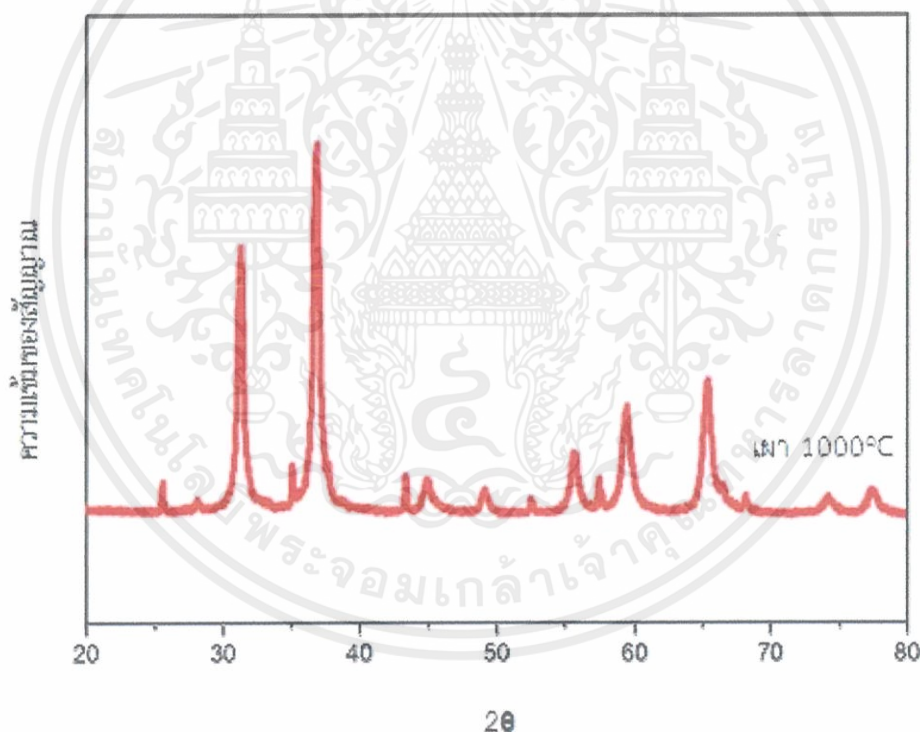


ภาพที่ 4.17 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.5 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 40:60

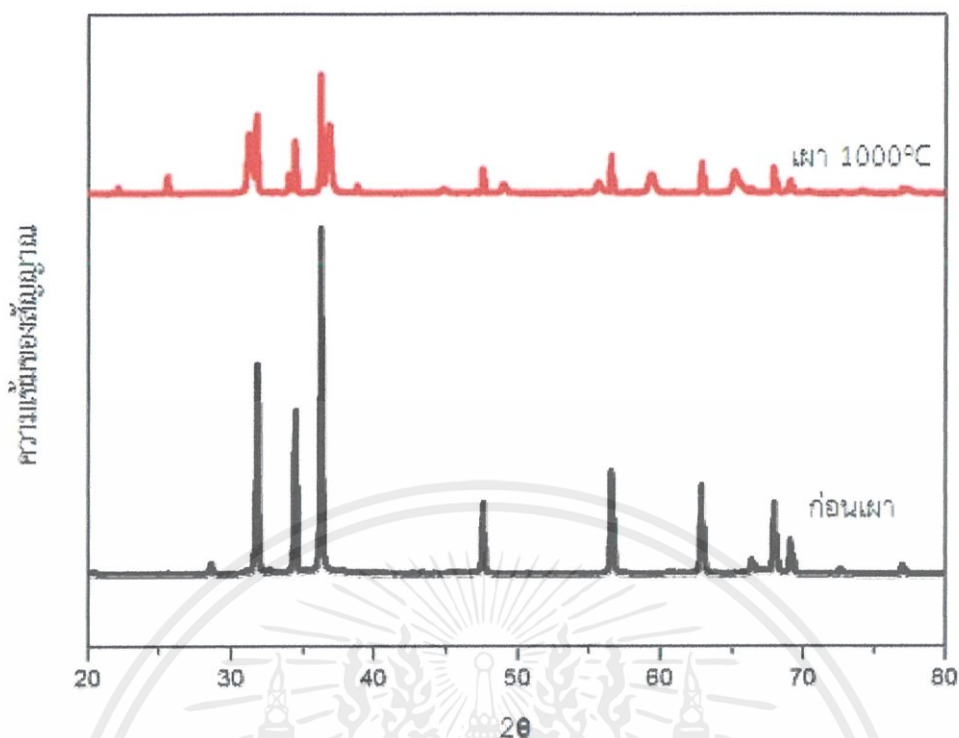
ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.18 พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.25^\circ, 36.84^\circ, 44.91^\circ, 49.11^\circ, 55.64^\circ, 59.35^\circ, 65.37^\circ, 74.02^\circ$  และ  $77.35^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคเลี้ยวเบนของสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตที่ระนาบ [220], [311], [400], [331], [422], [511], [440], [620] และ [533] และยังพบความเข้มการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.55^\circ, 43.33^\circ, 52.53^\circ, 57.47^\circ$  และ  $68.21^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ พบสารเจือปนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 28.61^\circ$  ซึ่งคาดว่าเป็นสารเจือปนที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะมีสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตเกิดขึ้น และมีสารอะลูมิเนียมออกไซด์เหลืออยู่ เกิดเป็นวัสดุประกอบระหว่างซิงค์อะลูมิเนียมเนตและอะลูมิเนียมออกไซด์



ภาพที่ 4.18 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.6 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 50:50

