

การสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับ
นาโนเมตรสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้านชีวภาพ

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES
FOR BIOLOGICAL APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZINC OXIDE
NANOPARTICLES FOR BIOLOGICAL APPLICATION



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
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOMATECHNOLOGY

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้านชีวภาพ

Special Project Title Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles for biological application

นักศึกษา นายภูมิพันธ์ จันทระสา
รหัสประจำตัว 57110036
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศุภมาส วิรุณจิตร์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร.อดิเรก	แรงกสิกรณ์	
ผศ.ดร.สุธี	ชุตีไพจิตร	
ดร.ศุภมาส	วิรุณจิตร์	

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



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่...22..... เดือน.....มี.ป.พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรสำหรับการประยุกต์ใช้ทางด้านชีวภาพ
นักศึกษา	นายภูมิพันธ์ จันทร์สา
รหัสประจำตัว	57110036
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ศุภมาส วิรุณจิตร์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรเพื่อการประยุกต์ใช้ทางด้านชีวภาพ โดยแบ่งโครงการพิเศษออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนแรกมุ่งเน้นการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรให้มีขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน ด้วยกระบวนการบดผสมย่อย (Ball-milling process) ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงกลใช้สำหรับเตรียมจากอนุภาคขนาดใหญ่ไปสู่ผลิตภัณฑ์ในระดับนาโนเมตร (Top-Down process) และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการทางเคมีที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตรที่เป็นกระบวนการเตรียมจากอนุภาคขนาดเล็กไปสู่ผลิตภัณฑ์ในระดับนาโนเมตร (Bottom-Up process) ภายใต้อิทธิพลของสารตั้งต้นสังกะสี และตัวตกตะกอน (Precipitant agents) ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการวิเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้โดยการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform-Infrared spectroscopy; FT-IR) และเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

สำหรับส่วนที่สองของโครงการพิเศษนี้จะเป็นการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโรค โดยการนำอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ในส่วนแรกมาทำการตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ด้วยการทดสอบหาบริเวณยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Inhibition zone) ผ่านเทคนิคการแพร่บนกระดาดทรง (Disc diffusion techniques) จากนั้นหาความสัมพันธ์และเปรียบเทียบขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ที่มีผลมาจากขนาดและลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตร

คำสำคัญ : นาโนซิงค์ออกไซด์ กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน การยับยั้งแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles for biological application
Student	Mr. Poompun Gansa
Student ID.	57110036
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Dr. Supamas Wirunchit

ABSTRACT

This special project focus on synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) for biological application which be separated into 2 sections. In the first section, this project presented synthesis of zinc oxide nanoparticles with the difference size and morphology by ball-milling process and hydrothermal technique. The effects of precursor and precipitant agents on size and morphology of zinc oxide nanoparticles were investigated. The as-synthesis zinc oxide nanoparticles were characterized by employing technique including X-ray diffraction technique (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and Raman spectroscopy. The morphology and size of zinc oxide nanoparticles determined by Field Emission Scanning electron microscope (FE-SEM).

At the second section, this research proposes was studied the effective in inhibiting the bacteria of zinc oxide nanoparticles with difference size and morphology in the first section. The antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles were examined by determine inhibition zone *via* disc diffusion technique. The effect of size and morphology of zinc oxide nanoparticles on their antibacterial activity was investigated. The antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles can reduce of disease problems.

Keywords: zinc oxide nanoparticles, nanoparticles synthesis and antibacterial mechanism.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศุภมาส วิรุณจิตร ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการทำงาน คำปรึกษาในแนวทางการดำเนินงานวิจัย การอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย การให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และการให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้เสมอมา

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุธี ชูติไพจิตร และ ดร.อดิเรก แรงกลสิกรณ์ ที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบและช่วยตรวจทานโครงการพิเศษฉบับนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุธี ชูติไพจิตร อีกครั้งที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย เทคนิคในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย เทคนิคในการตรวจวัดเชื้อแบคทีเรีย และเครื่องมือที่ใช้ประกอบในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งกำลังใจในการวิจัย

ขอขอบคุณ นายรัชชัชย สาคร นักวิจัยจากศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และคณาจารย์ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-ลาดกระบังที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาและกำลังใจในการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมารดา และครอบครัวจันทร์สา ที่คอยเป็นกำลังใจสำคัญจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ภูมิพันธ์ จันทร์สา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	4
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	4
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO).....	7
2.2 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์.....	10
2.3 การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ทางด้านชีวภาพ.....	14
2.4 กระบวนการในการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์.....	15
2.5 การตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.1 สารเคมี.....	22
3.2 อุปกรณ์.....	22
3.3 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD)	27
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)	29
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy).....	30
3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM).....	31
3.8 การตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	34
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากกระบวนการบดผสมย่อย.....	34
4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล.....	43
4.3 การศึกษาสมบัติทางชีวภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วย เทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	ปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	1
1.2	ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	3
1.3	กระบวนการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	3
1.4	แสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเมตร	4
2.1	ลักษณะของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	7
2.2	โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์	7
2.3	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบซิงค์เบลน	8
2.4	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างแบบเวรตีไซส์ และซิงค์เบลน	9
2.5	การปลดปล่อยพลังงานแสงของซิงค์ออกไซด์	9
2.6	ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	10
2.7	ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของแบคทีเรีย	11
2.8	กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์	11
2.9	การเกิดปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์.....	12
2.10	กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตรผ่านกระบวนการจากอนุภาคใหญ่ไปเล็ก (Top-Down process) และกระบวนการจากอนุภาคเล็กไปใหญ่ (Bottom-Up process)	15
2.11	ลักษณะพฤติกรรมการบดย่อยของลูกบด	16
2.12	กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการเคมีเชิงกล	16
2.13	กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการ Physical Vapor Synthesis	17
2.14	ขนาดของซิงค์ออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	18
2.15	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์จากค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 – 13)	19
3.1	เครื่องบดย่อยผสมสารแบบการบดย่อยด้วยเม็ดบด	24
3.2	เตาไฟฟ้าสำหรับการเผาแคลไซน์	24
3.3	แผนผังกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ (MCP).....	25
3.4	แผนผังแสดงการแคลไซน์ (โดย T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์).....	25
3.5	หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave)	26
3.6	กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	27
3.7	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของบริษัท Rigaku รุ่น Smart Lab.....	28
3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX.....	29
3.10 ลักษณะการส่งผ่านของคลื่นอินฟราเรดไปยังตัวอย่าง	30
3.11 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น DXR Raman Microscope	31
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชันของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6335F.....	31
3.13 ลักษณะการเชื่อมต่อลงบนจานเพาะเชื้อ	33
3.14 ตำแหน่งหยดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงบนกระดาษกรอง โดยตำแหน่งที่ 1 คือ ตำแหน่งของน้ำกลั่น และตำแหน่งที่ 2-4 คือตำแหน่งของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	33
4.1 แสดงลักษณะของโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศของออกซิเจน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	34
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของของอนุภาคผงโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	36
4.3 ร้อยละของโลหะสังกะสีและสารประกอบซิงค์ออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิแคลไซน์	37
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแคลไซน์กับขนาดผลึกของสารประกอบซิงค์ออกไซด์	39
4.7 ลักษณะทางกายภาพของโลหะสังกะสี และอนุภาคซิงค์ออกไซด์	41
4.8 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่อุณหภูมิต่างๆ	41
4.9 ร้อยละปริมาณธาตุของซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ	42
4.10 ลักษณะสีของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ	43
4.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต	44
4.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นเป็นซิงค์อะซิเตรต	44
4.13 ขนาดของโครงสร้างผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ชนิดของสารตั้งต้นและ ตัวตกตะกอน แตกต่างกัน	46
4.14 ความบริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต	47
4.15 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต	47
4.16 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต	48
4.17 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต	49
4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ชนิดตัวตกตะกอนต่างๆ จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต ..	50
4.19 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ชนิดตัวตกตะกอนต่างๆจากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต ..	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> ของซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ทั่วไป	52
4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ทั่วไป	53
4.22 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> และ <i>S. aureus</i> สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต.....	53
4.23 ขนาดของโซนไลที่เกิดจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อย.....	54
4.24 ขนาดของโซนไลที่เกิดจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต.....	55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างตารางมาตรฐานของ National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS)	21
4.1 ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างผลึกของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์	38
4.2 ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างผลึกของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์	45

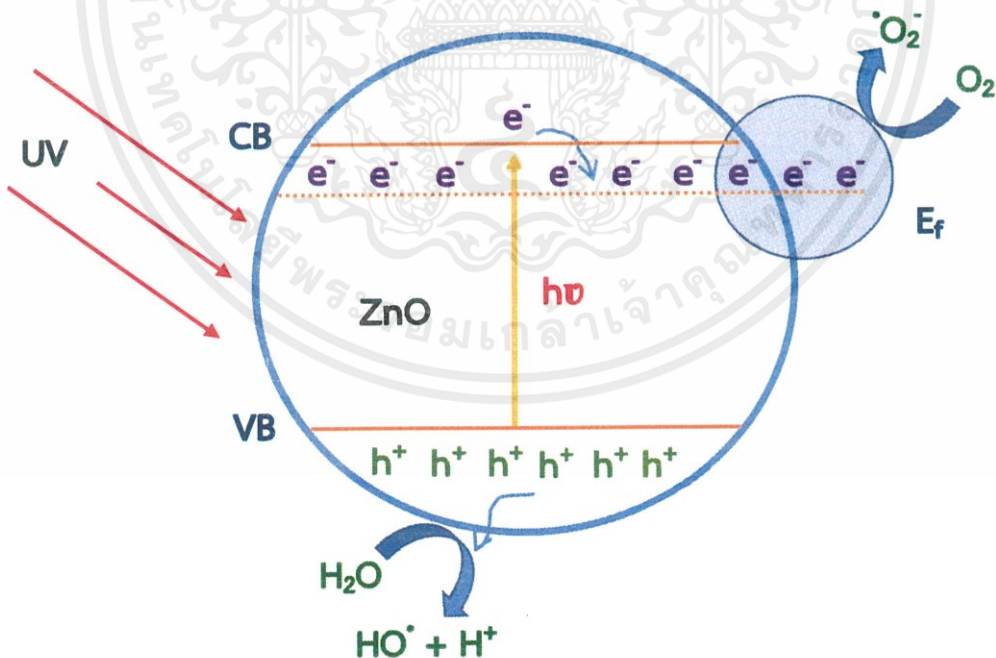


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

วิวัฒนาการของนาโนเทคโนโลยีก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายของอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ และวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (Nano zinc oxide; Nano-ZnO) เป็นนาโนเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่มีสมบัติโดดเด่นมากมาย ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางเคมี วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพสูงที่สะอาดและปลอดภัย (Green efficient catalyst) ในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ [1-2] และยังมีนิยมนำวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (Optoelectronic devices) สิ่งทอ (Textiles) เครื่องสำอาง (Cosmetics) และยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts) สารต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial agents) [3] ซึ่งแบคทีเรียเป็นปัญหาสำคัญของการเกิดโรค เนื่องจากแบคทีเรียเป็นสาเหตุของการเกิดโรค ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำเอาวัสดุนาโนเทคโนโลยีซิงค์ออกไซด์มาใช้ในการแก้ไขปัญหการเกิดโรค

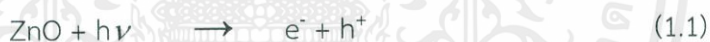


รูปที่ 1.1 ปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Band gap energy) เท่ากับ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงที่มากกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จะเกิดปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) กล่าวคือเมื่อวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) จะเคลื่อนไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) ส่งผลให้ที่แถบวาเลนซ์มีช่องว่างอิเล็กตรอน (electron hole; h^+) เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [4]

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ โดยช่องว่างอิเล็กตรอนของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้น้ำแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) ในรูปของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals; $\cdot\text{OH}$) และ ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion; H^+) และอิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้าจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นอนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (superoxide radical anion; $\cdot\text{O}_2^-$) จากนั้นอนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H_2O_2) ดังแสดงในสมการที่ 1.1 - 1.5 จากนั้นกลุ่มสารออกซิไดส์รุนแรง (Reactive oxygen species; ROS) ประกอบด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จะผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรียเข้าไปทำอันตรายกับสารอินทรีย์ (Organic materials) ภายในเซลล์ จึงทำให้เกิดการเสื่อมสลายของเซลล์แบคทีเรีย [5]

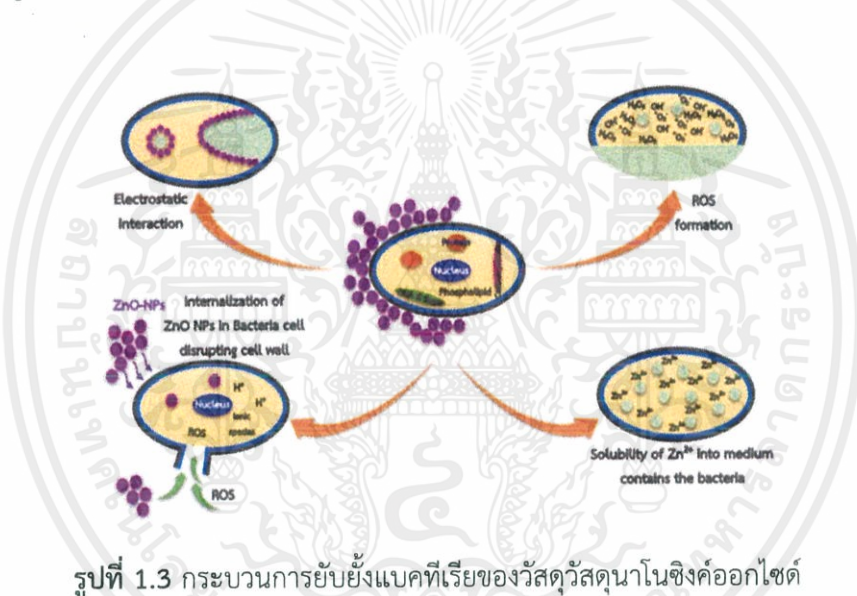


นอกจากปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงส่งผลให้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้แล้วนั้น ยังมีปัจจัยทางกายภาพและเคมีอื่นอีก ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งปัจจัยที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลให้กลไกในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยนั้น ๆ โดยปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วย อิทธิพลของรังสียูวี (UV illumination effect) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (Impact of ZnO morphology) การปรับปรุงพื้นผิวด้วยการอบอ่อน (Surface modification by thermal annealing) อิทธิพลของขนาดอนุภาคและความเข้มข้นของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (Influence of ZnO Particle Size and Concentration) และข้อบกพร่องของพื้นผิว (Surface defects) เป็นต้น [4-6] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



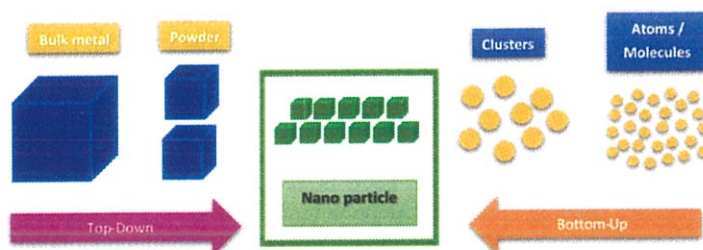
รูปที่ 1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 1.3 กระบวนการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์

การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ในการยับยั้งแบคทีเรียอันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโรค รูปร่างทางสัณฐานวิทยา และขนาดของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากที่จะต้องคำนึงถึง และการที่จะสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาด และรูปร่างทางสัณฐานวิทยาที่จำเพาะเหมาะแก่การยับยั้งแบคทีเรีย นั้น จะต้องคำนึงถึงกระบวนการสังเคราะห์เป็นสำคัญ เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีขนาด และรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีความหลากหลายและแตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคของสารประกอบออกไซด์ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีอยู่ 2 กระบวนการใหญ่ๆ คือ กระบวนการเตรียมจากอนุภาคใหญ่ไปหาเล็ก (Top-Down process) เช่น กระบวนการเชิงกล (Mechanical methods) เทคนิคกระบวนการพิมพ์ภาพ (Lithographic techniques) และ กระบวนการเตรียมจากอนุภาคเล็กไปหาใหญ่ (Bottom-Up process) เช่น กระบวนการเชิงเคมี (Chemical techniques) กระบวนการเชิงกายภาพ (Physical techniques) ดังแสดงในรูปที่ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 แสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเมตร

โครงการพิเศษนี้จึงมุ่งเน้นศึกษากระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (ball-milling) เป็นตัวแทนกระบวนการสังเคราะห์เชิงกล ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมจากอนุภาคใหญ่ไปหาเล็ก และด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique) เป็นตัวแทนกระบวนการสังเคราะห์เชิงเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมจากอนุภาคเล็กไปหาใหญ่ ภายใต้การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตั้งต้นสังกะสี และชนิดตัวตกตะกอน (Precipitant agents) ที่มีผลต่อวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ แล้วทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเอกลักษณ์ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของขนาดและลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีต่อความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย ให้มีความบริสุทธิ์สูง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและพัฒนาสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ให้มีความบริสุทธิ์สูง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ และความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีกระบวนการสังเคราะห์ สารตั้งต้น และตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1.3.1 สังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ ผ่านกระบวนการผสมบดย่อย เพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูงสุด
- 1.3.2 สังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate; $Zn(NO_3)_2$) และซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate; $Zn(CH_3COO)_2$) ผ่านตัวแปรของตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน (ตัวตกตะกอนที่ใช้ประกอบด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH) ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล เพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูง

- 1.3.3 ศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีกระบวนการสังเคราะห์ สารตั้งต้น และตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน
- 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ที่มีผลต่อความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีกระบวนการสังเคราะห์ สารตั้งต้น และตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน
- 1.3.5 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษา ค้นคว้า รวบรวมข้อมูลพื้นฐาน พร้อมทั้งทบทวนเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์
- 1.4.3 สังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย
- 1.4.4 ตรวจสอบลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นและความบริสุทธิ์ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย โดยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เครื่องฟลูอริเยร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) และเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer)
- 1.4.5 ตรวจสอบสัณฐานทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์ อิมิชชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)
- 1.4.5 สังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ผ่านตัวแปรของชนิดของสารตั้งต้น และชนิดของตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน
- 1.4.6 ตรวจสอบลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นและความบริสุทธิ์ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล โดยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เครื่องฟลูอริเยร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) และเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer)
- 1.4.7 ตรวจสอบสัณฐานทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์ อิมิชชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.8 ตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยการทดสอบหาบริเวณยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Inhibition zone) ผ่านเทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง (Disc diffusion techniques)