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.19 สารผสมที่ผ่านการบดก่อนเผา แสดงความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.81^\circ, 34.48^\circ, 36.3^\circ, 47.58^\circ, 56.63^\circ, 62.9^\circ, 66.38^\circ, 67.98^\circ, 69.11^\circ, 72.6^\circ$  และ  $77.00^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบโครงสร้างผลึกของซิงค์ที่ระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [200], [112], [201], [004] และ [202] หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.76^\circ, 34.44^\circ, 36.25^\circ, 47.55^\circ, 56.58^\circ, 62.88^\circ, 66.35^\circ, 67.94^\circ, 69.06^\circ, 72.61^\circ$  และ  $77.24^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [200], [112], [201], [004] และ [202] ของซิงค์ออกไซด์ และยังพบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $2\theta = 31.26^\circ, 34.04^\circ, 36.82^\circ, 45.04^\circ, 48.93^\circ, 55.62^\circ, 59.33^\circ, 65.17^\circ, 68.72^\circ, 74.00^\circ$  และ  $76.94^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบโครงสร้างผลึกของซิงค์อะลูมิเนียมที่ระนาบ [111], [220], [311], [400], [331], [422], [511], [440], [531], [620] และ [533] นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.55^\circ, 38.82^\circ, 44.75^\circ$  และ  $57.67^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับสารอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา จะแสดงความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนระนาบของซิงค์ออกไซด์ ไม่มีการแสดงความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนของอะลูมิเนียมออกไซด์แต่อย่างใด หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์ ซิงค์อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมออกไซด์

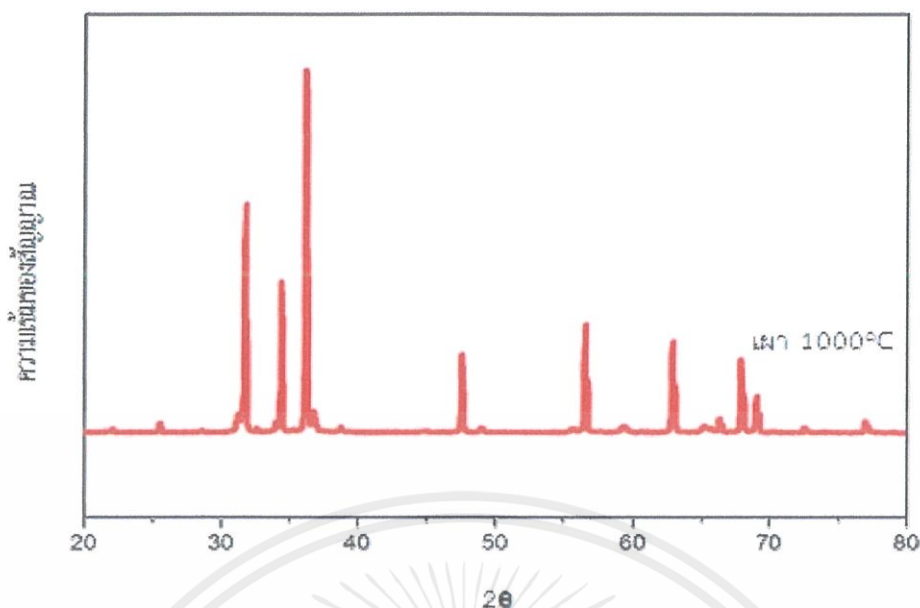


ภาพที่ 4.19 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.7 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 70:30

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.20 พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.76^\circ, 34.42^\circ, 36.25^\circ, 47.53^\circ, 56.58^\circ, 62.86^\circ, 66.35^\circ, 67.93^\circ, 69.06^\circ, 72.58^\circ$  และ  $76.94^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของสารซิงค์ออกไซด์ที่ระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [200], [112], [201], [004] และ [202] พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.27^\circ, 34.02^\circ, 36.82^\circ, 44.89^\circ, 48.95^\circ, 55.62^\circ, 59.33^\circ, 65.17^\circ, 69.06^\circ, 74.00^\circ$  และ  $76.94^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของสารซิงค์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ระนาบ [220], [311], [400], [331], [422], [511], [440], [531], [620] และ [533] นอกจากนี้ยังพบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25.54^\circ$  และ  $57.61^\circ$  ซึ่งเป็นระนาบส่วนหนึ่งของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า สารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะเป็นสารประกอบระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนียมออกไซด์ โดยมีอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่เล็กน้อย

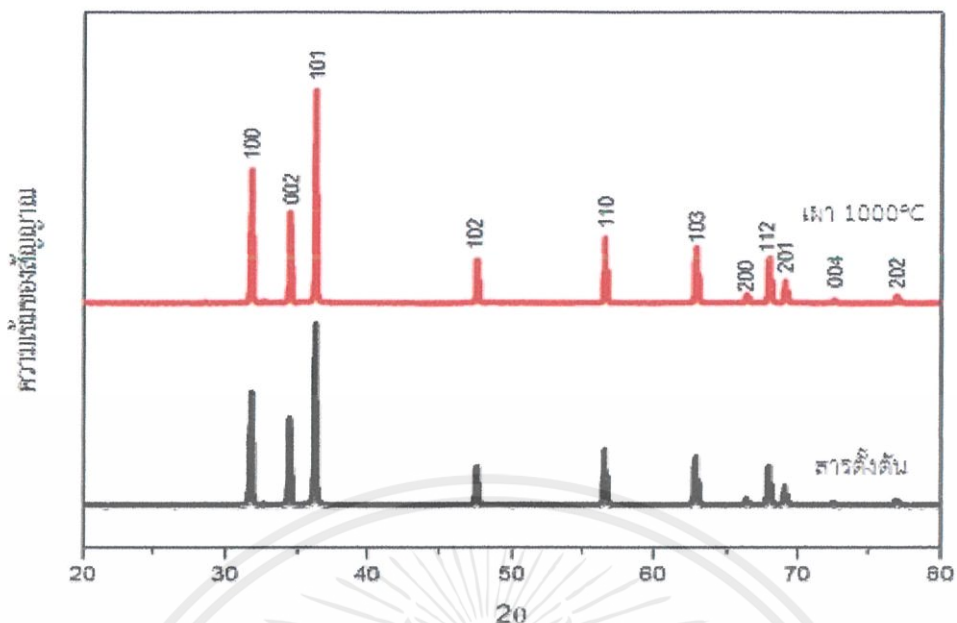
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.8 อัตราส่วนซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 100:0

ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารซิงค์ออกไซด์ตั้งต้น และหลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.21 ทั้งสารตั้งต้น และหลังผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $2\theta = 31.79^\circ, 34.44^\circ, 36.27^\circ, 47.55^\circ, 56.6^\circ, 62.86^\circ, 66.38^\circ, 67.95^\circ, 69.09^\circ, 72.58^\circ$  และ  $76.96^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับวัฏภาคระนาบของสารซิงค์ออกไซด์ที่ระนาบ [100], [002], [101], [102], [110], [103], [200], [112], [201], [004] และ [202] ซึ่งหลังจากผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้ความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนเพิ่มมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงสรุปได้ว่า เมื่อผ่านกระบวนการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้ระนาบโครงสร้างผลึกของสารซิงค์ออกไซด์มีความชัดเจนมากขึ้น



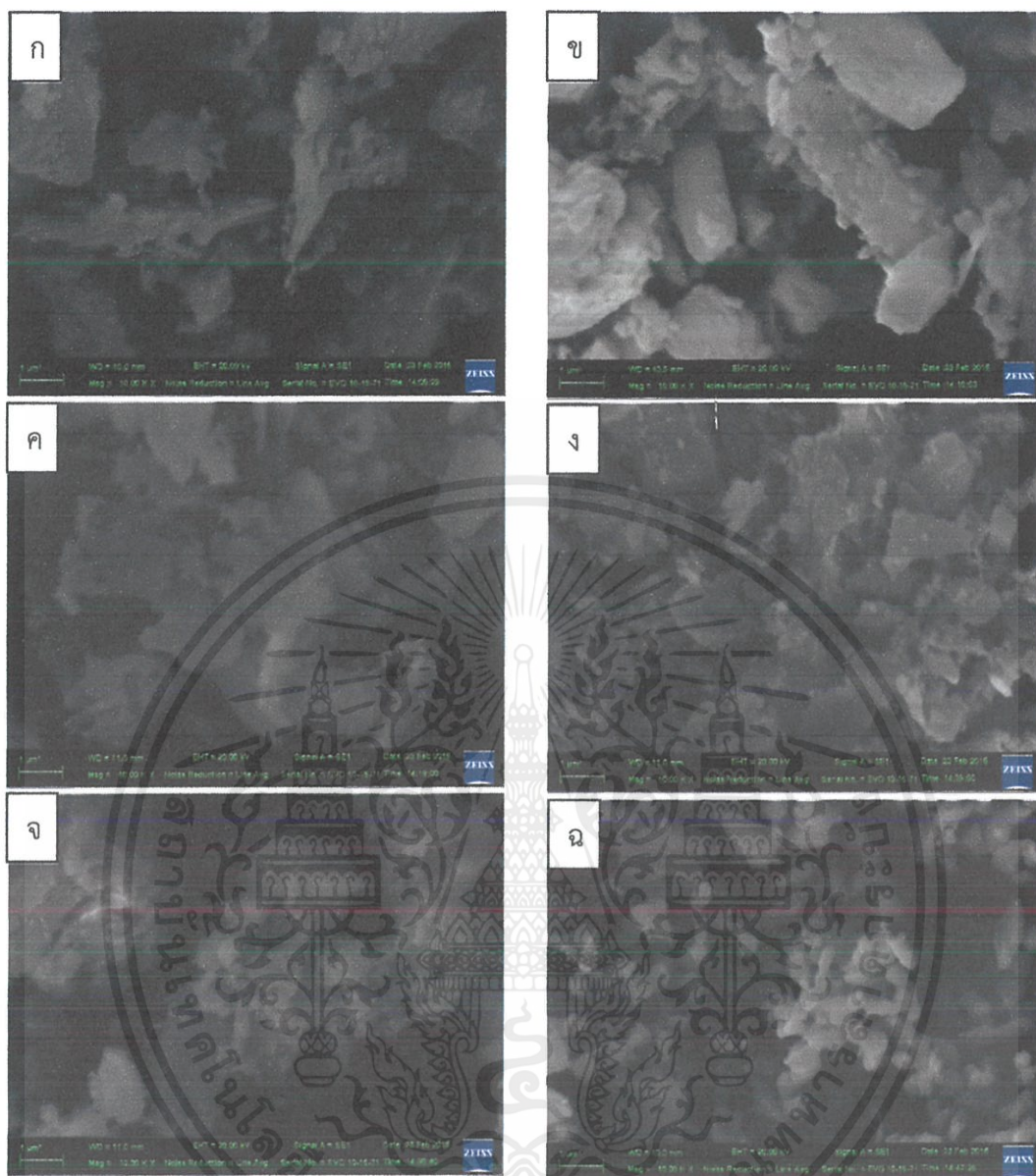
ภาพที่ 4.21 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงผลึกของสารซิงค์ออกไซด์ตั้งต้น และหลังจากผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.4 การเปรียบเทียบการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อผ่านกระบวนการบดเชิงกลด้วยลูกบด

##### 4.4.1 ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของสารผสมอัตราส่วนโมลต่างๆ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

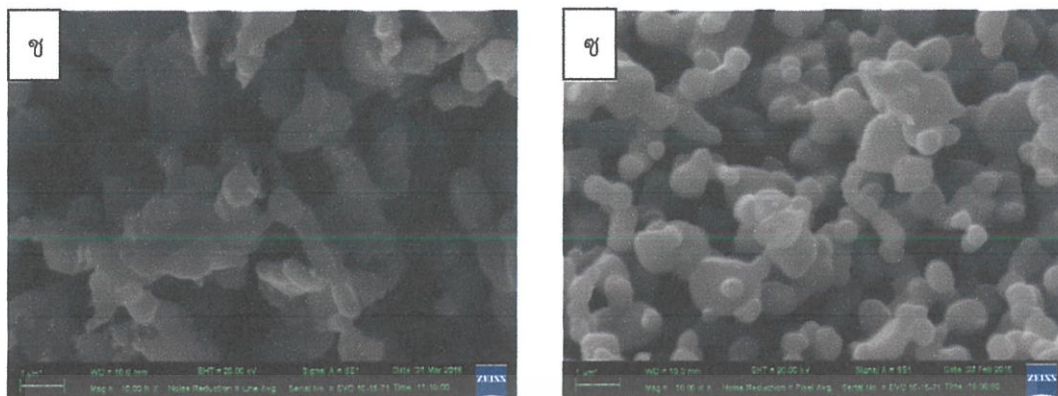
ภาพที่ 4.22 (ก), (ข), (ค), (ง) และ (จ) อัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70 และ 40:60 จะเห็นว่าสารผสมมีรูปร่างไม่แน่นอนโดยในอัตราส่วนดังกล่าวจะมีอะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าซิงค์ออกไซด์ ภาพที่ 4.22 (ฉ) ที่อัตราส่วน 50:50 สารผสมส่วนใหญ่มีลักษณะกลมและมีส่วนน้อยที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แสดงสัญญาณบ่งชี้ของอะลูมิเนียมออกไซด์เพียงเล็กน้อย ภาพที่ 4.22 (ช) และ (ซ) อัตราส่วน 70:30 และ 100:0 เมื่อมีซิงค์ออกไซด์ผสมเพิ่มขึ้น ภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 ลักษณะอสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) 0:100, (ข) 10:90, (ค) 20:80, (ง) 30:70, (จ) 40:60, (ฉ) 50:50, (ช) 70:30 และ (ซ) 100:0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