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันได้ ผ่านกระบวนการผสมบดย่อย และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล
- 1.5.2 สามารถทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์
- 1.5.3 สามารถทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย



บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ข้อมูลเบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (Antibacterial mechanisms of nano-zinc oxide) และกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (Synthesis of nano-zinc oxide)

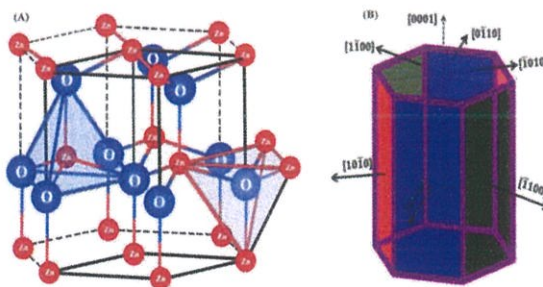
2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีสูตรโมเลกุลเป็นแบบ ZnO น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 81.389 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 5.600 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้องเท่ากับ 5.642 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวเท่ากับ 2248 และ 1800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความร้อนจำเพาะ 0.125 แคลอรีต่อกรัม และมีสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.006 แคลอรีต่อเซนติเมตรต่อเคลวิน สารประกอบซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายได้ดีในกรดและเบส นอกจากนี้สารประกอบซิงค์ออกไซด์ยังเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ที่มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Band gap energy) เท่ากับ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ [7]



รูปที่ 2.1 ลักษณะของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

โครงสร้างผลึกโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite) หรือรูปทรงหกเหลี่ยม (hexagonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) a เท่ากับ 0.3296 อังสตรอม และ c เท่ากับ 0.52065 อังสตรอม [8] มีสมมาตรแบบไม่มีอะตอมกลาง ซึ่งเป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่เสถียรที่สุด สามารถพบได้ทั่วไป [9]



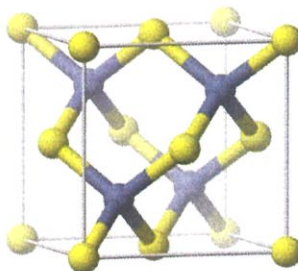
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างออกไซด์ เกิดจากการยึดเกาะกันของอะตอมโลหะ (ประจุบวก) กับอะตอมออกซิเจน (ประจุลบ) ด้วยพันธะไอออนิก โดยอะตอมออกซิเจนเรียงตัวยึดกันแน่นชิดมากที่สุดแบบทรงหกเหลี่ยม (hexagonal close packing) เกิดช่องว่างทรงสี่หน้า (tetrahedral hole) โดยมีอะตอมของโลหะแทรกอยู่ในช่องว่างเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องที่มีอยู่ทั้งหมด หรือแบบหนึ่งช่องว่าง (hole) เว้นหนึ่งช่องว่าง (hole) ซึ่งในโครงสร้างเวรติไซส์ของซิงค์ออกไซด์ ประกอบไปด้วยไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) และไอออนชนิดหนึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นแบบทรงสี่หน้า มีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 4 : 4 โดยโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยระนาบของทรงสี่หน้าที่เชื่อมระหว่าง ไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) กับ ไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) ซึ่งผลึกซิงค์ออกไซด์นี้เป็นโครงสร้างแบบไม่สมมาตร จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานด้านเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric)

นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญ คือ มีทั้งระนาบที่มีขั้ว และระนาบที่ไม่มีขั้ว ระนาบที่มีขั้วจะอยู่ที่ฐานของผลึกซิงค์ออกไซด์ทรงหกเหลี่ยม โดยระนาบที่มีขั้วบวกจะมีไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) ที่ปลาย ($Zn-(0001)$) และระนาบที่มีขั้วลบจะเป็นระนาบที่มีไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) ที่ปลาย ($O-(000\bar{1})$) ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีขั้ว และเป็นสารที่เกิดโพลาไรซ์ตัวเอง (spontaneous polarization) ตามแนวแกนซี (c) และเพื่อให้เกิดสมดุลโครงสร้าง ซิงค์ออกไซด์ยังมีระนาบที่ไม่มีขั้ว และมีพลังงานต่ำกว่าระนาบที่มีขั้ว ดังเช่น $\{2110\}$ และ $\{0110\}$ นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเอกซ์ซิตอน (exciton binding energy) สูงถึง 60 มิลลิโวลต์ ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ทำเป็นวัสดุเลเซอร์

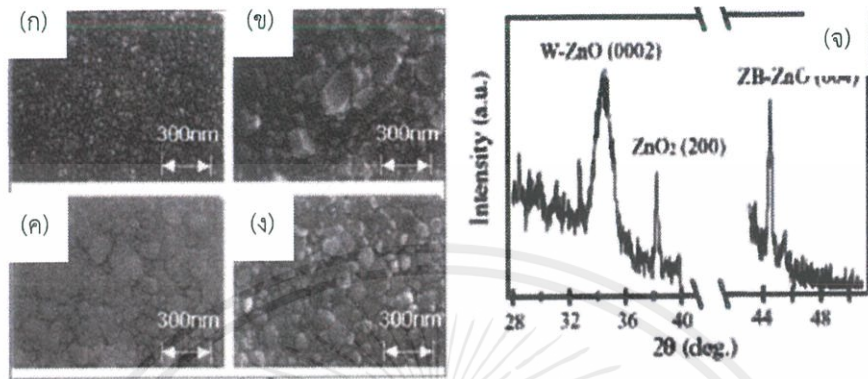
สำหรับโครงสร้างแบบซิงค์เบลน (Zinc Blende) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อย สามารถพบได้ในกรณีที่มีการสังเคราะห์บนพื้นผิวของวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นคิวบิก (cubic) ประกอบด้วยไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) จัดเรียงตัวแบบโครงสร้างคิวบิกแบบเฟซเซ็นเตอร์ (face-centered cubic structure; FCC) และมีไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) เข้าไปบรรจุอยู่ครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องว่างทรงสี่หน้า แต่ละไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) จะมีไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) จำนวน 4 ไอออนมาล้อมรอบ และเช่นเดียวกันแต่ละไอออนลบของธาตุออกซิเจน (O^{2-}) จะมีไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) มาล้อมรอบอยู่ 4 ไอออน ทำให้เลขโคออร์ดิเนชันของสารประกอบนี้เท่ากับ 4:4



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ แบบซิงค์เบลน [10]

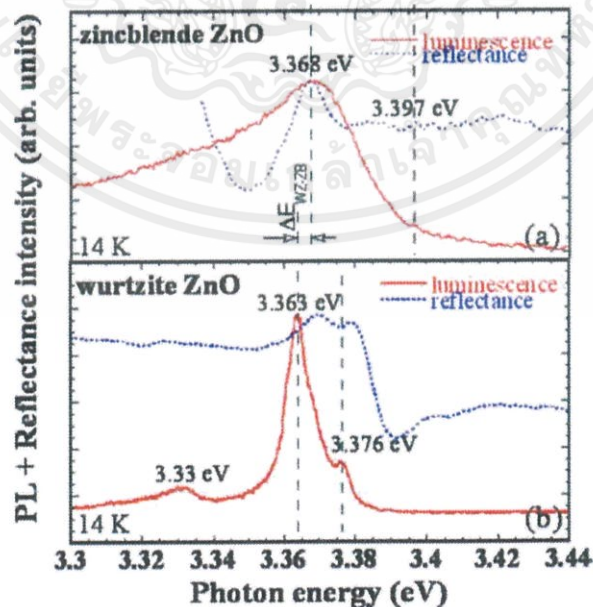
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Asharafi และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของลักษณะการจัดเรียงตัวของซิงค์ออกไซด์ แบบซิงค์เบลน และแบบเวริตไซต์ ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ในปีคริสต์ศักราช 1997 ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าโครงสร้างทั้งสองจะมีตำแหน่งในการเกิดพีคที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ (ก), (ข), (ค), (ง) และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างแบบเวริตไซต์ และซิงค์เบลน (จ) [9]

จากรูปที่ 2.4 (จ) เป็นกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเวริตไซต์ และซิงค์เบลน จะเห็นได้ว่า ซิงค์ออกไซด์โครงสร้างแบบเวริตไซต์ จะมีพีคเกิดขึ้นที่ 2θ เท่ากับ 33 ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากระนาบของ (0002) ในโครงสร้าง ส่วนที่ตำแหน่งพีค 2θ เท่ากับ 44 จะเป็นพีคที่เกิดจาก ระนาบ (004) ของโครงสร้างแบบซิงค์เบลน ทำให้สามารถบอกความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองได้



รูปที่ 2.5 การปลดปล่อยพลังงานแสงของซิงค์ออกไซด์ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการปลดปล่อยแสง อัตราส่วนระหว่างรังสีตกกระทบกับรังสีสะท้อน กับ ค่าพลังงานแสง จะเห็นได้ว่า กราฟการปลดปล่อยพลังงานแสงของซิงค์ออกไซด์ จะมีพลังงานที่ปล่อยออกมามากที่สุดไม่เท่ากัน โดยโครงสร้างแบบเวรีตีเซส จะมีค่าการปลดปล่อยพลังงานอยู่ที่ 3.363 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนโครงสร้างแบบซิงค์เบลนจะอยู่ที่ 3.368 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจากค่าพลังงานทั้งสอง สามารถบอกถึงความแตกต่างของระยะระหว่างชั้น แถบพลังงานต้องห้าม (Energy band gap) ของโครงสร้างทั้งสองได้

2.2 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

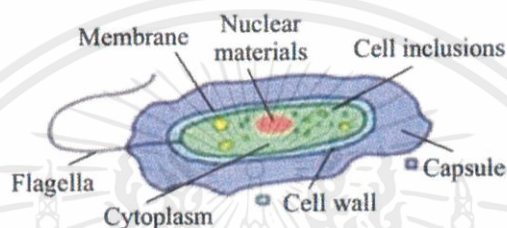
ประสิทธิภาพในการยับยั้งของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้นาโนเทคโนโลยีในการสังเคราะห์อนุภาคให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื่องจากแบคทีเรียหลายร้อยชนิดนั้นมีขนาดอยู่ในระดับตั้งแต่หลายร้อยนาโนเมตรจนถึงหลายสิบล้านไมโครเมตร ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่น่าสนใจอันเนื่องมาจากพื้นผิวที่มีความจำเพาะมากขึ้น ซึ่งการลดขนาดของอนุภาคนั้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาอนุภาคที่พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความปลอดภัยทางธรรมชาติ โดยซิงค์ออกไซด์จะมีผลต่อการเกิดการออกซิเดชัน และปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) โดยการตรวจสอบนี้จะทำการตรวจสอบในเรื่องของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรีย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เช่น ผลกระทบของรังสียูวี ขนาด ความเข้มข้น และ รูปร่างสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโน ซิงค์ออกไซด์ กลไกที่มีความสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน ซึ่งจะประกอบไปด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H_2O_2) อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals; $\cdot OH$) และอนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (superoxide radical anion; $\cdot O_2^-$) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสร้างความเสียหายต่อผนังเซลล์ การซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ การทำงานของอนุภาคนาโนที่ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของโปรตรอนและการได้รับสารพิษจากการละลายของซิงค์ไอออน โดยซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) จะทำให้เกิดการทำงานของไมโทคอนเดรียที่ลดลง การไหลออกมาของโครงสร้างภายใน การแสดงออกของยีนที่เกิดจากการออกซิเดชัน ทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียและการตายของเซลล์ในที่สุดและเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงถึงระดับนาโนเมตรสามารถเกิดปฏิกิริยากันระหว่างพื้นผิวของแบคทีเรียและเข้าสู่ภายในเซลล์ได้



รูปที่ 2.6 ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

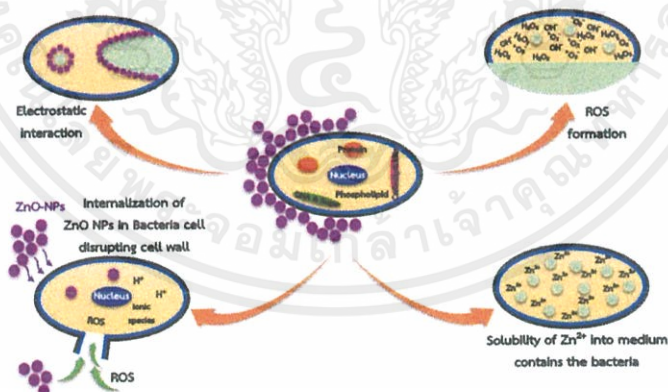
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบคทีเรียโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วน ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และไซโทพลาซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยผนังเซลล์เป็นส่วนที่อยู่ข้างนอกสุดของเซลล์ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของเปปทิโดไกลเคน (peptidoglycogen) คือกรดอะมิโน และน้ำตาล ผนังเซลล์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในเซลล์และรูปร่างของเซลล์โดยแบคทีเรียแกรมบวกจะมีชั้นของเยื่อหุ้มไซโทพลาซึมหนึ่งชั้น และชั้นของเปปทิโดไกลโคเจน (peptidoglycogen) หลายชั้น ความหนาประมาณ 20-80 นาโนเมตร โดยขนาดที่ แบคทีเรียแกรมลบ ประกอบด้วยเยื่อหุ้มเซลล์สองชั้น และพลาสมาเมมเบรน และชั้นของเปปทิโดไกลโคเจน ที่มีความหนา 7-8 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคนาโนสามารถผ่านชั้นของเปปทิโดไกลโคเจน ได้อย่างง่ายดาย จึงมีความไวสูงต่อการสร้างความเสียหาย โดยไซโทพลาซึมประกอบด้วย ส่วนของ โปรตีน กรดนิวคลีอิก คาร์โบไฮเดรต เกลือ ไอออน และน้ำร้อยละ 80 ซึ่งในส่วนของน้ำนี้จะช่วยในการนำไฟฟ้าของโครงสร้าง ทำให้รอบของผนังเซลล์มีความเป็นลบ



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของแบคทีเรีย [9]

กลไกในการยับยั้งแบคทีเรียนั้น วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีผลต่อผนังเซลล์โดยตรง และการเกิดไอออนบวกของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) กับ รูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถต้านการเจริญของแบคทีเรียได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของกลไกการยับยั้งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ลักษณะการละลายของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 2.8 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

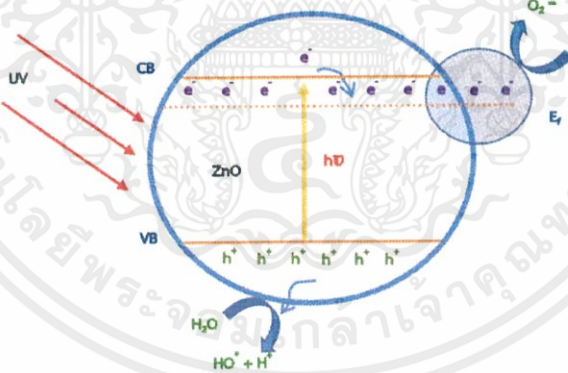
2.2.1 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จากอิทธิพลของแสงยูวี (UV illumination effect)

วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในหมู่ของสารอนินทรีย์ และเกี่ยวข้องกับชีวภาพมากกว่าวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถดูดซับแสงยูวี และมีการตอบสนองต่อแสงยูวีที่ดี ซึ่งจะทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และคุณลักษณะนี้มีความสัมพันธ์ในการทำงานของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งแบคทีเรีย การได้รับการกระตุ้นทางแสงของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนซิงค์ออกไซด์จะสามารถอยู่ได้นาน แม้จะไม่มีแสงยูวี ซึ่งอิเล็กตรอนที่พื้นผิวจะถูกกระตุ้นให้กระโดดข้ามผ่านชั้นของบริเวณปลดปล่อยกลายเป็น O_2^- และ O_2^{2-} อยู่บนพื้นผิว แสงยูวีนี้จะทำให้ออกซิเจนที่อยู่พื้นผิวหลุดออกมาจากพื้นผิวอย่างรวดเร็ว ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เป็นกระบวนการออกซิเดชันที่ทำให้เกิดการทำให้เสื่อมสภาพและยับยั้งการทำงานของระบบภายใน วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในสถานะสารละลายและมีการให้แสงยูวี สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้โมเลกุลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน กระบวนการดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากในทางชีวภาพ โดยที่กระบวนการดังกล่าวสามารถเข้าไปในเซลล์และยับยั้งหรือกำจัดระบบโครงสร้างภายในได้

โครงสร้างทางไฟฟ้าของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ประกอบด้วยชั้นของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) และแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) เมื่อรังสียูวีตกกระทบกับโฟตอนแล้วให้พลังงานมากกว่า 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเกิดการดูดซับทันที ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ ไปยังแถบนำไฟฟ้า ส่งผลให้ที่แถบวาเลนซ์มีช่องว่างอิเล็กตรอน (electron hole; h^+) เกิดขึ้น กับ อิเล็กตรอนอิสระบนแถบการนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ช่องว่างอิเล็กตรอนนี้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยตรงและมีความจำเป็นสำหรับการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals; $\cdot OH$) ที่มีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) เมื่ออิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าลดลง จากการถูกดูดซับโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ในขณะที่เดียวกันการเกิดปฏิกิริยาทางแสงกับการยับยั้งแบคทีเรียที่มีผลมาจาก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากกับเซลล์แบคทีเรีย และยังทำให้เกิดภาวะไม่โอสมัตว์ของชั้นฟอสโฟลิปิด



รูปที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts phenomenon) ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

2.2.2 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จากอิทธิพลของลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Impact of ZnO Morphology)

อิทธิพลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรีย โดยเงื่อนไขในการสังเคราะห์โครงสร้างของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะต่าง ๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารตั้งต้น อุณหภูมิ และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง จากการศึกษารูปร่างของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์แบบแท่ง (ZnO-nanorod) จะมีมุมที่ (111), (100) และวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบวงกลม (ZnO-nanosphere) จะมีมุมที่ (100) โดยที่มุมที่ (111) จะมีการยับยั้งแบคทีเรียที่สูง เนื่องจากมีความหนาแน่นของอะตอมที่สูง การที่วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างที่แตกต่างกันก็จะทำให้มีมุมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้มีผลต่อการยับยั้งแบคทีเรีย รูปร่างของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีผลต่อการไอออนภายใน เช่น รูปร่างแบบแท่ง และรูปร่างแบบเส้นใย (nanowire) สามารถเจาะเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียได้ง่ายกว่า รูปร่างแบบวงกลม สำหรับ รูปร่างแบบดอกไม้ นั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อและแบคทีเรีย เช่น เชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* มากกว่า รูปร่างแบบวงกลม และรูปร่างแบบแท่ง

2.2.3 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จากอิทธิพลของการควบคุมพื้นผิวด้วยอุณหภูมิ (Surface Modification by Thermal Annealing)

พื้นผิวของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ ดังนั้นการให้อุณหภูมิกับวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จึงมีผลมากในการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้ง ซึ่งจะเห็นว่าการทำให้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นจะทำให้จำนวนของออกซิเจนที่พื้นผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยในการให้อุณหภูมินั้นจะทำให้ออกซิเจนไปเกาะที่พื้นผิวของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ROS) ที่รุนแรงซึ่งจะมีผลต่อแบคทีเรียโดยตรง

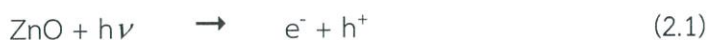
2.2.4 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จากอิทธิพลของขนาดและความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (Influence of ZnO particles size and concentration)

ขนาดอนุภาคและความเข้มข้นของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ มีบทบาทที่สำคัญในการยับยั้งแบคทีเรีย การมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและความเข้มข้นที่มากขึ้นจะให้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ยับยั้งแบคทีเรียได้มากขึ้น โดยที่วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กจะสามารถเจาะเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ง่ายและในปริมาณที่มาก ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้เพิ่มขึ้น โดยที่ขนาดของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นจะมีบทบาทมากที่สุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

2.2.5 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จากอิทธิพลของการปฏิกิริยาของออกซิเจน (Reactive oxygen series)

ความเป็นพิษของปฏิกิริยาออกซิเจนเป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สูง โดยปฏิกิริยาออกซิเจนนั้นถือเป็นสาเหตุหลักในความเป็นพิษของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเจนนี้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยปฏิกิริยาออกซิเจน เกิดจากการที่วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับแสงยูวี ทำให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจน ได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดการทำลายส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ เช่น ลิพิด ดีเอ็นเอ และโปรตีน ที่เป็นผลมาจากการไหลเข้าไปภายในเยื่อหุ้มเซลล์ของโมเลกุลเหล่านี้ (Internalization)

แต่ในปัจจุบันพบว่าวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถเกิดกระบวนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในที่มีดหรือที่ปลอดภัยได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ อิเล็กตรอนและหลุมโปรตอนนั้น ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดการสร้าง ไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนไอออน นอกจากนี้ยังมีโมเลกุลของออกซิเจนไดออกไซด์ อยู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการกระตุ้นกลายเป็น ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอน กลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ



2.3 การประยุกต์ใช้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ทางด้านชีวภาพ

วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นนาโนเทคโนโลยีที่มีคุณสมบัติมากมาย เช่น การป้องกันรังสี ยูวีเอ และ ยูวีบี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย ส่วนคุณสมบัติทางด้านชีวภาพที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอันเป็นปัญหาสำคัญของการเกิดโรค เนื่องจากแบคทีเรียเป็นสาเหตุของการเกิดโรค ดังนั้นจึงเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำเอาวัสดุนาโนเทคโนโลยีซิงค์ออกไซด์มาใช้ในการแก้ปัญหาการเกิดโรค เพื่อเป็นการลดปัญหาทางด้านชีวภาพ เช่น ทางด้านสุขอนามัย ทางด้านสุขภาพ เป็นต้น

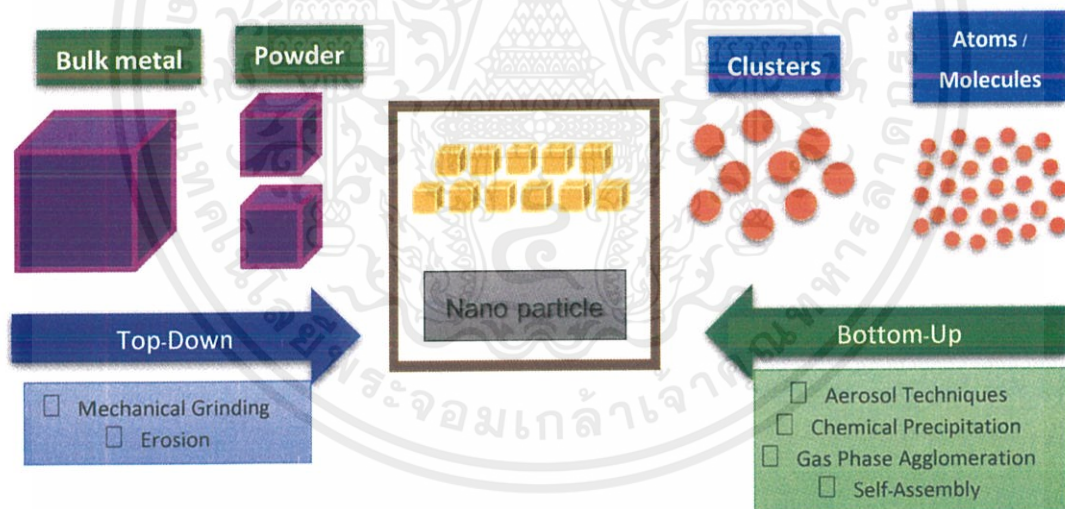
ตัวอย่างการศึกษาด้านความเป็นพิษของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบโดยใช้ *E. coli* เป็นตัวแทน ต่อแบคทีเรียแกรมบวกโดยใช้ *S. aureus* เป็นตัวแทน และต่อเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นภูมิคุ้มกันของมนุษย์ในระดับเบื้องต้น (T cell) ผลการศึกษาโดยใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ขนาดประมาณ 13 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่า วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E. coli* ได้ที่ระดับความเข้มข้น ≥ 3.4 มิลลิโมล ในขณะที่การเจริญเติบโตของ *S. aureus* ถูกยับยั้งได้อย่างสมบูรณ์ที่ระดับความเข้มข้น ≥ 1 มิลลิโมล และโดยการใช้วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์แบบเดียวกันพบว่าวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีผลต่อภูมิคุ้มกันของมนุษย์เพียงเล็กน้อยที่ระดับความเข้มข้นเดียวกับที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ โดยรวมแล้วผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษที่แตกต่างกันระหว่างระบบของแบคทีเรียและภูมิคุ้มกันของมนุษย์

ส่วนการศึกษาถึงระดับความเป็นพิษที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ต่อแบคทีเรียและสัตว์น้ำที่มีเปลือกแข็ง เช่น กุ้ง หรือปู เนื่องจากสิ่งมีชีวิตทั้ง 2 ชนิด อยู่ในห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน้ำจืดใช้สิ่งมีชีวิตเหล่านี้เป็นตัวแทนสำหรับการศึกษา ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่าความเป็นพิษของโลหะออกไซด์ (ทั้งในระดับนาโนและขนาดใหญ่) ต่อแบคทีเรีย *V. fischeri* และต่อกุ้งจัดลำดับได้ดังต่อไปนี้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ < คอปเปอร์ออกไซด์ < ซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นอีกว่า อนุภาคโลหะออกไซด์ไม่จำเป็นต้องเข้าไปในเซลล์จึงจะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ แต่การสัมผัสกันระหว่างเซลล์กับอนุภาคนาโนก็ทำให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ได้ [11]

2.4 กระบวนการในการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

การสังเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรสามารถเตรียมได้จาก 2 กระบวนการ ประกอบด้วย กระบวนการเตรียมจากอนุภาคใหญ่ไปหาเล็ก (Top-Down process) และกระบวนการเตรียมจากอนุภาคเล็กไปหาใหญ่ (Bottom-Up process) สำหรับกระบวนการเตรียมจากอนุภาคใหญ่ไปหาเล็กนั้น เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการ บด หัก และทำลาย อนุภาคใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดในระดับนาโน เช่น กระบวนการเชิงกล (Mechanical methods) และเทคนิคกระบวนการพิมพ์ภาพ (Lithographic techniques) เป็นต้น และในทางกลับกันกระบวนการเตรียมจากอนุภาคเล็กไปหาใหญ่นั้นจะเป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการรวมตัวกันของ อะตอม (Atom by atom) โมเลกุล (Molecule by molecule) หรือ กลุ่มก้อนของโมเลกุลเล็ก ๆ (Cluster by cluster) เช่น กระบวนการเชิงเคมี (Chemical techniques) และกระบวนการเชิงกายภาพ (Physical techniques) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



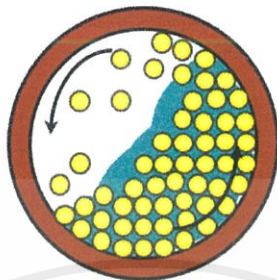
รูปที่ 2.10 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตรผ่านกระบวนการจากอนุภาคใหญ่ไปเล็ก (Top-Down process) และกระบวนการจากอนุภาคเล็กไปใหญ่ (Bottom-Up process)

2.4.1 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (ball-milling)

กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบดเป็นกระบวนการบดย่อยอนุภาคของวัสดุที่อาศัยการหมุนของหม้อบด ซึ่งหม้อบดที่นิยมใช้มักจะทำด้วยพลาสติกแบบง่าย ๆ ที่สามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนมากับการบดย่อยได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ในกระบวนการบดย่อยด้วยลูกบดนั้นจะต้องใส่วัสดุที่ต้องการลดขนาดพร้อมกับลูกบด และสารช่วยในการหล่อลื่นลงในหม้อบด ด้วยปริมาณที่เหมาะสม ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

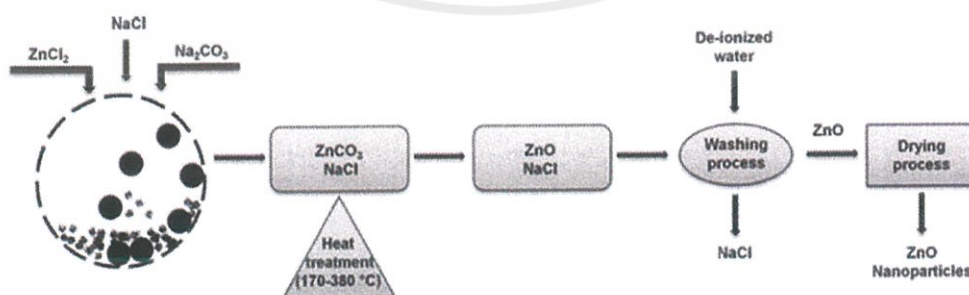
กระบวนการบดย่อยนี้ลูกบดจะมีการเคลื่อนที่คล้าย ๆ กับตัวอักษร D โดยมีการเคลื่อนที่ไล่เลียงกันจากด้านล่างขึ้นไปด้านบน แล้วตกลงมากระทบกับวัสดุด้านล่างอีกครั้งดังรูปที่ 2.11 จากนั้นก็มีการหมุนเบียดเสียดกัน และมีการเลื่อนไหลเป็น วัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป ทำให้อนุภาคของวัตถุดิบมีขนาดเล็กลง เนื่องจากถูกกระทบด้วยลูกบด ถูกขัดสีระหว่างลูกบด และระหว่างลูกบดกับผนังของหม้อบด



รูปที่ 2.11 ลักษณะพฤติกรรมการบดย่อยของลูกบด

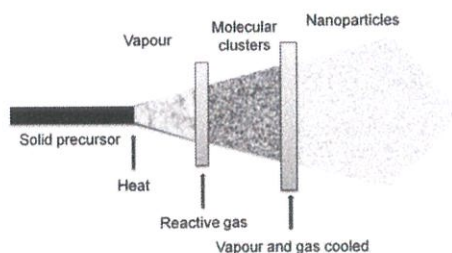
การบดย่อยด้วยลูกบดจะช่วยทำให้อนุภาคผงที่มีพฤติกรรมการแจกแจงของขนาดอนุภาคกว้างกว่าวิธีการใช้ตะแกรงร่อนขนาด (Sieve) การลดขนาดของอนุภาคจะเป็นไปอย่างรวดเร็วมากในช่วงเริ่มต้น และจะเริ่มช้าลงเรื่อย ๆ เมื่ออนุภาคเริ่มมีขนาดเล็กลง อัตราการบดย่อยจะขึ้นกับขนาด ค่าความถ่วงจำเพาะและความแข็งของลูกบดที่สัมพันธ์กับของอนุภาควัตถุดิบที่จะลดขนาดเป็นสำคัญ เช่น ถ้าเลือกใช้ลูกบดที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าของอนุภาควัตถุดิบที่จะลดขนาด มาก ๆ การลดขนาดของอนุภาคให้ได้ตามที่ต้องการก็จะกระทำได้ง่าย และทำได้อย่างรวดเร็วกว่าการใช้ลูกบดที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ ในปัจจุบันมีการใช้ลูกบดที่มีรูปร่างต่าง ๆ กันอยู่หลายแบบ อาทิเช่น แบบทรงกลม (Ball) แบบทรงกระบอก (Cylindrical) แบบแท่งทรงกระบอกสั้น (Rod) เป็นต้น

Paula Judith Perez Espitia และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการยับยั้งเชื้อราของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ในปีคริสต์ศักราช 2002 โดยนำวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเคมีเชิงกล มีซิงค์ไดคลอไรด์ (Zinc (II) chloride; $ZnCl_2$) เป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride ; $NaCl$) และโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate; Na_2CO_3) ภายใต้ความร้อน ทำให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการเคมีเชิงกล [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการ Physical Vapor Synthesis [12]

นอกจากนี้ Paula Judith Perez Espitia และคณะ ยังได้ทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการตกตะกอนของไอสาร ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดจากกาจัดแก๊สเข้าไป แล้วควบคุมอัตราการพ่นสารตั้งต้น เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากัน แล้วเกิดการควบแน่น ตกลงมาเป็นอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยกระบวนการสังเคราะห์จะได้อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 8-75 นาโนเมตร

2.4.2 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique)

เทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์สารเกี่ยวข้องกับ การให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยา เช่น พวกเกลือของโลหะออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ หรือผงโลหะต่างๆ ที่อยู่ในสภาพของสารละลายหรือสารแขวนลอย (ปกติจะใช้น้ำ) ด้วยอุณหภูมิและความดันที่สูง ซึ่งการตกตะกอนภายใต้สภาวะดังกล่าวจะทำให้เกิดผงที่ปราศจากน้ำ (Anhydrous Powders) ที่มีลักษณะเฉพาะค่อนข้างโดดเด่นเป็นพิเศษ นอกจากนี้ผงที่ได้ยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (โดยทั่วไป จะมีขนาดประมาณ 10 - 12 นาโนเมตร) มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ต่ำ ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของผลึกเชิงเดี่ยว มีความบริสุทธิ์สูง และเป็นเนื้อเดียวกัน

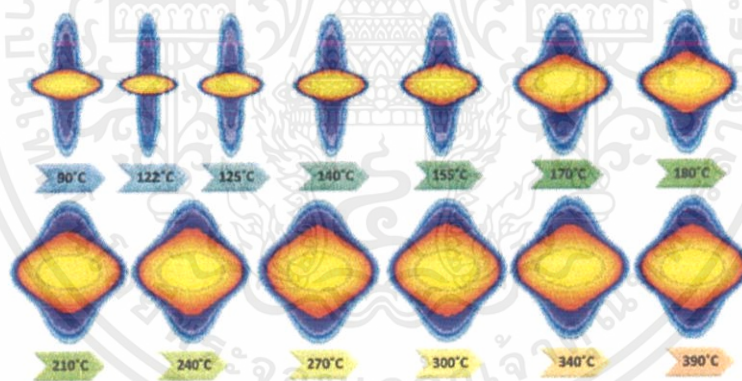
เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลมีการใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้งานก็มักจะอยู่ใกล้กับบริเวณจุดเดือดกับอุณหภูมิวิกฤติของน้ำ (374 องศาเซลเซียส) และความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 20 เมกะพาสคัล (MPa) จึงต้องทำการเตรียมในหม้อความดัน (Autoclave) ทาด้วยเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงทนทานและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง โดยปกติแล้วจะมีการบุผนังภายในของหม้อความดันด้วยเทฟลอน (Teflon) อีกทีเพื่อลดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของผนังหม้อความดันจากสารละลาย

นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆ ที่ใช้กระบวนการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอลด้วย เช่น เทคนิคการปลูกผลึกแบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal crystallization) ซึ่งในกรณีนี้วัสดุตั้งต้นที่ไม่ค่อยมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เช่น อสัณฐานของเซอร์โคเนีย (Zirconia ; ZrO_2) ที่มีน้ำอยู่ (amorphous hydrous ZrO_2) จะสามารถเกิดการตกผลึกภายใต้สภาวะของการทำไฮโดรเทอร์มอลได้ (เช่น 24 ชั่วโมง ที่ 300 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 100 เมกะพาสคัล) ได้ผงผลึกที่มีขนาดของอนุภาคเล็กละเอียด (เช่น เซอร์โคเนียแบบโมโนคลินิก ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 - 40 นาโนเมตร) กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการตกตะกอนแบบไฮโดรเทอร์มอลก็คือ การละลาย และการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมผงด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ถูกนำมาใช้ในระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการเตรียมสารประกอบของออกไซด์อย่างง่าย ออกไซด์ที่มีการเจือสารอื่นและพวกสารประกอบของออกไซด์เชิงซ้อนมากมายหลายชนิด เช่น เซอร์โคเนีย เซอร์โคเนียที่เจือด้วยโมลิบดีนัม และเลดแลนธานัมเซอร์โคเนตไทเทเนต (PLZT) สำหรับการนำไปใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นั้น ยังไม่ค่อยแพร่หลายมาก ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะทำให้ได้ผง ที่มีลักษณะเฉพาะตรงตามความต้องการอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการทำให้ผงตะกอนแห้งสนิทก่อนจะทำให้มีการรวมกันก็อาจจะไปห่วงวงจรการเผาซินเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อมประสานกันของอนุภาคที่บริเวณ จุดสัมผัส ซึ่งอาจจะทำให้อนุภาคเกิดการเชื่อมติดกันอย่างหนาแน่น จนกลายเป็นกระจุกของอนุภาคที่แข็งแกร่งได้ การเตรียมผงด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล เป็นเทคนิคที่อยู่ระหว่างการเตรียมผงจากปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็งกับเทคนิคเชิงเคมีแบบพิเศษ ที่ต้องพิจารณาถึงความสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายที่สูง ขึ้นกับความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีขึ้น สารผสมของพวกที่เป็นผงขวออกไซด์หรือเจล อาจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีพวกผลึกไฮดรอกไซด์ผสมกันอยู่ เมื่อมีการให้ความร้อนประมาณ 180–700 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดันขนาดประมาณ 1–100 เมกะพาสคัล