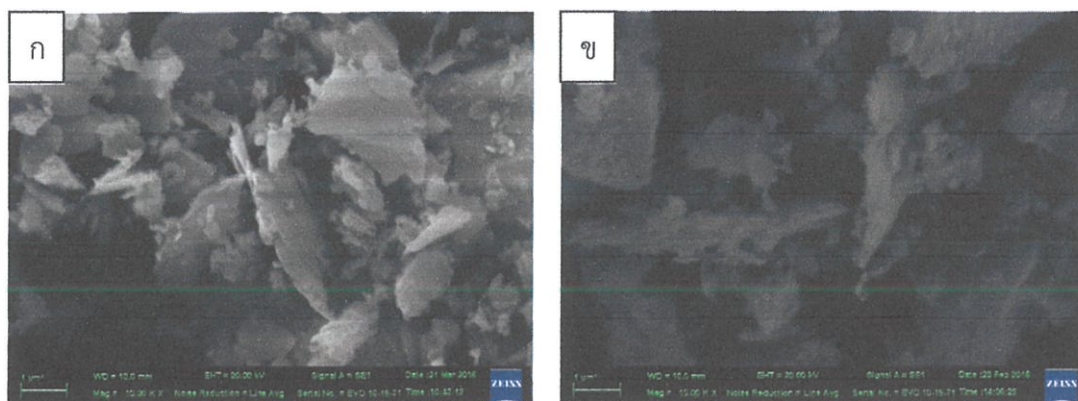
ภาพที่ 4.22 (ต่อ) ลักษณะอสัณฐานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) 0:100, (ข) 10:90, (ค) 20:80, (ง) 30:70, (จ) 40:60, (ฉ) 50:50, (ช) 70:30 และ (ซ) 100:0

#### 4.4.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพผลึกของสารอัตราส่วนโมลต่างๆ

##### 4.4.2.1 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 0:100

ลักษณะสัณฐานของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ก่อนผ่านกระบวนการบดและเผาเทียบกับหลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.23 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) ก่อนผ่านกระบวนการบดและเผา และ (ข) หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สารทั้ง 2 มีลักษณะรูปร่างคล้ายคลึงกัน โดยเป็นแบบรูปร่างไม่แน่นอน จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะสัณฐานของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ก่อนและหลังผ่านการบดและเผา มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยหลังจากผ่านการบดและเผา สารจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 ลักษณะสัณฐานของสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) สารตั้งต้น (ข) ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.4.2.2 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 10:90

ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 10:90 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.24 ลักษณะของสารเป็นแผ่นและบางส่วนมีรูปร่างไม่แน่นอน

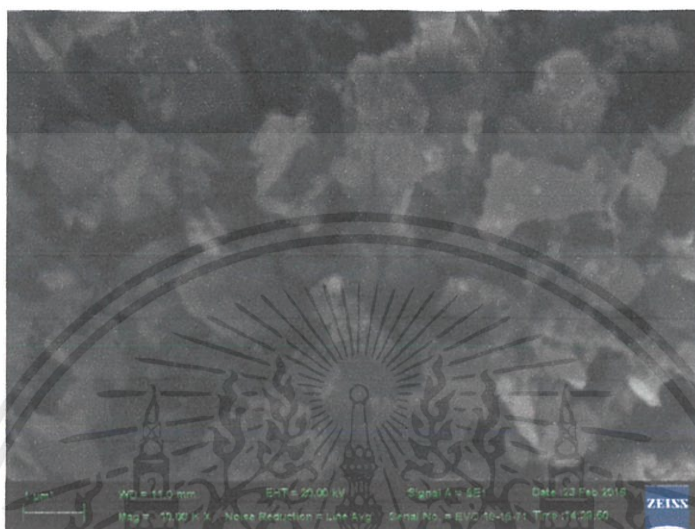


ภาพที่ 4.24 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 10:90 ที่ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2.3 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 20:80

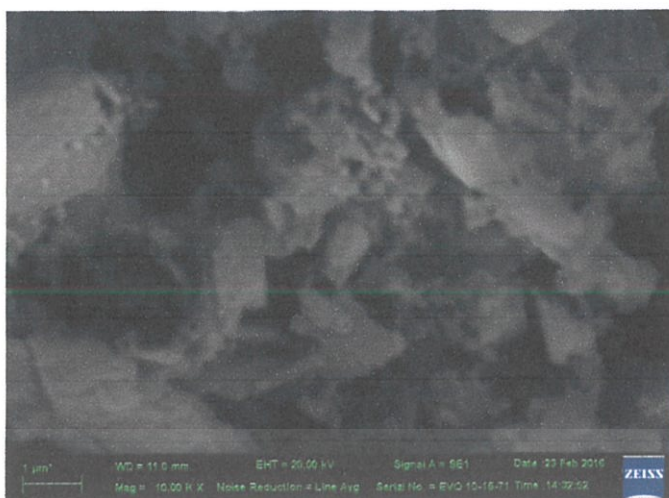
ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 20:80 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.25 พบว่าลักษณะของสารผสมมีความเป็นรูปร่างมากขึ้น และมีขนาดเล็กกลง



ภาพที่ 4.25 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 20:80 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.4.2.4 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 30:70