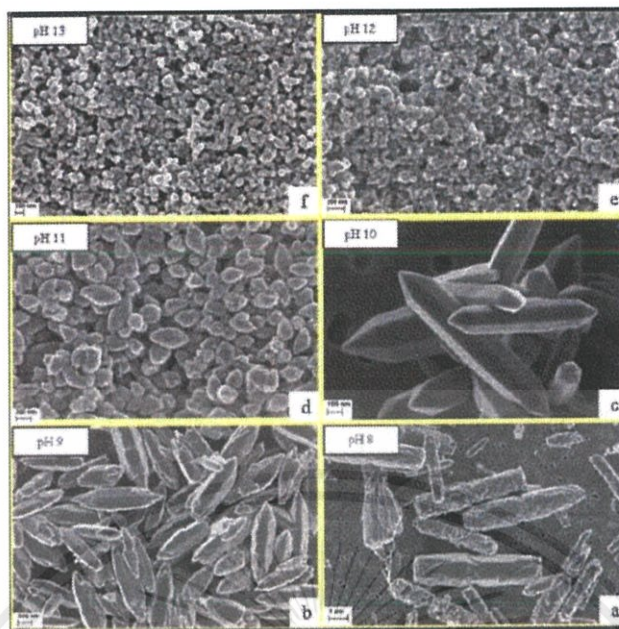
Martin Sondgaard และคณะ [13] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ในปีคริสต์ศักราช 2011 โดยใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต ทำปฏิกิริยากับเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อศึกษาขนาด และรูปร่างสัณฐานวิทยา ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำไฮโดรเทอร์มอล เพื่อดูอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อขนาดของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 2.14 ขนาดของซิงค์ออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [13]

จากรูปที่ 2.14 พบว่าแนวโน้มของขนาดซิงค์ออกไซด์ จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 122 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากที่สุด

ต่อมาในปีคริสต์ศักราช 2008 A. Stankovic และคณะ [14] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์อะซิเตรต ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง เพื่อศึกษาลักษณะของรูปร่างสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน และศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งแบคทีเรีย



รูปที่ 2.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์จากค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 – 13) [14]

จากภาพ เป็นภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (FE-SEM) ของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 9 และ 10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ จะเป็นปริซึม-แท่งนาโน ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 11 12 และ 13 จะมีลักษณะเป็นอนุภาคนาโน

2.5 การตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ในการศึกษาเรื่องแบคทีเรีย จะต้องมีการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียภายในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมขึ้น โดยมีการควบคุมสถานะของการเพาะเลี้ยงให้เป็นไปตามธรรมชาติของแบคทีเรียแต่ละชนิดให้มากที่สุด โดยมีหลักการดังนี้

2.5.1 การทดสอบด้วยวิธีการเจือจาง (Dilution test)

วิธีการเจือจางสามารถที่จะหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพน้อยที่สุด ที่สามารถมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Minimum Inhibitory Concentration ; MIC) และค่าปริมาณความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพที่น้อยที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ร้อยละ 99.9 (Minimum Bacteriocidal Concentration) ได้ โดยอาศัยการเจือจางของสารต้านจุลชีพ ในอาหารเหลวแบบให้ความเข้มข้นของสารยับยั้งลดลงครึ่งหนึ่ง (Two fold dilution) ตามลำดับ จนมีความเข้มข้นสุดท้ายตามที่ต้องการแล้วเติมเชื้อที่ต้องการจะทดสอบลงไปเท่าๆกันทุกหลอด (ปริมาณเชื้อประมาณ $10^5 - 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร) นำไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 35 – 37 องศาเซลเซียส นานประมาณ 18 ชั่วโมง จากนั้นทำการอ่านค่าจุลชีพที่น้อยที่สุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบคทีเรีย จากความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพหลอดสุดท้ายที่ใสหรือไม่มีเชื้อแบคทีเรียเจริญเติบโต เมื่อได้ค่าปริมาณความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพที่น้อยที่สุด ที่สามารถมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียแล้ว จะต้องทำการหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพที่น้อยที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ร้อยละ 99.9 โดยนำหลอดทุกหลอดที่ไม่ช่นทำการหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพที่น้อยที่สุด ที่สามารถมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียไปทำการเพาะเลี้ยงเชื้อ จากนั้นเลือกความเข้มข้นของสารต้านจุลชีพที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้ไม่เกิน 5 โคลนต่อ 0.01 มิลลิลิตร [15]

2.5.2 การทดสอบด้วยการกระจายตัว (Diffusion test)

วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบการยับยั้งเชื้อมากที่สุดคือ เทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง (Disc diffusion techniques) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถปฏิบัติได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว รวมทั้งสามารถให้ผลที่ต้องการ และแน่นอน การทดสอบวิธีนี้ใช้หลักการแพร่ โดยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เติมลงบนกระดาษกรอง (filter paper disc) ซึ่งวางบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อที่โดยเฉพาะเลี้ยงแบคทีเรียไว้สำหรับการตรวจสอบ จะเริ่มแพร่จากจุดเริ่มต้นไปในอาหารเลี้ยงเชื้อดังกล่าว เมื่อระยะทางที่สารแพร่ออกไปเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารนั้นก็ลดลง ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ณ จุดต่าง ๆ รอบแผ่นกระดาษกรอง ในขณะเดียวกันเชื้อแบคทีเรียบนผิวของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ถูกยับยั้งโดยสารออกฤทธิ์ ความเข้มข้นของสาร ณ จุดใด ๆ (ไกลกระดาษกรอง) ก็จะเจริญและเพิ่มจำนวนขึ้นจนเห็นได้ชัด แต่บริเวณที่ใกล้กระดาษกรองซึ่งมีความเข้มข้นของสารมากพอที่จะยับยั้งเชื้อได้ ก็จะไม่มีการเจริญของเชื้อให้เห็น จึงเกิดเป็นโซนใส (inhibition zone) ขึ้น อัตราการแพร่ของสารออกฤทธิ์ผ่านไปในอาหารเลี้ยงเชื้อมีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใส ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของสารที่นำมาทดสอบว่าสามารถยับยั้งเชื้อได้มากน้อยเพียงใด ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียวัดได้จากขนาดของโซนใส โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใสจะแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (Minimal Inhibitory Concentration หรือ MIC) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$\text{ขนาดของโซนใส (Inhibition zone)} = (\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกรองและโซนใส}) - (\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระดาษกรอง}) \quad (2.6)$$

$$\text{อัตราส่วนของโซนใส} = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใส}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวควบคุม}} \quad (2.7)$$

นอกจากนี้เทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง (Disc diffusion techniques) ยังเป็นที่ยอมรับขององค์การอาหารและยา เป็นกระบวนการทดสอบเชิงคุณภาพเท่านั้น สามารถบอกได้ว่าเชื้อมีความไวต่อสารยับยั้ง มีความไวปานกลาง หรือดื้อสารยับยั้ง ไม่สามารถทราบค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตหรือค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ ไม่เหมาะในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อที่เจริญช้า และเชื้อที่เจริญเติบโตที่สภาวะไม่มีออกซิเจน โดยภายหลังจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการยับยั้ง (Zone of inhibition) สามารถแปลผลจากตารางมาตรฐานของ National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างตารางมาตรฐานของ National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS)

Antimicrobial Agent	Code	Disc Potency	Zone Diameter Interpretive Standards (mm)			Control Zone Diameter Limits (mm)						
			Resistant	Intermediate ^a	Susceptible ^b	<i>E. coli</i> ATCC 25922	<i>S. aureus</i> ATCC 25923	<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	<i>H. influenzae</i> ATCC 49247 ^c	<i>H. influenzae</i> ATCC 49766 ^c	<i>N. gonorrhoeae</i> ATCC 49226 ^d	<i>S. pneumoniae</i> ATCC 49619 ^e
Aminocillin^f	AMD-10	10 µg				23 - 29	—	—				
Enterobacteriaceae			≤15	—	≥16							
Amikacin	AN-30	30 µg				19 - 26	20 - 26	18 - 26				
Enterobacteriaceae, <i>P. aeruginosa</i> , Acinetobacter and staphylococci			≤14	15 - 16	≥17							
Amoxicillin/ Clavulanic Acid^{g,h,i}	AmC-30	20/10 µg				18 - 24 ^{g,h}	26 - 36	—				
Enterobacteriaceae			≤13	14 - 17	≥18							
Staphylococcus spp. j			≤19	—	≥20				15 - 23 ^c			
Haemophilus spp. c,k			≤19	—	≥20							
Ampicillin^{h,l}	AM-10	10 µg				16 - 22	27 - 35	—				
Enterobacteriaceae ^m and <i>V. cholerae</i> ^{lm}			≤13	14 - 16	≥17							
Staphylococci spp. l,ii			≤28	—	≥29							
Enterococcus spp. n,o,ii			≤16	—	≥17							
<i>Listeria monocytogenes</i> ^f			≤19	—	≥20							
Haemophilus spp. c,k,p			≤18	19 - 21	≥22				13 - 21 ^c			
Streptococci (non- <i>S. pneumoniae</i> , <i>B. hemolyticus</i> only) e,i,aaa,ccc			—	—	≥24 ⁱ							30 - 36 ^e
Ampicillin/ Sulbactam^{g,h,i}	SAM-20	10/10 µg				19 - 24 ^{g,h}	29 - 37	—				
Enterobacteriaceae, <i>P. aeruginosa</i> , Acinetobacter ^q and staphylococci j			≤11	12 - 14 ⁱⁱ	≥15 ⁱⁱ							
Haemophilus spp. c,k			≤19	—	≥20				14 - 22 ^c			
Azithromycin	AZM-15	15 µg				—	21 - 26	—				
Staphylococcus spp. r			≤13	14 - 17	≥18							
Haemophilus spp. c			≤13	—	≥12				13 - 21 ^c			
<i>S. pneumoniae</i> and other streptococci ^{s,t,s}			≤13	14 - 17	≥18							19 - 25 ^e

ในปีคริสตศักราช 2015 ธนภพ โสทรโยม และคณะ ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Salmonella spp.* โดยใช้สารสกัดจากหัวหอม ที่มีตัวทำละลายเป็นเอทานอล โดยใช้การทดลองด้วยวิธีการกระจายตัวบนแผ่นวงกลม และวิธีการทดสอบด้วยการเจือจาง แสดงผลในรูปของประสิทธิภาพในการยับยั้ง และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการสังเคราะห์ ตรวจสอบลักษณะเฉพาะ และตรวจสอบสมบัติของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (ball-milling) และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique) ผ่านตัวแปรของชนิดของสารตั้งต้น และชนิดตัวตกตะกอน (Precipitant agents) ที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจสอบลักษณะเฉพาะ โครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ ดังจะแสดงตามลำดับต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 ซิงค์ไนเตรต [Zinc nitrate; $Zn(NO_3)_2$] ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ผลิตโดยบริษัท American Element ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2 ซิงค์อะซิเตต [Zinc acetate; $Zn(CH_3COO)_2$] ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ผลิตโดยบริษัท American Element ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ ≥ 85 ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.5 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ Ammonium hydroxide; NH_4OH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ ≥ 99.99 ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.6 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- 3.1.7 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) เกรดวิเคราะห์ ความเข้มข้น 37% ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan ประเทศไทย
- 3.1.8 น้ำกลั่น
- 3.1.9 อาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient Agar (NA)

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
- 3.2.2 กระดาษชั่งสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.3 ปีกเกอร์ขนาด 500 และ 100มิลลิลิตร
- 3.2.4 กระดาษฟอยล์ (Foil)
- 3.2.5 เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 3.2.6 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.2.7 โกร่งบดสาร (Mortar)
- 3.2.8 ซ้อนเตนเลสตัดกสาร
- 3.2.9 ตู้อบสาร (Oven) ผลิตโดยบริษัท Memmert
- 3.2.10 เตาไฟฟ้า (Furnace) ผลิตโดยบริษัทชวโซติ
- 3.2.11 ถ้วยอลูมินา (Alumina crucible) พร้อมฝาปิด
- 3.2.12 หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave)
- 3.2.13 ไมโครปิเปต
- 3.2.14 กระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
- 3.2.15 แท่งแก้วคนสาร
- 3.2.16 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ผลิตโดยบริษัท Veterinary
- 3.2.17 จานเพาะเชื้อ
- 3.2.18 หลอดทดลอง
- 3.2.19 ปากคืบ
- 3.2.20 ท่วงเขี่ยเชื้อ (loop) และเข็มเขี่ยเชื้อ (needle)
- 3.2.21 ถังพลาสติกปราศจากเชื้อ
- 3.2.22 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ
- 3.2.23 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 3.2.24 กระดาษกรอง
- 3.2.25 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) ของบริษัท Rigaku รุ่น Smart Lab
- 3.2.26 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX
- 3.2.27 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer) ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น DXR Raman Microscope
- 3.2.28 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6335F

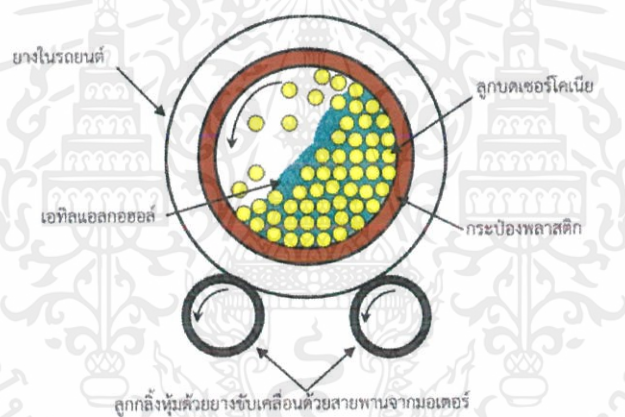
3.3 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

- 3.3.1 การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (Ball-milling process)

นำสารตั้งต้นโลหะสังกะสี 15 กรัมใส่ลงในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียแล้วเติม เอทิลแอลกอฮอล์ลงไป เพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่น ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปทำการบดย่อยผสมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเครื่องบดย่อยผสมสารแบบบดย่อยด้วยเม็ดบด (Ball-milling) (ดังรูปที่ 3.1) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ออกด้วยเตาแผ่นให้ความร้อน และนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำผงที่ผ่านการอบแห้งแล้วใส่ลงในถ้วยอลูมินาปิดฝาให้สนิท นำไปทำการเผาแคลไซน์ด้วยเตาไฟฟ้า (Furnace) แสดงดังรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (400 500 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที นำผงที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร (Mortar) จากนั้นนำผงตัวอย่างที่ได้มาทำการผสมบดย่อยอีกครั้งเป็นเวลา 18 ชั่วโมง โดยมีเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นเช่นเดิม โดยแสดงแผนผังกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ดังรูปที่ 3.3 และแผนผังในการแคลไซน์ดังรูปที่ 3.4 แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของผลึกที่เตรียมได้ด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เครื่องฟลูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) และเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) นอกจากนี้ยังตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

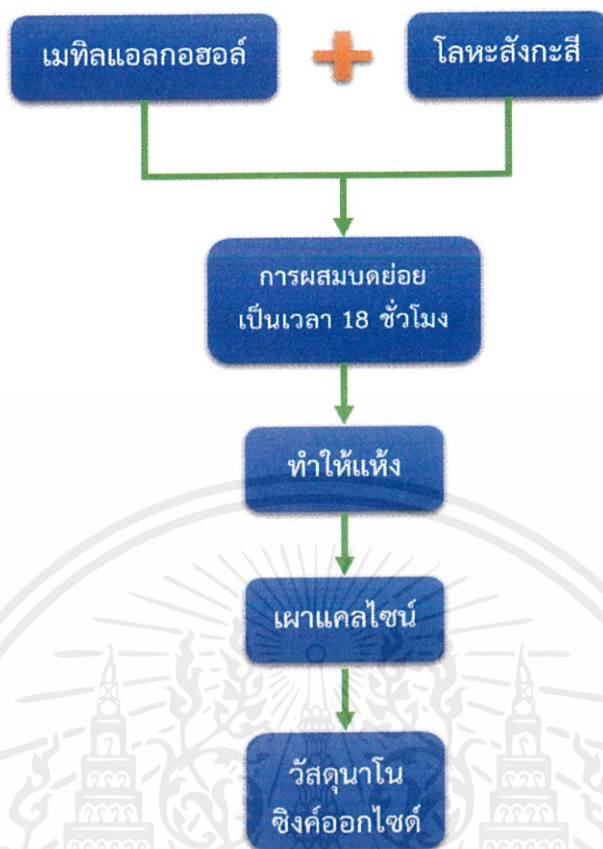


รูปที่ 3.1 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบการบดย่อยด้วยเม็ดบด



รูปที่ 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับการเผาแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ (MCP)



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการแคลไซน์
(โดย T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique)

นำสารละลายตั้งต้นสังกะสี 1 โมลลาลิตี จำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร พร้อมทำการปั่นกวนตลอดเวลา (โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารละลายตั้งต้นจากสารละลายสังกะสี 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายซิงค์ไนเตรต ($Zn(NO_3)_2$) และ สารละลายซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate; $Zn(CH_3COO)_2$) จากนั้นจึงทำการหยดสารละลายเบส 0.4 โมลลาลิตี ทำหน้าที่เป็นตัวตกตะกอน (Precipitant agents) อย่างช้า ๆ จนสารละลายผสมมีค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7.5 โดยตัวตกตะกอนที่อยู่ในโครงการพิเศษนี้ประกอบด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH) ตามสมการที่ 3.1 แล้วทำการปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง



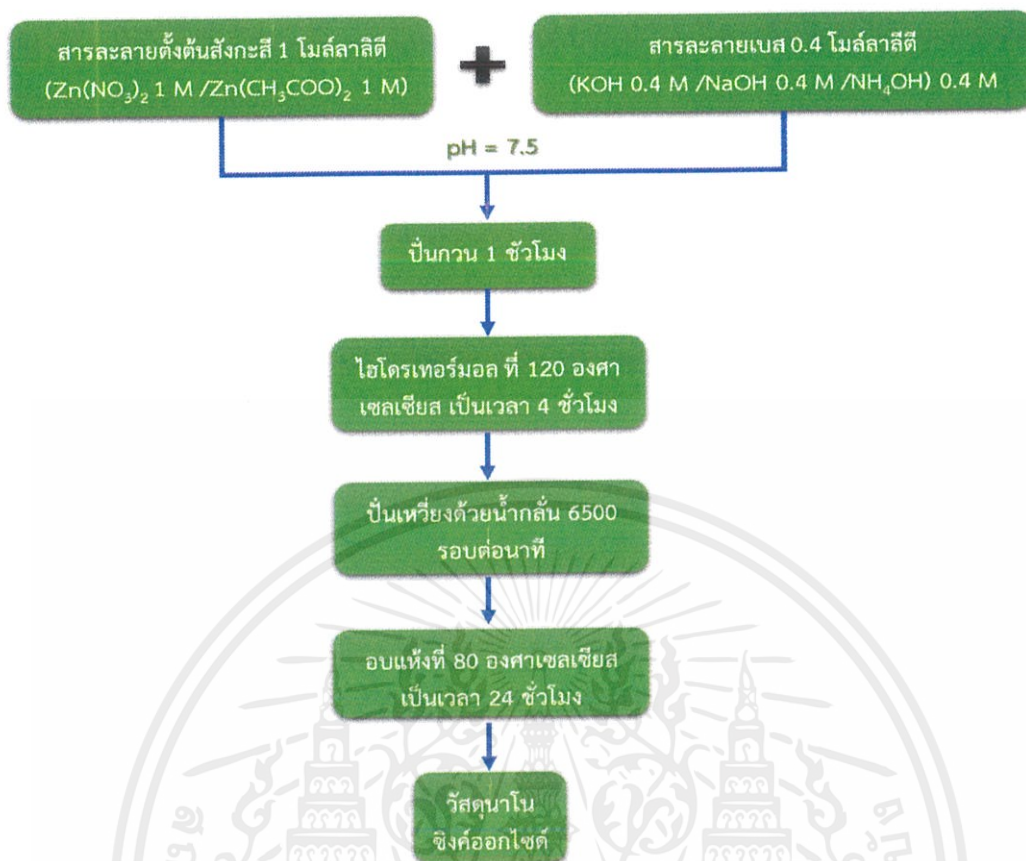
นำสารละลายผสมที่ผ่านการปั่นกวนแล้ว 1 ชั่วโมง เทใส่หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave) แสดงดังรูปที่ 3.4 แล้วปิดหม้อนึ่งอัดไอน้ำให้แน่นสนิท นำหม้อนึ่งอัดไอน้ำใส่ในตู้อบสาร (Oven) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสภาวะไฮโดรเทอร์มอล



รูปที่ 3.5 หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave)

จากนั้นล้างสารละลายที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลด้วยน้ำกลั่น โดยการปั่นเหวี่ยงที่ 6500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที จำนวน 5 ครั้ง แล้วจึงนำตะกอนที่เตรียมได้มาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร (Mortar) (ดังแสดงรูปที่ 3.5) และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของผลึกที่เตรียมได้ด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เครื่องฟลูอเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) และเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



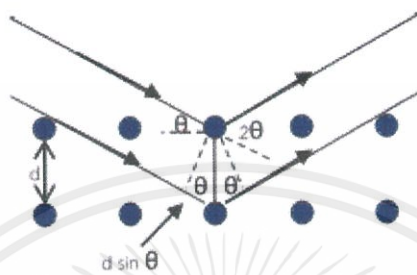
รูปที่ 3.6 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

3.4 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD)

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้น องค์ประกอบของสารตัวอย่าง ลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์ลงบนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบนโดยมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (h k l) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็จะมีเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับการตรวจวัด (Detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด โดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) ดังแสดงในสมการ 3.2 และความเข้มของพีครังสีเอกซ์ (Intensity : I) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ (รูปที่ 3.6) ซึ่งดังที่กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป จึงสามารถนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นได้ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มจากการนำผงที่ได้จากการสังเคราะห์มาใส่ในที่ใส่ตัวอย่าง (holder) ให้แน่นจากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) (รูปที่ 3.7) แล้วจึงเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง (CuK α) เป็นตัวกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 อังสตรอม ด้วยอัตราการวัด 5 องศาต่อนาที จากค่ามุม 2 θ ที่ 20 องศา ไปจนถึงที่ค่ามุม 2 θ ที่ 60 องศา



รูปที่ 3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

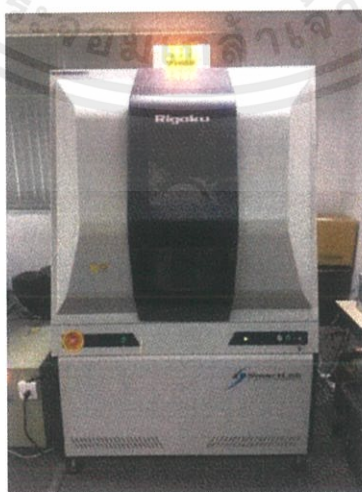
(3.2)

เมื่อ d คือ ระยะห่างระนาบของผลึก (h k l)

θ คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก

n คือ เลขใด ๆ $n = 1, 2, 3, \dots$

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54 Å)



รูปที่ 3.8 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของบริษัท Rigaku รุ่น Smart Lab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)

ในโครงการพิเศษได้ใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) ใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวอย่าง โดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการสั่นของโมเลกุล ช่วงจำนวนคลื่นหรือเลขคลื่น (cm^{-1}) หรือ Wavenumber) ที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้น เป็นรังสีช่วงอินฟราเรดกลาง คือ $4000\text{-}400$ ($\text{เซนติเมตร})^{-1}$ กระบวนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ต้องมีลักษณะ และสภาวะที่เหมาะสม คือ รังสีนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดีที่จะทำให้เกิดทรานซิชั่น และต้องเกิดการคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์คู่ขั้ว (Dipole Moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป

ดังนั้นเมื่อใช้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสาร แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้ เรียกสารนั้นว่า “ตอบสนองรังสีอินฟราเรด (IR Active)” ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ แสดงว่าสารนั้นเป็นสาร “ไม่ตอบสนองรังสีอินฟราเรด (IR Inactive)” ถือว่าไม่มีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คู่ขั้วมากจะได้พีคดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR Absorption Peak) สูง หากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยจะได้พีคดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR Absorption Peak) ต่ำ

ในการตรวจสอบลักษณะการดูดกลืนของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform-Infrared spectrometer; FT-IR) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จะเริ่มจากการนำผงที่ได้จากสังเคราะห์ไปวางบนที่ใส่ตัวอย่าง (holder) แล้วทำการปรับ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้ผ่านลำแสงคลื่นอินฟราเรดผ่านไปที่สารตัวอย่างโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเริ่มการวัดที่เลขคลื่น $4000\text{-}400$ ($\text{เซนติเมตร})^{-1}$ แล้ววัดซ้ำเป็นจำนวน 8 รอบ โดยข้อมูลที่ได้จากการวัด จะเป็นกราฟที่แสดงการดูดกลืนของสาร



รูปที่ 3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโกปีของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ลักษณะการส่งผ่านของคลื่นอินฟราเรดไปยังตัวอย่าง

3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

รามานสเปกโทรสโกปีเกิดอยู่ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้และไม่ได้วัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดอันเนื่องมาจากการสั่นหรือการหมุนของโมเลกุล แต่เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากได้ชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ เนื่องจากโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรด เพราะว่าโมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในโมเลกุล อย่างไรก็ตามพันธะของโมเลกุลดังกล่าวยังคงมีการสั่นและพบว่าเทคนิครามานสามารถจะให้สเปกตรัมของโมเลกุลดังกล่าวได้ โดยการผ่านคลื่นแสงไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตร คลื่นแสงเมื่อชนกับโมเลกุลถ้าการชนกับโมเลกุลเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) (เป็นการชนแบบไม่มีการสูญเสียพลังงาน) จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนแล้วมีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงในลักษณะแบบนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) แต่ถ้าการชนกับโมเลกุลเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) (เป็นการชนแบบมีการสูญเสียพลังงาน) จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนแล้วอาจมีพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงในลักษณะแบบนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

ความเข้มของการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) มีค่าประมาณ 10^{-10} – 10^{-12} เท่าของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุลซึ่งทำให้ตรวจวัดยาก จึงต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มสูงผ่านไปที่โมเลกุลโดยใช้คลื่นแสงจากเลเซอร์ (Laser light source) ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ศึกษาสูตรโครงสร้างโมเลกุลกับพันธะเคมี ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน ใช้ตรวจสอบคุณภาพวิเคราะห์ เช่น ตรวจสอบองค์ประกอบหลักจากสารผสมที่ซับซ้อน ใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารชีวโมเลกุล ใช้ศึกษาเพื่อหาส่วนประกอบ โครงสร้าง ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน ค่าคงที่สมดุลของการแตกตัวของกรด และรามานสเปกตรัมมีความสัมพันธ์กับอินฟราเรดสเปกตรัมแต่ให้ข้อมูลที่นอกเหนือจากที่ได้จากอินฟราเรดสเปกตรัม โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงทำการบดให้ละเอียด ต่อมานำมาอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดสำหรับเครื่องรามาน เสร็จแล้วนำไปติดกับแท่นอัดเม็ดบริเวณรอบๆ ให้สะอาดเพื่อไม่ให้สารตัวอย่างเกิดการฟุ้งกระจายในตัวเครื่องเพราะอาจทำให้เลเซอร์เสียหายได้ จากนั้นก็นำเข้าเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แล้วทำการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น DXR Raman Microscope

3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้ในการศึกษาถึงลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคหรือสิ่งแปลกปลอมที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อผลึกที่เตรียมได้โดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวให้เป็นสารแขวนลอย (Suspension) โดยนำไปละลายด้วยอะซิโตน (Acetone) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) แล้วทำการอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ประมาณ 5-30 นาที อนุภาคตัวอย่างจะกระจายตัวออกจากนั้นติดเทปคาร์บอน (Carbon tapes) บนแท่นอะลูมิเนียม (Stub) แล้วติดแผ่นทองแดงลงไป ต่อมาจึงหยดสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ลงตรงกลางแผ่นทองแดงประมาณ 1-2 หยด ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหลังจากนั้นนำไปเคลือบผิวหน้าของชิ้นงานด้วยทองคำบริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FE-SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชันของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6335F

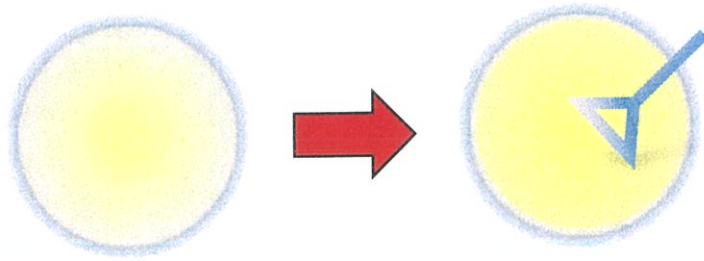
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

โครงการพิเศษนี้ทำการตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยการทดสอบหาบริเวณยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Inhibition zone) ผ่านเทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง (Disc diffusion techniques) และเชื้อที่จะใช้ในการทดสอบนั้นเป็นเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียกลุ่มแกรมบวก และ *Escherichia coli* (*E. coli*) ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียกลุ่มแกรมลบ โดยในการตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียนี้ จะเริ่มจากกระบวนการในการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียโดยเริ่มจากการเตรียมอาหารเหลว จากอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth ปริมาณ 3.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 400 มิลลิลิตร พร้อมทั้งทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย เป็น 6.8 ทำการดูดอาหารเหลวลงในหลอดทดลองจำนวน 2 หลอด หลอดละ 4 มิลลิลิตรไว้สำหรับการเพาะเชื้อแบคทีเรียที่เหลือ จากนั้นทำการเติมผงวุ้น (agar) ลงในอาหารเหลวโดยคิดเป็นร้อยละ 1.5 ของปริมาตร ต่อมานำอาหารเหลวมาเตรียมไว้ในหลอดทดลองและอาหารเหลวที่ทำการเติมวุ้นไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากผ่านกระบวนการฆ่าเชื่อนำอาหารเหลวที่ผสมผงวุ้นเทลงบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแล้วทิ้งไว้ให้อาหารเหลวเกิดการแข็งตัว ต่อมทำการ cấyเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ลงบนจานเพาะเลี้ยงเชื้อแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับเชื้อ *S. aureus* และที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สำหรับเชื้อ *E. coli* เป็นเวลา 15 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการเลือกเชื้อทั้งสองชนิดที่มีลักษณะเป็นโคโลนีเดี่ยวๆ เชียลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยเพิ่มการสั่นเข้าไปเพื่อให้เชื้อเกิดการแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในส่วนต่อมาเป็นส่วนในการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยเริ่มจากการทา (Swab) เชื้อแบคทีเรียให้ทั่วบริเวณผิวอาหารเลี้ยงเชื้อไว้ที่เตรียมไว้ในจานเพาะเชื้อ ทิ้งไว้ประมาณ 3 – 5 นาที จากนั้นวางกระดาษกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว (filter paper disc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

แล้วนำวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งมีขนาดและลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันกระจายตัวในเอทิลแอลกอฮอล์ และหยดลงบนกระดาษกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วในตำแหน่งที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ตำแหน่งละ 100 ไมโครลิตร รวมทั้งหยดน้ำกลั่นไว้เป็นตัวอ้างอิง แล้วจึงนำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับเชื้อทั้งสองชนิด แล้วนำมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่ไม่มีแบคทีเรียขึ้น (inhibition zone) โดยวัดเป็นหน่วยมิลลิเมตร จากขอบโซนอีกข้างหนึ่งไปยังขอบโซนในอีกข้างหนึ่ง



รูปที่ 3.13 ลักษณะการเปลี่ยนสีของงานเพาะเชื้อ



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งหยดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ลงบนกระดาดชกรอง โดยตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งของน้ำกลั่น และตำแหน่งที่ 2-4 คือตำแหน่งของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

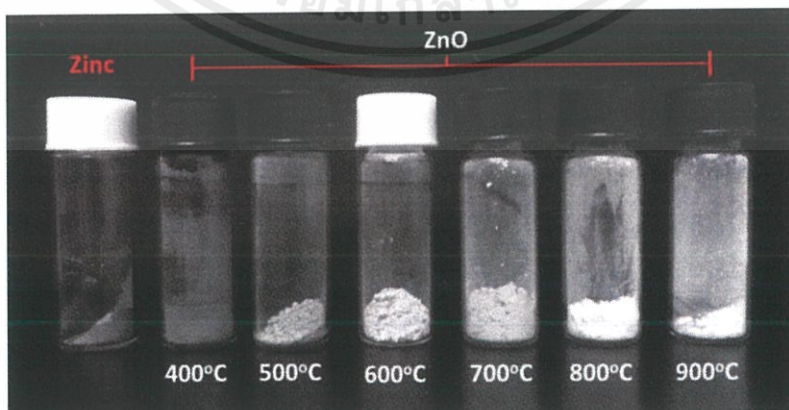
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (Ball-milling process) จากสารตั้งต้นโลหะสังกะสี เป็นตัวแทนของกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตรผ่านเทคนิคเชิงกล (Mechanical process) และเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal technique) เป็นตัวแทนของกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนเมตรผ่านกระบวนการทางเคมี (Chemical process) โดยมีซิงค์ไนเตรต (Zinc nitrate) และซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) เป็นสารตั้งต้น และมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นตัวตกตะกอน ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรที่เตรียม พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตร ด้วยกระบวนการผสมบดย่อย (Ball-milling process)

4.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการผสมบดย่อย โดยนำอนุภาคผงโลหะสังกะสีมาทำการบดย่อยด้วยลูกบดเซอร์โคเนียเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศของแก๊สออกซิเจนดังสมการที่ 4.1 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (400 500 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



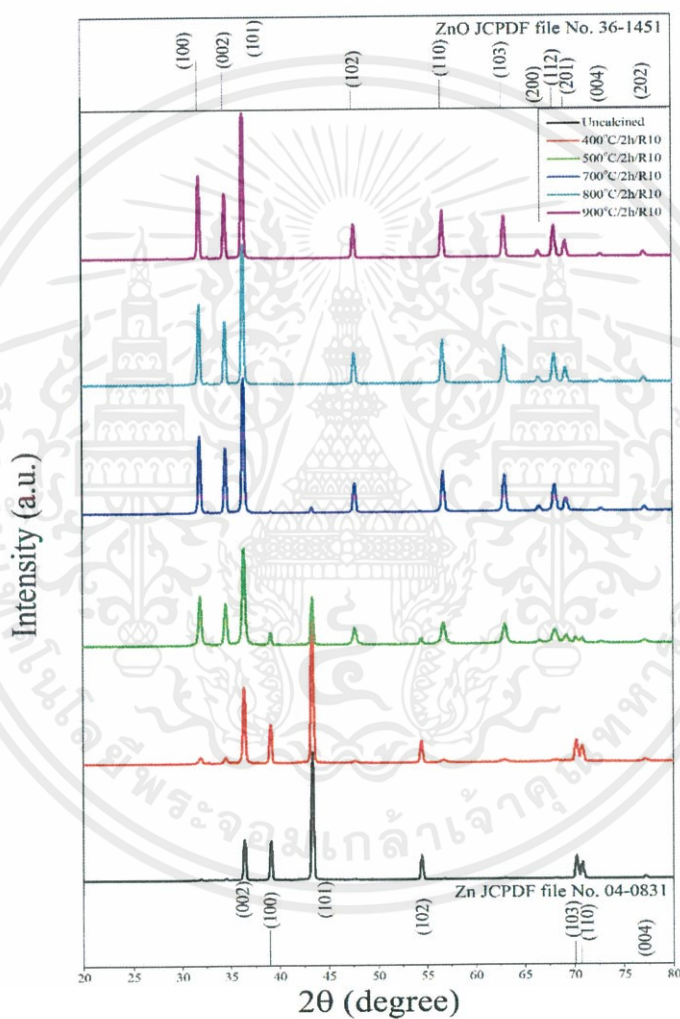
จากรูปที่ 4.1 พบว่าภาพรวมของอนุภาคผงโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศของออกซิเจนแต่ละอุณหภูมิที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีที่สม่ำเสมอ โดยอนุภาคผงโลหะสังกะสีจะมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากสีเทาเข้มของผงโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาแคลไซด์ ไปเป็นสีเทาที่อ่อนลงตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (400 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส) และเปลี่ยนไปเป็นสีขาวเมื่อผ่านกระบวนการเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งอนุภาคผงที่มีสีขาวของผงโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียสนั้น มีความคล้ายคลึงกับสีของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นอย่างมาก ดังนั้นในโครงพิเศษนี้จึงได้ทำการตรวจสอบเฟสของอนุภาคผงดังกล่าวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นลำดับถัดไป

4.1.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD)