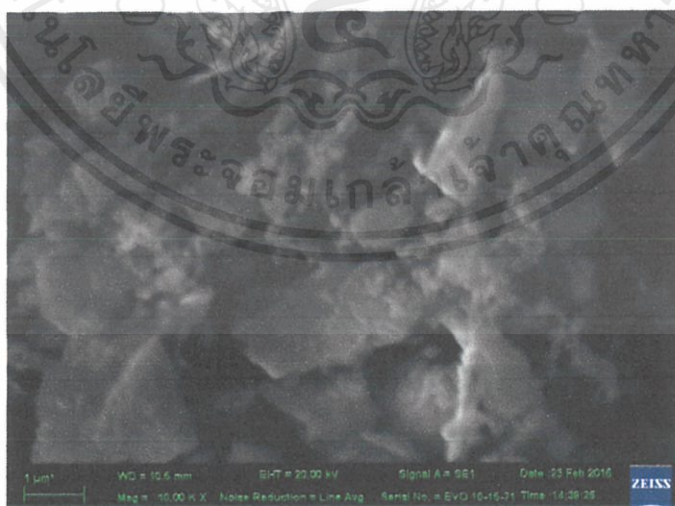
ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 30:70 ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.26 พบว่าสารมีการจับกันเป็นขนาดใหญ่มากขึ้น



ภาพที่ 4.26 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 30:70 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.4.2.5 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 40:60

ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.27 พบว่าสารมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มมากขึ้น มีแบบแผ่นใหญ่และอนุภาคกลมประกอบกัน

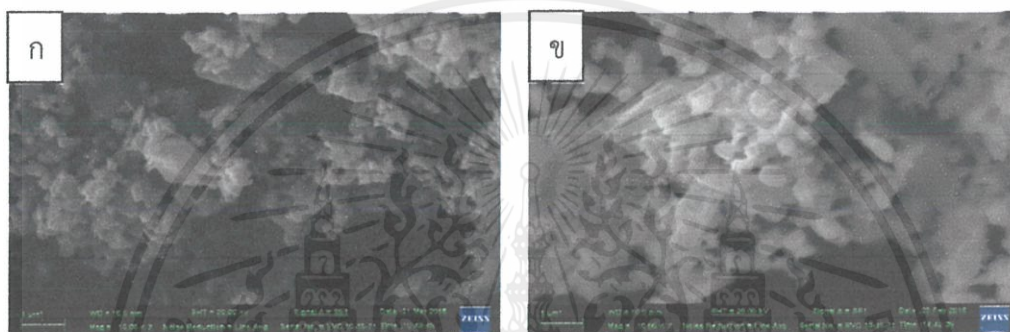


ภาพที่ 4.27 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 40:60 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2.6 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 50:50

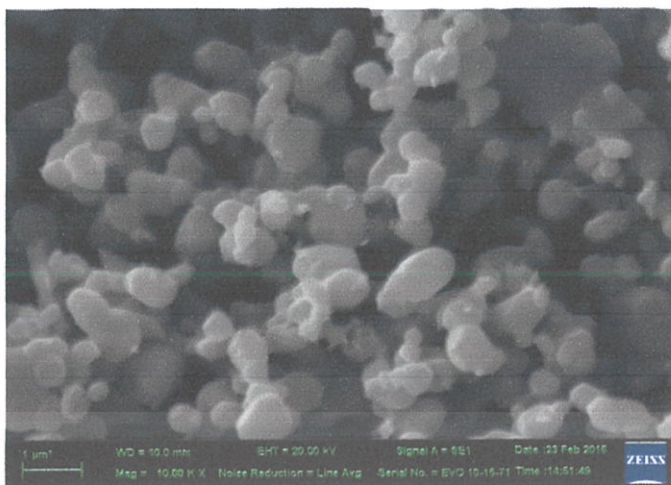
ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 4.28 สารก่อนเผาที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) มีลักษณะเป็นแผ่นใหญ่ และมีอนุภาคเล็กๆ เกาะอยู่เป็นจำนวนมาก หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ค) สารมีการเชื่อมติดกัน หลอมรวมกัน เมื่อสังเกตสารก่อนเผาที่กำลังขยาย 600 เท่าก่อนเผา (ข) สารจะอยู่แบบกระจัดกระจาย แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ง) สารจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน



ภาพที่ 4.28 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบด กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) ก่อนเผา และ (ข) หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.4.2.7 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 70:30

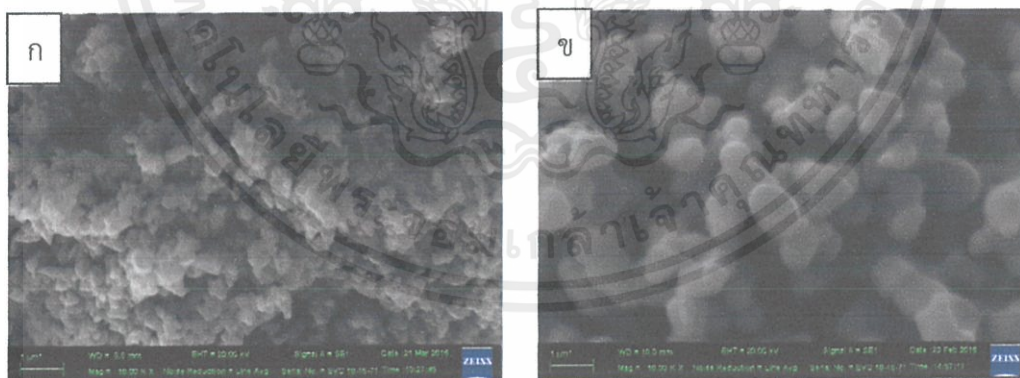
ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดหลังการเผาที่อุณหภูมิกำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.29 ลักษณะของสารเป็นเม็ดกลมเชื่อมติดกัน มีบางส่วนเป็นแผ่น



ภาพที่ 4.29 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 70:30 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดหลังการเผาที่อุณหภูมิกำลังขยาย 10,000

#### 4.4.2.8 อัตราส่วนโมลของซิงค์ออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 100:0

ลักษณะสัณฐานของสารซิงค์ออกไซด์ตั้งต้น และหลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.30 ซิงค์ออกไซด์ตั้งต้นที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเกาะติดกัน แต่เมื่อผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ข) สารจะอยู่เป็นกลุ่มแยกกัน แต่เมื่อผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สารจะเกาะกลุ่มใหญ่มากขึ้น



ภาพที่ 4.30 ลักษณะสัณฐานของสารซิงค์ออกไซด์ กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) สารตั้งต้น (ข) หลังผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดและเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การวิเคราะห์ลักษณะสารผสมที่อัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากัน (อัตราส่วน50:50) ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ

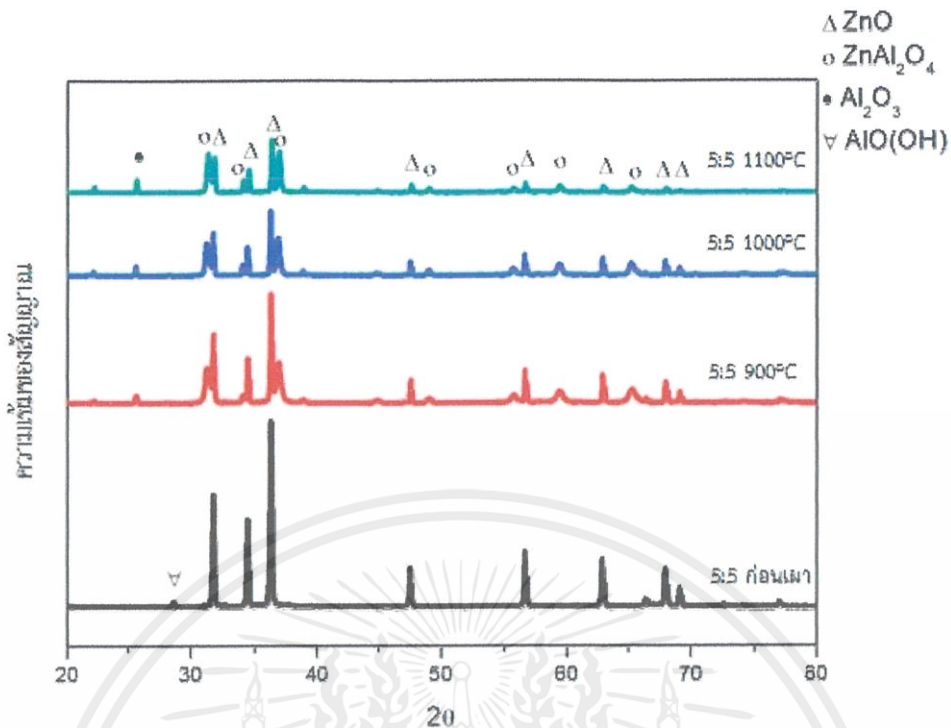
จากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปี และตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 50:50 ภาพที่ 4.4 และ 4.13 บ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และซิงค์อะลูมิเนต ซึ่งคาดเคลื่อนสมมติฐานที่ตั้งไว้โดยอ้างอิงจากสมการ



เนื่องจากสมการดังกล่าวเป็นอัตราส่วนโมล 1:1 หรือ 50:50 ดังนั้นจึงสมมติฐานว่าอัตราส่วนดังกล่าวจะมีสารซิงค์อะลูมิเนตเพียงอย่างเดียว ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสารผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มเติม โดยการเผาสารที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเพิ่มเติม และทำการเปรียบเทียบกับก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น

##### 4.5.1 ผลจากการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผสมดังกล่าวก่อนเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส มาเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.31 พบว่าสารก่อนเผาแสดงสัญญาณของซิงค์ออกไซด์ชัดเจน เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เริ่มมีความเข้มสัญญาณสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์อะลูมิเนตเกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li Han และคณะ [38] เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ความความเข้มสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์จะลดลงและสัญญาณเลี้ยวเบนของซิงค์อะลูมิเนตจะเพิ่มขึ้น อาจสรุปได้ว่าการเผาที่อุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสารซิงค์อะลูมิเนต และหากเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นสารดังกล่าวจะมีความเป็นผลึกมากขึ้น



ภาพที่ 4.31 ผลการตรวจสอบระนาบโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโมล 50:50 ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

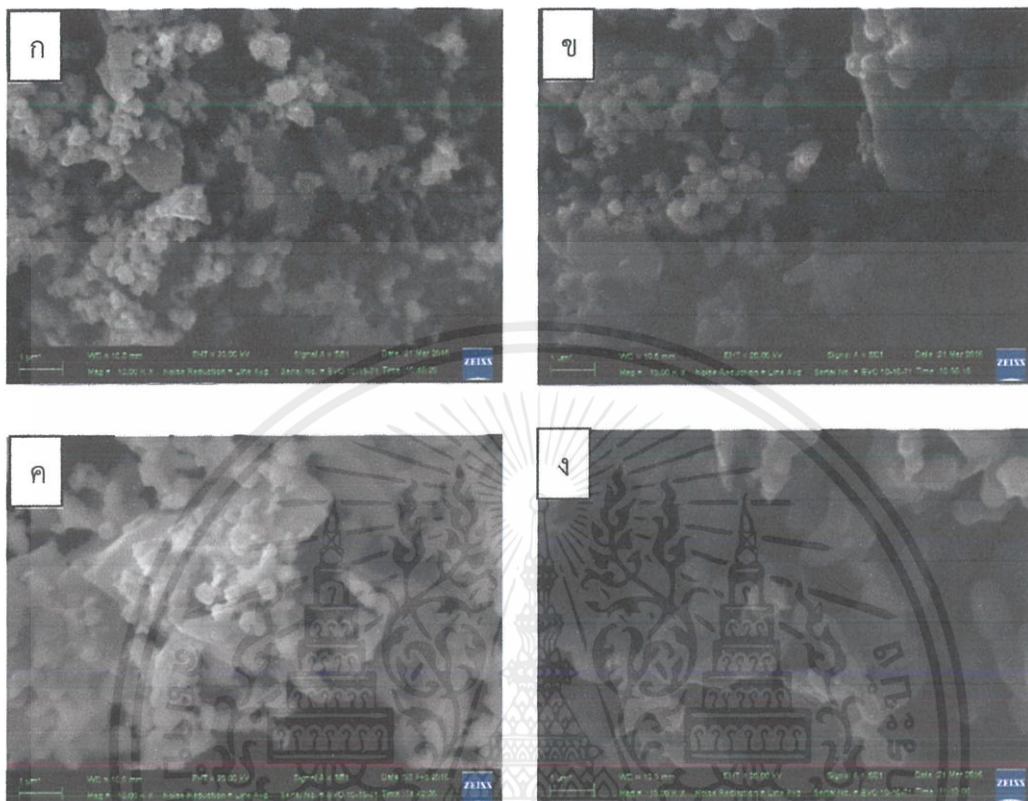
ขนาดโครงสร้างผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วน 50:50 ก่อนเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียสคำนวณด้วยสมการเชอเรอร์ แสดงในตารางที่ 4.3 ที่ก่อนเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีขนาดโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ใหญ่ขึ้นตามลำดับ แต่การเผาที่อุณหภูมิ 1100 ให้ขนาดของซิงค์ออกไซด์ลดลง ส่วนขนาดโครงสร้างผลึกของสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตการเผาสารผสมที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียสจะใหญ่ขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ขนาดโครงผลึกของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วน 50:50 ผ่านการบด ก่อนเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