หลังจากที่ทำการเผาแคลไซน์อนุภาคผงโลหะสังกะสี ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ (ที่อุณหภูมิ 400 500 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) แล้วจึงนำอนุภาคผงดังกล่าวมาทำการตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นองค์ประกอบ และลักษณะโครงสร้างของอนุภาคผงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังได้แสดงในรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคผงโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (รูปที่ 4.2) พบว่าอนุภาคผงโลหะสังกะสีก่อนทำการเผาแคลไซน์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับข้อมูลของโลหะซิงค์ (Zn) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 04-0831 ซึ่งมีโครงสร้างแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) และมีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ระนาบ (101) (100) และ (002) ซึ่งตรงกับตำแหน่งของค่า 2θ เป็น 43.230 36.295 และ 38.991 ตามลำดับ มีค่าแลตติสพารามิเตอร์ที่ $a = 2.665 \text{ \AA}$ และ $c = 4.947 \text{ \AA}$ เมื่อทำการเผาแคลไซน์อนุภาคผงโลหะสังกะสีที่อุณหภูมิ 400 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคผงตัวอย่างเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ผสมระหว่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโลหะสังกะสี (แฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 04-0831) กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ (แฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 36-1451) โดยที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ต่ำ (400 องศาเซลเซียส) จะมีปริมาณความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโลหะสังกะสีมากกว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ และที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์สูง (700 องศาเซลเซียส) จะมีปริมาณความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์มากกว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโลหะสังกะสี และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาแคลไซน์เป็น 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ของอนุภาคผงตัวอย่างสอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น (ZnO) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 36-1451 ซึ่งมีโครงสร้างแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) และมีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ระนาบ (101) (100) และ (002) ซึ่งตรงกับตำแหน่งของค่า 2θ เป็น 36.253 31.770 และ 34.422 ตามลำดับ มีค่าแลตติสพารามิเตอร์ที่ $a = 3.249 \text{ \AA}$ และ $c = 5.206 \text{ \AA}$ หรืออาจจะสรุปจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคผงตัวอย่างได้ว่าอนุภาคเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้อนุภาคผงของโลหะซิงค์เปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุภาคผงของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ได้ตามลำดับ และสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบซิงค์ออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคผงโลหะสังกะสีที่ผ่านกระบวนการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับปริมาณร้อยละของอนุภาคผงโลหะสังกะสี และปริมาณร้อยละของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากค่าความเข้มของพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ระนาบ (101) ซึ่งตรงกับตำแหน่งของค่า 2θ เป็น 43.230 ของโลหะสังกะสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ค่าความเข้มของพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ระนาบ (101) ซึ่งตรงกับตำแหน่งของค่า 2θ เป็น 36.253 ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$\%Zn = \frac{I_{Zn(i)} - I_{Zn(o)}}{I_{Zn(i)}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\%ZnO = \frac{I_{ZnO(i)} - I_{ZnO(o)}}{I_{ZnO(i)}} \times 100 \quad (4.3)$$

โดยที่ %Zn คือ ปริมาณร้อยละของอนุภาคผงโลหะสังกะสี

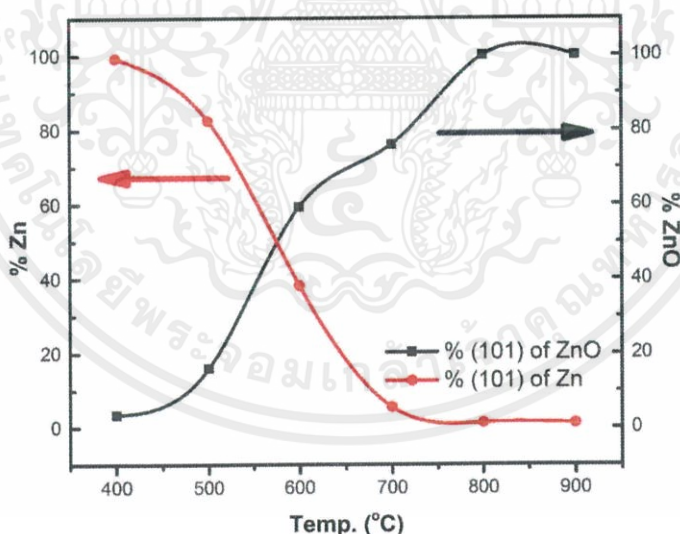
%ZnO คือ ปริมาณร้อยละของอนุภาคผงสารประกอบซิงค์ออกไซด์

$I_{Zn(i)}$ คือ ค่าความเข้มระนาบ (101) ของโลหะสังกะสีบริสุทธิ์

$I_{ZnO(i)}$ คือ ค่าความเข้มระนาบ (101) ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์

$I_{Zn(o)}$ คือ ค่าความเข้มระนาบ (101) ของโลหะสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ

$I_{ZnO(o)}$ คือ ค่าความเข้มระนาบ (101) ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.3 ร้อยละของโลหะสังกะสีและสารประกอบซิงค์ออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิแคลไซน์

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแคลไซน์กับปริมาณร้อยละของอนุภาคผงโลหะสังกะสี และปริมาณร้อยละของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณโลหะสังกะสีคิดเป็นร้อยละ 99.27 และมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารประกอบซิงค์ออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 3.40 และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าแลตติสพารามิเตอร์ได้ตามสมการที่ 4.4 และขนาดของผลึก (Crystallite size) ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ได้ผ่านสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$\frac{1}{d^2} = \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 สามารถหาค่าแลตติสพารามิเตอร์ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของอนุภาคผงสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างผลึกของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์

อุณหภูมิแคลไซน์ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของ สารประกอบ ซิงค์ออกไซด์	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	แลตติสพารามิเตอร์		ปริมาตร หน่วยเซลล์ (Å ³)
			a (Å)	c (Å)	
400	3.40	47.7	3.239	5.193	54.48
500	15.98	56.2	3.233	5.182	54.16
700	76.12	58.8	3.233	5.176	54.10
800	100	68.4	3.233	5.176	54.10
900	100	74.3	3.233	5.176	54.10

$$L = \frac{K\lambda}{B \cos \theta} \quad (4.5)$$

โดยที่ L คือ ขนาดของผลึก

K คือ ค่าคงที่ ซึ่งเมื่อพิสูจน์ด้วยสมการของ Scherrer จากเส้นกราฟแบบ Gaussian และผลึกเป็นแบบคิวบิกมีขนาดสม่ำเสมอจะได้ว่า $K = 0.94$ อย่างไรก็ตามค่าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 0.89 – 1.39 ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลึก

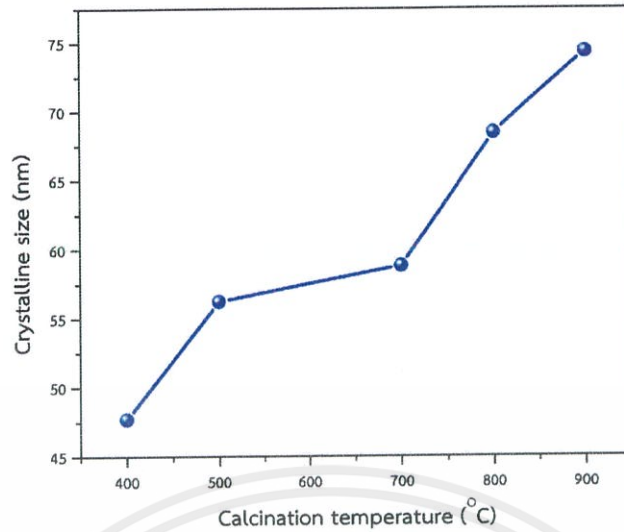
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.1542 นาโนเมตร)

B คือ ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุด (FWHM: full width at half maximum)

$\cos \theta$ คือ มุมของแบรกก์

จากสมการที่ 4.5 สามารถคำนวณหาขนาดผลึก (Crystalline size) ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ พบว่าขนาดผลึกของสารประกอบซิงค์ออกไซด์มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

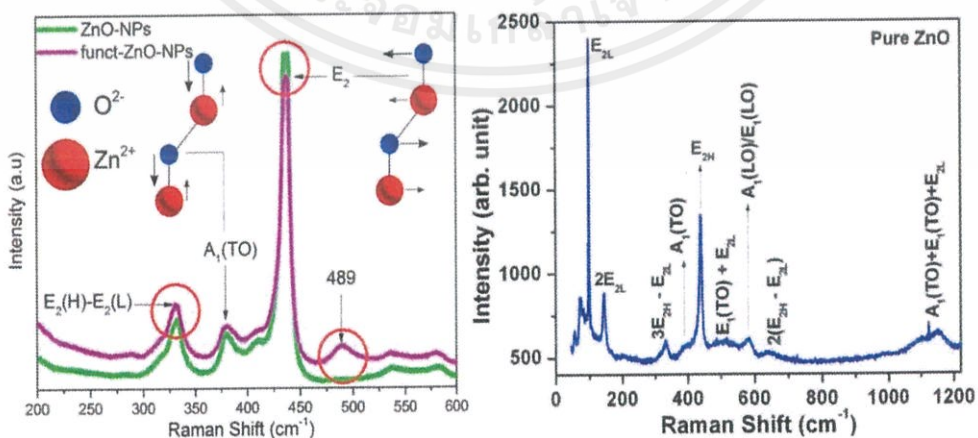
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแคลไซน์กับขนาดผลึกของสารประกอบซิงค์ออกไซด์

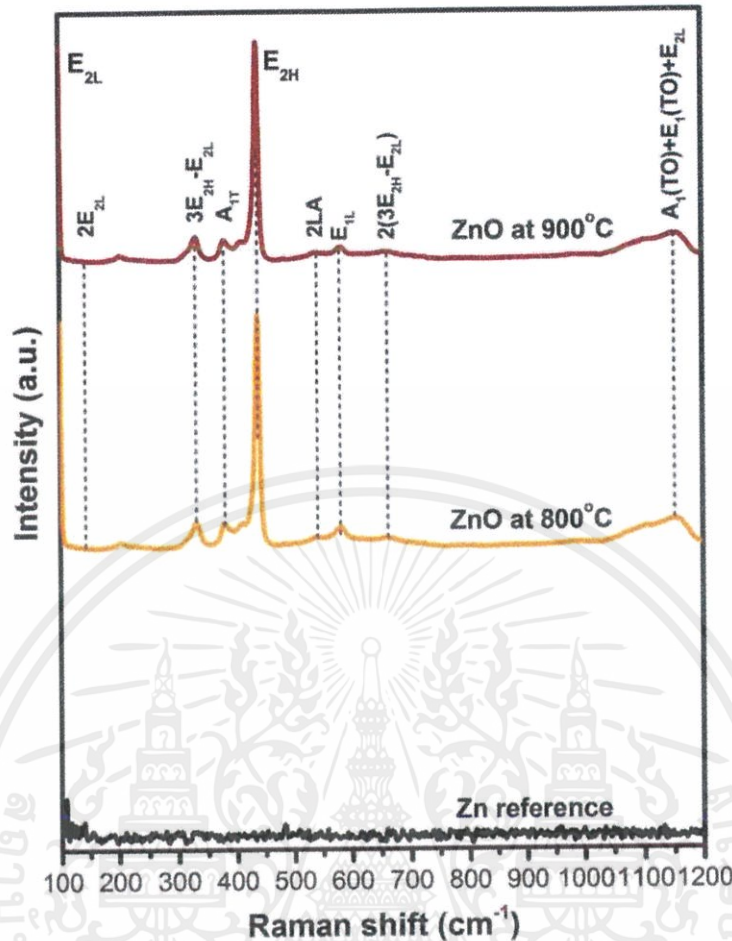
4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

หลังจากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคผงตัวอย่างแล้ว พบว่าอนุภาคผงตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรัวสีเอกซ์มาตรฐานของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 36-1451 ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าอนุภาคผงตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นสารประกอบซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ และเพื่อเป็นการยืนยันจึงทำการตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี อันเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสารประกอบ ดังงานวิจัยของ M.F. Melendrez และคณะ [16] และงานวิจัยของ Murugesan SILAMBARASAN [17] ที่ได้ทำการตรวจสอบการสั่นของพันธะในซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี เพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปแบบการสั่นของพันธะของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี [16-17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปแบบการสั่นของพันธะของอนุภาคผงตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

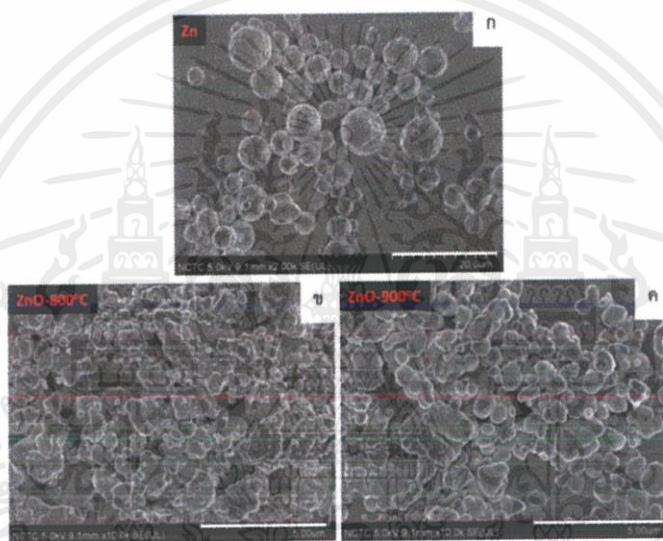
จากรูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะของอนุภาคผงตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี พบว่ารูปแบบการสั่นของพันธะของอนุภาคผงตัวอย่างมีความสอดคล้องกับรูปแบบการสั่นของพันธะของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการสั่นระหว่างพันธะของอะตอมสังกะสีกับอะตอมออกซิเจน ในโหมดต่างๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคผงตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเป็นสารประกอบซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ ไม่มีเฟสเจือปน

4.1.4 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM)

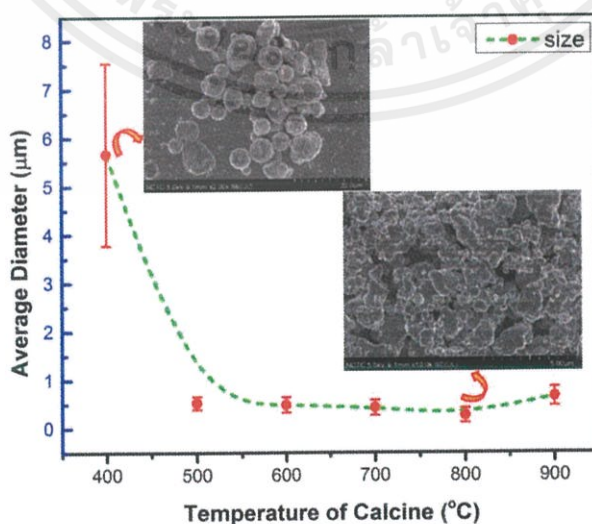
ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการบดผสมย่อนั้น เป็นกระบวนการเชิงกลที่ทำให้ซิงค์ออกไซด์นั้นมีขนาดที่ลดลง และรูปร่างลักษณะที่เปลี่ยนไป จึงทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสดงดัง รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของโลหะสังกะสีเป็นซิงค์ออกไซด์โดยผ่านกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของโลหะสังกะสีก่อนที่จะผ่านกระบวนการแคลไซน์นั้น จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดเฉลี่ยประมาณ 4.53 ± 1.877 ไมโครเมตร หลังจากผ่านกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆและการบด จะเกิดเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของโลหะสังกะสีเป็นซิงค์ออกไซด์ โดยจะมีแนวโน้มของขนาดของอนุภาคที่ลดลง ดังรูปที่ 4.8 โดยที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียสจะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 266 ± 14.9 และ 655 ± 19.5 นาโนเมตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุด แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการแคลไซน์ขึ้น จะเห็นว่า อนุภาคมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อยให้มีขนาดที่เล็กมากที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



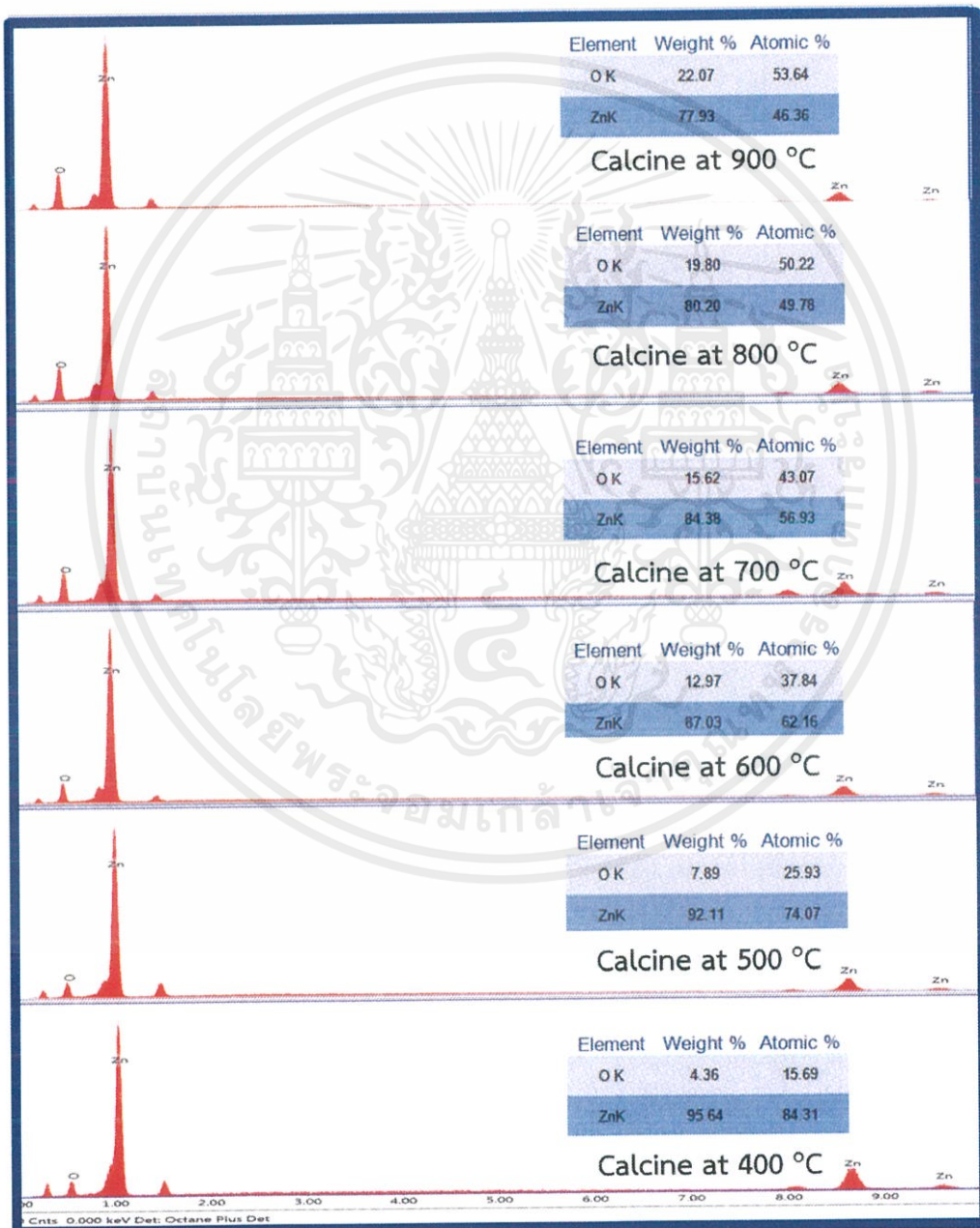
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของโลหะสังกะสี และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ก) โลหะสังกะสี (ข) ซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (ค) ซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเอนเนอจีดีสเปอรัซีฟเอกซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์ (energy dispersive x-ray spectrometer) ซึ่งเป็นการตรวจหาร้อยละปริมาณธาตุของซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (400 500 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) พบว่าที่อุณหภูมิการแคลไซน์ที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มากขึ้น โดยสังเกต ดังรูปที่ 4.9 แสดงปริมาณธาตุของซิงค์ออกไซด์โดยจะเห็นได้ว่า ปริมาณของออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนที่เหมาะสมของการเกิดซิงค์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ คือที่อัตราส่วนของน้ำหนักอะตอมออกซิเจนและสังกะสีประมาณร้อยละ 20 ต่อ 80 ตามลำดับ และอัตราส่วนของอะตอม ประมาณร้อยละ 50 ต่อ 50 ตามลำดับ