สารผสมอัตราส่วน 50:50		ขนาดโครงผลึก (นาโนเมตร)
ก่อนบดและเผา	(ZnO)	79
บดและเผา 900°C	(ZnO)	101
	(ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	25
บดและเผา 1000°C	(ZnO)	105
	(ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	30
บดและเผา 1100°C	(ZnO)	73
	(ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	38

#### 4.5.2 ผลจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลจากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมล 50:50 แสดงในภาพที่ 4.32 (ก) สารผสมอัตราส่วน 50:50 ที่ผ่านการบด ก่อนเผา มีลักษณะเป็นวัสดุชิ้นเล็กอยู่ร่วมกับวัสดุแผ่นใหญ่และไม่มีรูปร่างที่แน่นอน เมื่อผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ภาพที่ 4.32 (ข), (ค) และ (ง) สารผสมอยู่ร่วมกันและมีการหลอมรวมเข้าหากัน ซึ่งสอดคล้องกับระนาบของสารผสมที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ภาพที่ 4.32 ที่การเผาด้วยอุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียสจะเกิดสารซิงค์อะลูมินเนตและมีซิงค์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ เป็นวัสดุประกอบระหว่างซิงค์อะลูมินเนตและซิงค์ออกไซด์



ภาพที่ 4.32 ลักษณะสัณฐานของสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน โมล 50:50 (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (ค) 1000 องศาเซลเซียส และ (ง) 1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผสมสารซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้กระบวนการบดด้วยลูกบด จากนั้นผ่านนำไปการเผาเพื่อดูลักษณะของสารผสมที่ได้ มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยบางอย่างได้แก่ เวลาที่ใช้ในการบด อัตราส่วนโมลของสาร และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสาร ทั้งนี้เพื่อสามารถพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวที่เกิดกับกระบวนการบดในงานวิจัยนี้

ทางผู้วิจัยเลือกที่จะเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการบดของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ก่อน เพื่อหาเวลาที่ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กที่สุด เนื่องจากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้พลังงานความร้อนจากการเผาเข้าไปถึงสารได้ง่ายขึ้น และส่งผลให้สารที่ออกมาเกิดการหลอมรวมกันได้ดีขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงเวลาและวัดขนาดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค พบว่าที่เวลา 24 ชั่วโมง ทั้งซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้จะมีขนาดเล็กที่สุด จากผลดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกบดในขั้นตอนนี้ไปที่เวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อัตราส่วนโมลต่างๆ ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลจากรามานสเปกโตรสโคปีพบว่าสารผสมทุกอัตราส่วนโมล มีความเข้มสัญญาณของสัญญาณมากขึ้น โดยเฉพาะการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะให้ความเข้มสัญญาณชัดเจนที่สุด สอดคล้องในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถสรุปได้ว่าสารผสมจะมีความเป็นโคกรผลึกมากขึ้นเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิดังกล่าว นอกจากนี้สารอะลูมิเนียมออกไซด์เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะมีความเข้มสัญญาณของเฟสแอลฟาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มสัญญาณของเฟสแกมมาลดลง

ผลจากการตรวจสอบพันธะด้วยรามานสเปกโตรสโคปียังพบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสมีการแสดงสัญญาณที่สอดคล้องกับวัฏภาคของสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตที่อัตราส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70 และ 40:60 จะเกิดสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยผลดังกล่าวพบว่าสารอัตราส่วน 0:100, 10:90 และ 20:80 ไม่เกิดสารซิงค์อะลูมิเนียมเนตแต่อย่างไร แต่ผลการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนโมล

50:50, 70:30 และ 100:0 ยังคงเกิดสารซิงค์อะลูมิเนียม แต่จะเกิดน้อยลงและเริ่มแสดงความเข้มข้นของสารซิงค์ออกไซด์มากขึ้น

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะของสาร โดยสารอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีลักษณะรูปร่าง และเป็นแบบแผ่น ส่วนซิงค์ออกไซด์จะเป็นลักษณะเม็ดกลม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของซิงค์ออกไซด์ ลักษณะสัณฐานของสารผสมจะเริ่มมีเม็ดขนาดเล็กถูกล้อมเข้ากับแผ่นขนาดใหญ่ โดยมีวัสดุรูปร่างปะปนอยู่ สอดคล้องกับภาพของซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ผสม

สรุปได้ว่าสารผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านกระบวนการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อสารผสมผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส สัญญาณของการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีและเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะชัดเจนขึ้น โดยที่อัตราส่วนโมล 10:90 และ 20:80 จะเป็นสารอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับสารซิงค์อะลูมิเนียมและมีสารอื่นๆ เจือปนเล็กน้อย อัตราส่วนโมล 30:70 และ 40:60 จะเป็นสารซิงค์อะลูมิเนียมและสารเจือปน ที่อัตราส่วนโมล 50:50 และ 70:30 จะเป็นสารซิงค์ออกไซด์ผสมกับซิงค์อะลูมิเนียม การเผาที่สารผสมอัตราส่วน 50:50 ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สารซิงค์ออกไซด์มีความเป็นโครงสร้างผลึกดีขึ้น

## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

- 5.2.1 สารอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารที่ดูดความชื้นได้ง่าย ส่งผลให้สารผสมขึ้นได้ง่ายเป็นปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี แก้ไขด้วยการอบสารก่อนนำไปวิเคราะห์
- 5.2.2 เนื่องจากอนุภาคสารมีขนาดเล็กทำให้เกิดการรวมตัวได้ง่าย เป็นปัญหาในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ควรมีการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของสารที่ได้เพิ่มเติม
- 5.3.2 เพื่อเป็นการยืนยันเวลาที่เหมาะสม ควรมีการบดที่เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาที่ขนาดอนุภาคจะเล็กที่สุด
- 5.3.3 ควรมีการทดสอบสารสำหรับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Available URL [http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_pre\\_grindmore.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php)
- [2] R. Khalid Sendi, S Mahmud. (2012) "Quantum Size Effect on ZnO Nanoparticle Based Discs Synthesized by Mechanical Milling." **Applied Surface Science**. 258 : 8026-8031.
- [3] A. Deng, J. Ren, W. wang, H. Li, Q. Lin, Y. Yan, R. Sun, G. Liu. (2016) "Production of Xylo-Sugars from Corncob by Oxalic Acid-Assisted Ball Milling and Microwave Induced Hydrothermal Treatments." **Industrial Crops and Products**. 79 : 137-145.
- [4] Chennupati, J. and Stephen P. 2006. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures Processing, Properties and Applications. Amsterdam : Elsevier.
- [5] Available URL <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1389>
- [6] Available URL <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/FEBRUARY/RADIO2-5.HTM>
- [7] Available URL [http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/zinc\\_oxide#section=Top](http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/zinc_oxide#section=Top)
- [8] Available URL <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5818>
- [9] Available URL <http://cn-zinc-oxide.com/product.htm>
- [10] Available URL <http://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4391796>
- [11] Available URL <http://phelafel.technion.ac.il/~samirb/ZnO.html>
- [12] Available URL [http://nptel.ac.in/courses/113104005/lecture3/3\\_8.htm](http://nptel.ac.in/courses/113104005/lecture3/3_8.htm)
- [13] A. Moezzi, A. M. Mcdonagh, M. B. Cortie. (2012) "Zinc Oxide Particles : Synthesis, Properties and Applications." **Chemical Engineering Journal** 185-186 : 1-22.
- [14] Available URL [http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/aluminum\\_oxide#section=Boiling-Point](http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/aluminum_oxide#section=Boiling-Point)
- [15] Available URL <http://www.worktopfactoryy.co.uk/ResourceCentre/EncyclopediaOfStoneWorktops/AluminiumOxide/tabid/1707/Default.aspx>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Available URL [http://www.webelements.com/compounds/aluminium/dialuminium\\_trioxide\\_alpha.html](http://www.webelements.com/compounds/aluminium/dialuminium_trioxide_alpha.html)
- [17] Available URL <http://eng.sut.ac.th/ceramic/old/article/19.pdf>
- [18] Available URL <http://eng.sut.ac.th/ceramic/old/article/20.pdf>
- [19] Available URL <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>
- [20] Available URL [http://cste.sut.ac.th/lsu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53:diffraction-particle-size-nalyzer&catid=38](http://cste.sut.ac.th/lsu/index.php?option=com_content&view=article&id=53:diffraction-particle-size-nalyzer&catid=38)
- [21] Available URL <http://www.cilas.com/particle-size-analysis-principles.htm>
- [22] Available URL <https://nfm.kaust.edu.sa/Pages/zeta.aspx>
- [23] ศศิธร พรหมวัลย์. “สัญญาณบ่งชี้จำเพาะของคราบอูสจิจที่ตรวจพบด้วยเครื่องรามานสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และการประยุกต์ใช้ที่เป็นไปได้ในการตรวจสอบทางนิติวิทยาศาสตร์ของเหลวที่หลังจากร่างกาย (2553 : 6-7)
- [24] Available URL <http://www.clemson.edu/ces/lemt/T-64000.htm>
- [25] Available URL <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>
- [26] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2557) “การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-ray Diffraction” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ฉบับที่ 194,34-35
- [27] Available URL <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [28] L.C. Damonte, L.A. M. Zelis, B. M. Soucase, M.A. H. Fenollosa. (2004) “Nanoparticles of ZnO Obtained by Mechanical Milling.” **Powder Technology** 148 : 15-19.
- [29] Y.W. Lao, S.T. Kuo, W.H. Tuan. (2009) “Influence of Ball Milling on the Sintering Behavior of ZnO Powder.” **Ceramics International** 35 : 1317-1320.
- [30] B. M. Abu-Zied, W. Schwieger, A. M. Asiri. (2015) “Effect of Ball Milling on the Structural and Textural Features of MCM-41 Mesoporous Material.” **Microporous and Mesoporous Materials** 218 : 153-159.

- [31] K.P. Shinde, R.C. Pawar, B.B. Sinha, H.S. Kim, S.S. Oh, K.C. Chung. (2014) "Study of Effect of Planetary Ball Milling on ZnO Nanopowder Synthesized by Co - Precipitation." **Journal of Alloys and Compounds** 617 : 404-407.
- [32] R.K. Gupta, D. Fabijanic, T. Dorin, Y. Qiu, J.T. Wang, N. Birbilis. (2015) "Simultaneous Improvement in the Strength and Corrosion Resistance of Al via High-Energy Ball Milling and Cr Alloying." **Materials and Design** 84 : 270-276.
- [33] M.W. Wu, P.C. Tsai, Y.C. Huang (2015) "Enhancement of the Densification and Mechanical Properties of Aluminum-Doped Zinc Oxide Ceramics by Hot Isostatic Pressing." **Journal of Alloys and Compounds** 650 : 514-519.
- [34] Available URL <http://ciayuda.com/ThermoProductos.htm>
- [35] Available URL <http://www.prweb.com/releases/2013/7/prweb10952219.htm>
- [36] Available URL <http://www.engr.uky.edu/emc/scanning-electron-microscopes/>
- [37] E. Yalamac, A. Trapani, S. Akkurt (2014) "Sintering and Microstructural Investigation of Gamma-Alpha Alumina Powders." **Engineering science and technology an international journal** 17 : 2-7
- [38] L. Han, N.V. Nong, L.T. Hung et al. (2013) "The Influence of  $\alpha$ - and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Phases on the Thermoelectric Properties of Al-Doped ZnO." **Journal of Alloys and Compounds** 555 : 291-296.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายญาณวุฒิ วงศ์หอม  
วัน เดือน ปี เกิด 22 กุมภาพันธ์ 2537  
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ  
เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า ปีการศึกษา 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้