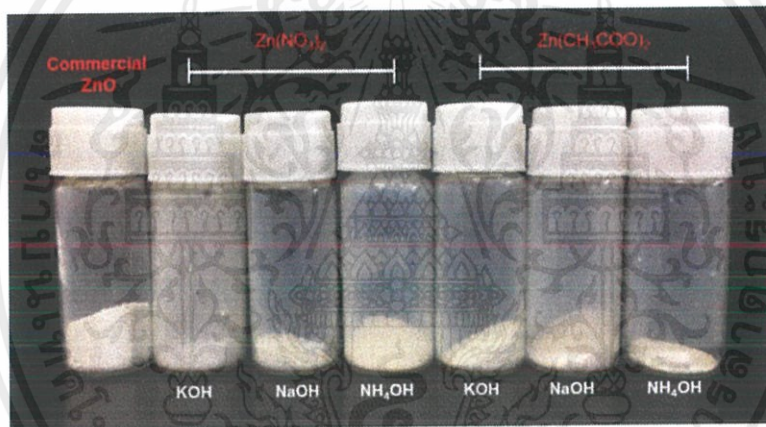


รูปที่ 4.7 ร้อยละปริมาณธาตุของซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล โดยการใช้สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรตและซิงค์ไนเตรต ทำปฏิกิริยากับตัวตกตะกอน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความดัน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้นั้น จะมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหมือนกันทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์ จึงทำการตรวจสอบลักษณะที่แตกต่างกันของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ และตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน



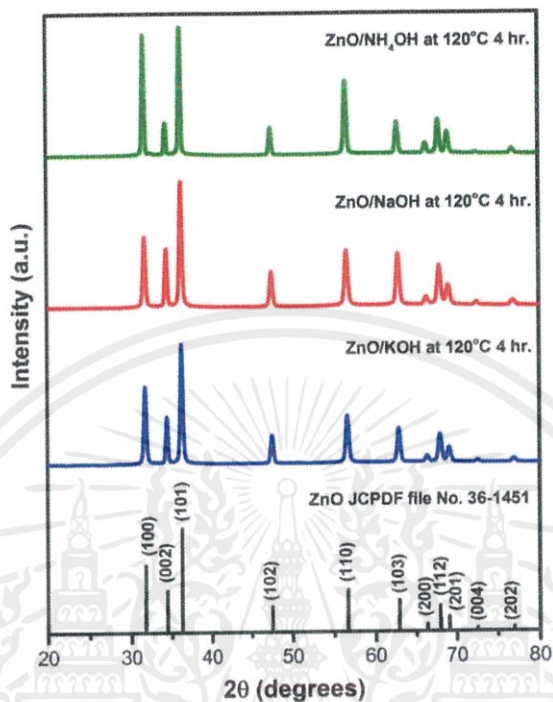
รูปที่ 4.8 ลักษณะสีของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่างๆ

4.2.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

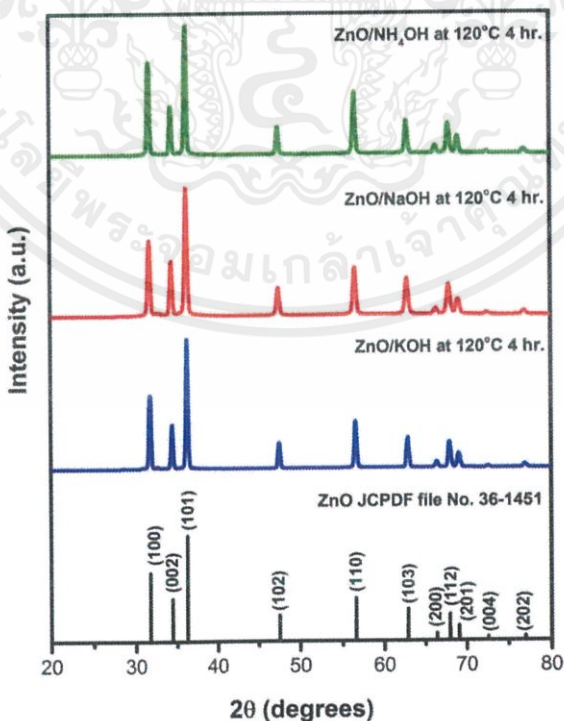
จากการศึกษาขนาดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถสังเกตได้จากรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีชนิดของสารตั้งต้น ชนิดของตัวตกตะกอน และความเข้มข้นของชนิดตัวตกตะกอนที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 โดยจากรูปที่ 4.11 เป็นรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซิงค์ออกไซด์โดยมีสารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต สามารถสังเกตเห็นได้ว่าทุกชนิดของตัวตกตะกอนที่มุม 2θ เท่ากับ 31.75, 34.42, 36.24, 47.54, 56.59, 62.85, 66.36, 67.94, 69.07, 72.53 และ 76.95 ตามลำดับ ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ในระนาบ (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) และ (202) ตามลำดับ โดยจะสามารถบอกได้ว่าเป็นผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และมีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซด์ (Wurtzite) ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล (JCPDF file No.36-1451) ในขณะเดียวกันในรูปที่ 4.12 นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต มีความสอดคล้องกับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิงค์ออกไซด์ เช่นเดียวกับการใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต



รูปที่ 4.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต



รูปที่ 4.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นเป็นซิงค์อะซิเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 สามารถคำนวณหาค่าแลตติสพารามิเตอร์ได้ตามสมการที่ 4.4 และขนาดของผลึก (Crystallite size) ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ได้ผ่านสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) ดังแสดงในสมการที่ 4.5

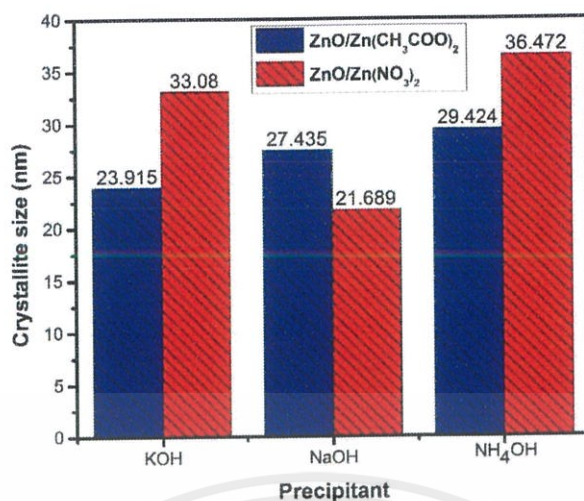
จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 สามารถคำนวณหาค่าแลตติสพารามิเตอร์ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของอนุภาคผงสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ที่ได้จากการบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่เงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างผลึกของอนุภาคผงซิงค์ออกไซด์

สารตั้งต้น	ตัวตกตะกอน	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	แลตติสพารามิเตอร์		ปริมาตรหน่วย เซลล์ (\AA^3)
			a (\AA)	c (\AA)	
ซิงค์- ไนเตรต	โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์	33.080	3.249	5.203	54.92
	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	21.689	3.248	5.205	54.91
	แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์	36.472	3.254	5.207	55.13
ซิงค์- อะซิเตรต	โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์	23.915	3.251	5.203	54.99
	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	27.435	3.250	5.208	55.01
	แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์	29.424	3.251	5.212	55.08

จากการศึกษาขนาดของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถเห็นได้จากรูปแสดงขนาดของโครงสร้างผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดังรูปที่ 4.13 โดยแสดงขนาดของโครงสร้างผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีการใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน พบว่าในการใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรตกับชนิดของตัวตกตะกอนเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะสามารถสังเคราะห์ผงนาโนซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดของโครงสร้างผลึกเล็กที่สุด เท่ากับ 21.689 นาโนเมตร ในส่วนของการใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์อะซิเตรตนั้นขนาดของโครงสร้างผลึกที่เล็กที่สุด เกิดจากการสังเคราะห์กับชนิดของตัวตกตะกอนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 23.915 นาโนเมตร

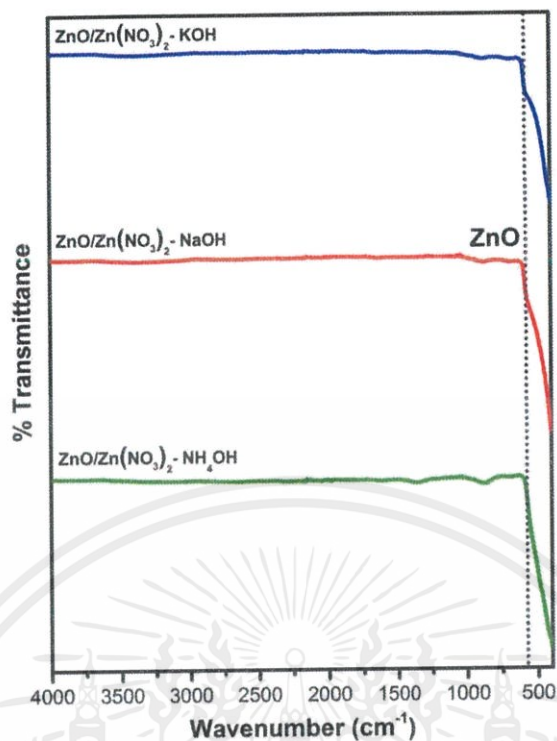
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



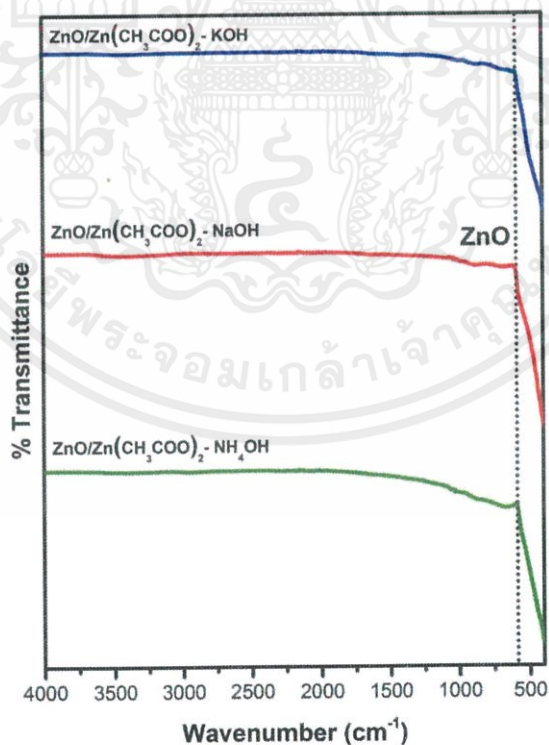
รูปที่ 4.11 ขนาดของโครงสร้างผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ชนิดของสารตั้งต้นและตัวตกตะกอนแตกต่างกัน

4.2.2 การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเฟสอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องฟลูออริสเซนซ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

จากการศึกษาความบริสุทธิ์ของเฟสที่เกิดขึ้นของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องฟลูออริสเซนซ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์สามารถเห็นได้จากรูปแสดงเปอร์เซ็นต์ของการทะลุผ่านของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ดังรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 โดยจากรูปที่ 4.14 แสดงความบริสุทธิ์ของเฟสที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ผงนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรตทำปฏิกิริยากับตัวตกตะกอนชนิดต่างๆ พบว่าผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้นั้น มีความบริสุทธิ์ของเฟส โดยจะเห็นได้จากกราฟเป็นการแสดงร้อยละการทะลุผ่านของซิงค์ออกไซด์ สังเกตได้จากร้อยละการทะลุผ่านของซิงค์ออกไซด์นั้นมีค่าลดลงตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 580-400 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงช่วงการดูดกลืนแสงที่มีความสอดคล้องช่วงการดูดกลืนแสงของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอนุภาคของสังกะสีกับออกซิเจน (Zn-O) จึงสามารถบอกได้ว่าเฟสที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์ ในส่วนของรูปที่ 4.15 เป็นการสังเคราะห์ผงนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรตพบว่ากราฟการทะลุผ่านของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องของค่าการทะลุผ่านไปในทางเดียวกันกับค่าการทะลุผ่านของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ไนเตรต จึงสามารถบอกได้ว่าในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดกับตัวตกตะกอนต่างๆ สามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีความบริสุทธิ์ได้



รูปที่ 4.12 ความบริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต

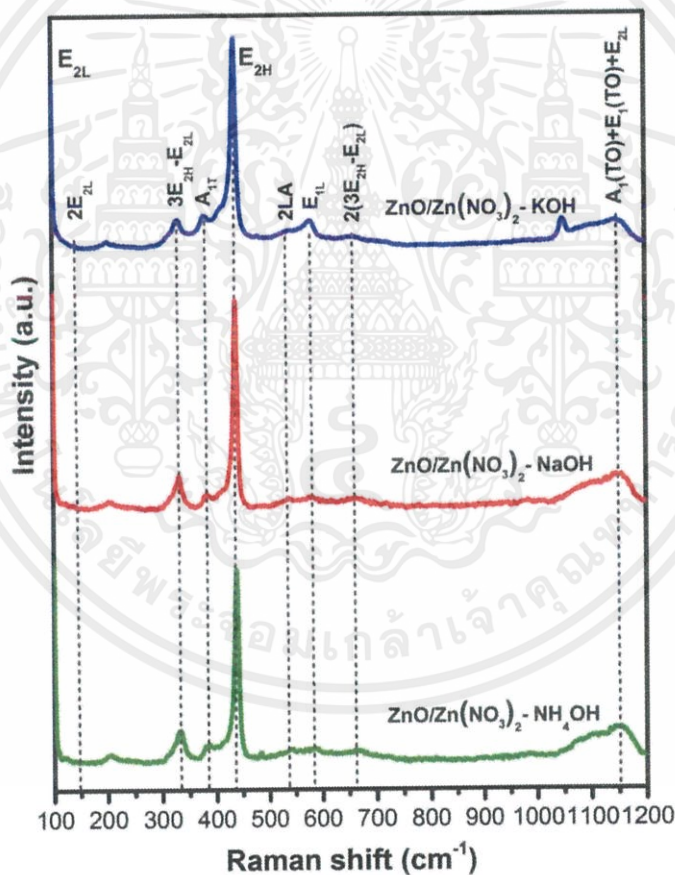


รูปที่ 4.13 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

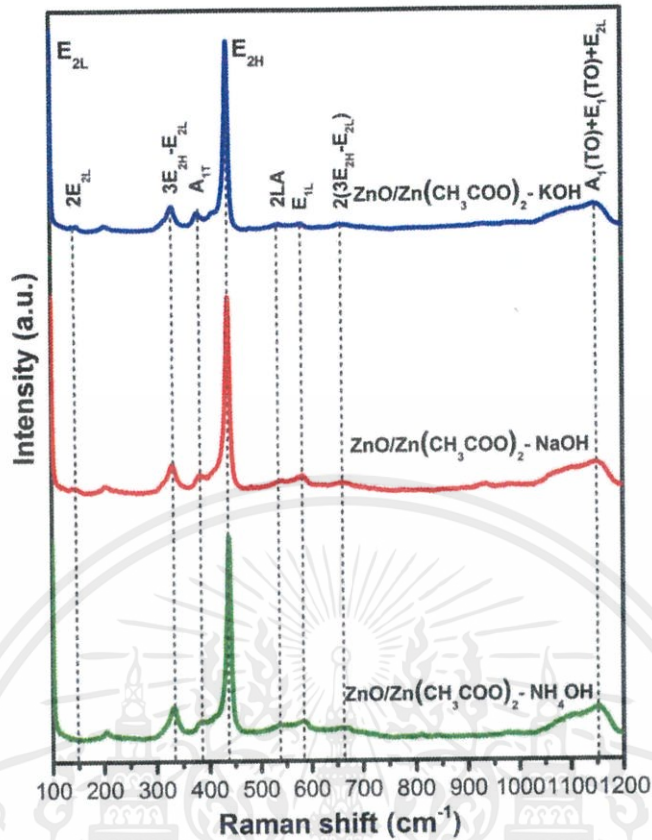
4.2.3 การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเฟสอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

จากการตรวจสอบเครื่องฟลูอริเยร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์นั้นยังไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอนว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์นั้นมีความบริสุทธิ์ที่สูง จึงตรวจสอบด้วยเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ ซึ่งเป็นการตรวจสอบการสั่นของพันธะในโมเลกุลของวัสดุ เพื่อเป็นการตรวจสอบโมเลกุลที่อาจหลงเหลือจากกระบวนการสังเคราะห์ ดังแสดงให้เห็นใน รูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 เป็นการศึกษาความบริสุทธิ์ของสาร ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ได้จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลในเงื่อนไขในการสังเคราะห์ต่างๆ มีการสั่นของพันธะระหว่าง อะตอมของสังกะสี และอะตอมของออกซิเจน ในโหมดการวัดที่แตกต่างกัน ตรงกับการสั่นของพันธะของซิงค์ออกไซด์ เมื่อเทียบกับข้อมูลอ้างอิง โดยรูปที่ 4.16 เป็นความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต ในส่วนของรูปที่ 4.17 เป็นสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต



รูปที่ 4.14 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

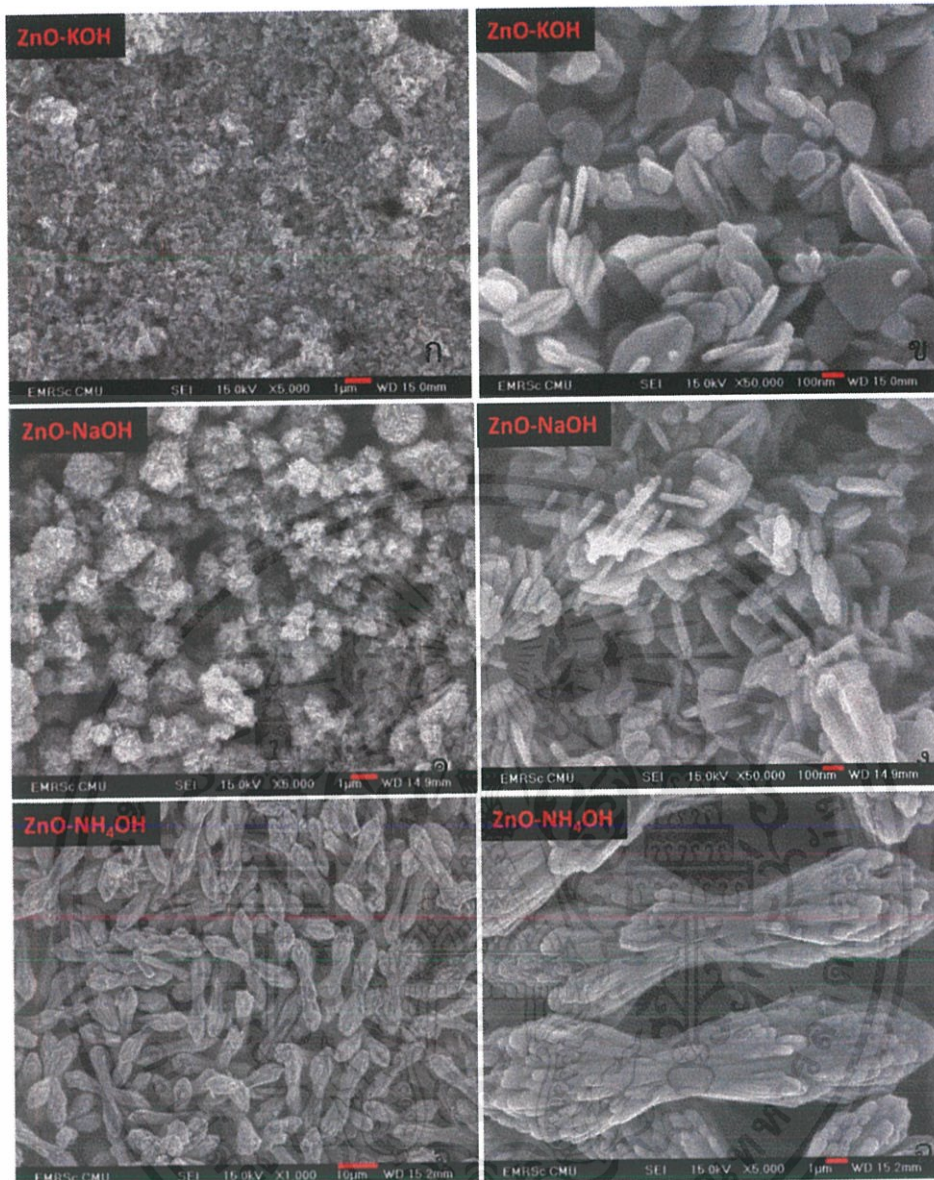


รูปที่ 4.15 ความบริสุทธิ์ของเฟสซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต

4.2.4 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลต์อิมิสชันจากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่เงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่กำหนดไว้ ซึ่งทุกเงื่อนไขสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ โดยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว เหมือนกันทุกเงื่อนไข จึงทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารตั้งต้นและชนิดของตัวตกตะกอนที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในรูปแบบของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการใช้สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในการใช้ชนิดของตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน จะส่งผลทำให้ได้รูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งมีผลมาจากการที่สารตั้งต้นและตัวตกตะกอนแต่ละชนิดนั้น จะแตกตัวเป็นไอออนที่ประจุและขนาดที่แตกต่างกัน โดยจากการตรวจสอบพบว่า เมื่อใช้ตัวตกตะกอนเป็น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้อนุภาคที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นๆ (nanosheets) มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 268 ± 8.22 และ 253 ± 8.11 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวตกตะกอนแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคจะมีลักษณะคล้ายดัมเบล (dumbbell-shaped nanorods) มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 21 ± 0.5 ไมโครเมตร สำหรับสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรตตัวตกตะกอนที่ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กมากที่สุดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์

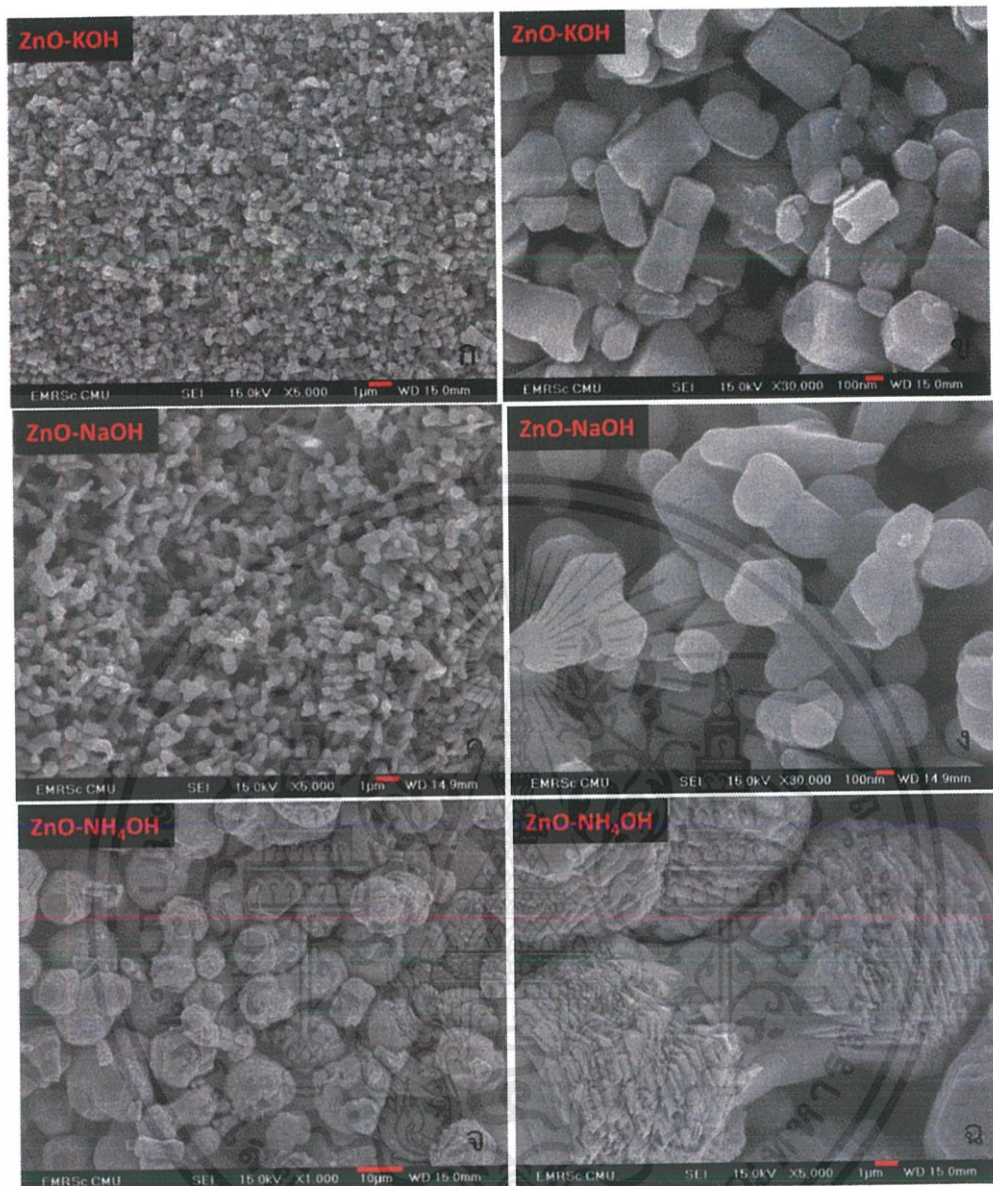
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ชนิดตัวตกตะกอนต่างๆ จากสารตั้งต้นซิงค์-ไนเตรต (ก-ข) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ค-ง) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (จ-ฉ) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

ในส่วนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต พบว่า เมื่อใช้ตัวตกตะกอนเป็น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้อนุภาคที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นปริซึมฐานหกเหลี่ยม (hexagonal nanorods) มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 513 ± 48.7 นาโนเมตร ในส่วนของการใช้ตัวตกตะกอนเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายดาวสามแฉก (three-pointed star symbolic of nanoparticles) มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 309 ± 49.8 นาโนเมตร และในการใช้ตัวตกตะกอนเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคจะมีลักษณะรูปร่างคล้ายดัมเบล มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 24 ± 2 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.19 ในการใช้ตัวตกตะกอนทั้งสามชนิดพบว่า ตัวตกตะกอนที่สามารถสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดที่เล็กมากที่สุดสำหรับสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่ชนิดตัวตกตะกอนต่างๆจากสารตั้งต้นซิงค์-อะซิเตรต (ก-ข) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ค-ง) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (จ-ฉ) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

จากกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล พบว่าเมื่อเปรียบเทียบชนิดของตัวตกตะกอนทั้งสามชนิดในสารตั้งต้นไนเตรตและสารตั้งต้นอะซิเตรต ตัวตกตะกอนที่ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีขนาดที่เล็กมากที่สุดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของสารตั้งต้น พบว่าสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดที่เล็กที่สุด คือ สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต

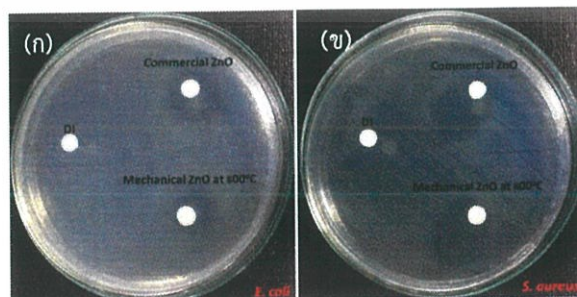
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสมบัติทางชีวภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อยจากสารตั้งต้นโลหะสังกะสีและการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลจากสารตั้งต้นซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์อะซิเตรตและซิงค์ไนเตรต ทำปฏิกิริยากับตัวตกตะกอน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ จึงนำไปสู่การศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ที่มีสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างผลึก และรูปร่าง ที่แตกต่างกัน จากการสังเคราะห์ การใช้สารตั้งต้นและชนิดตัวตกตะกอนที่ต่างกัน โดยใช้วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิคการแพร่บนกระดาษกรอง

โดยการศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการแพร่บนกระดาษกรองนั้นเป็นการตรวจสอบการยับยั้งจากการหยุดยั้งการขยายตัวของเซลล์แบคทีเรียบนกระดาษกรองแล้วศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากโซนใสหรือโซนปลอดเชื้อที่เกิดขึ้น โดยโซนใสที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทำให้เกิดเป็นโซนใสขึ้น ซึ่งเชื้อแบคทีเรียที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นั้น เป็นแบคทีเรียที่เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งในการตรวจสอบนี้แบคทีเรียที่ถูกนำมาใช้คือ *Escherichia coli* (*E. coli*) เป็นเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก

จากการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการบดผสมย่อยโดยเลือกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากที่สุดที่ได้จากการสังเคราะห์เชิงกล โดยเปรียบเทียบสมบัติในการยับยั้งกับซิงค์ออกไซด์ทั่วไป ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.20 โดยจะเห็นได้ว่าซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการบดผสมย่อยสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มากกว่าซิงค์ออกไซด์ทั่วไป โดยมีขนาดของโซนใสที่ใหญ่กว่า เนื่องจากขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการบดผสมย่อยนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ทั่วไป ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 298 นาโนเมตร ดังแสดงให้เห็นลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ทั่วไป ในรูปที่ 4.21



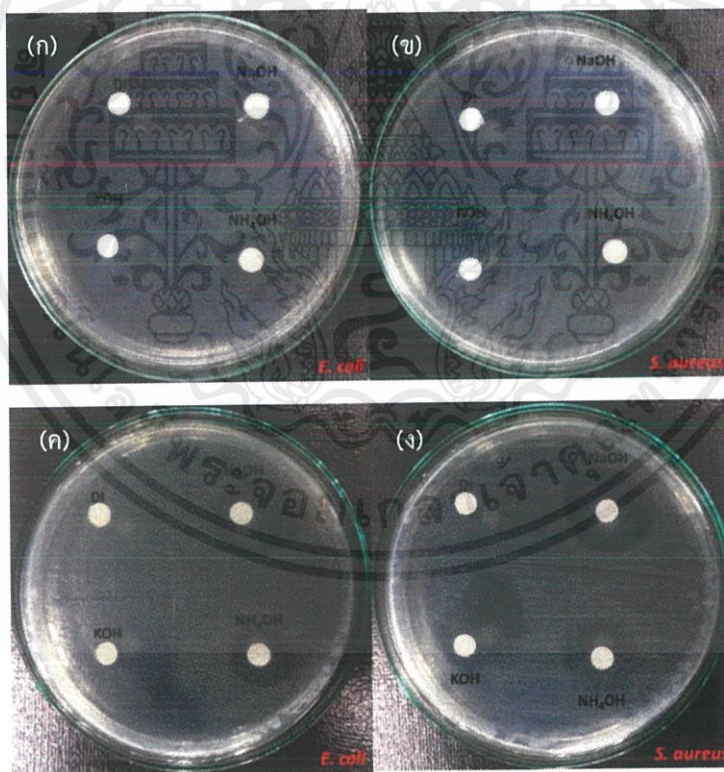
รูปที่ 4.18 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* ของซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ทั่วไป (ก) *E. coli* (ข) *S. aureus*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ทั่วไป

จากการศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลพบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้ โดยแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) แสดงโซนใสที่เกิดขึ้นจากการยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

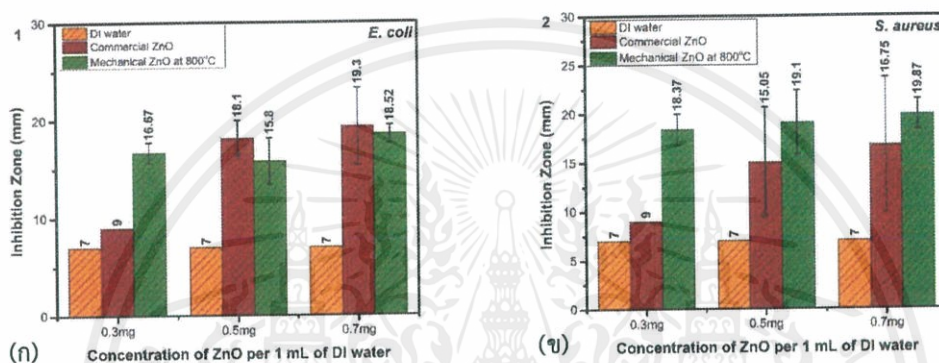


รูปที่ 4.20 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *S. aureus* (ก-ข) สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต
(ค-ง) สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต ตามลำดับ

ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ และขนาดของโซนใสที่เกิดขึ้น โดยขนาดของโซนใสจะมีขนาดที่กว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

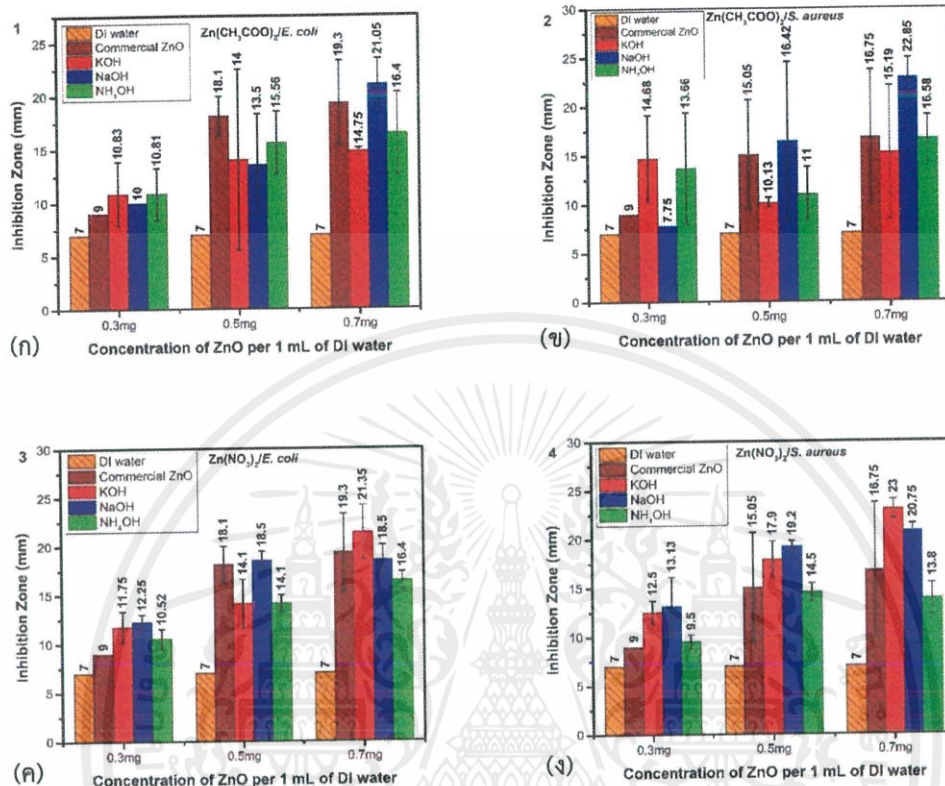
มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดกลไกในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นการบอกได้ว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหรือขนาดของโซนไฮโปเธติกตรงกับความเข้มข้นของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ดังแสดงให้เห็นใน รูปที่ 4.23 และ รูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงถึงขนาดของโซนไฮโปเธติกที่เกิดขึ้นจากผลจากการใช้สารตั้งต้น ชนิดของตัวตกตะกอน และกระบวนการในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยในรูปที่ 4.23 อิทธิพลของกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิงค์ออกไซด์ พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมากกว่าซิงค์ออกไซด์ทั่วไป เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า



รูปที่ 4.21 ขนาดของโซนไฮโปเธติกที่เกิดจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อย (ก) *E. Coli* (ข) *S. aureus*

สำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล สามารถแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดังรูปที่ 4.24 โดยในรูปที่ 4.24 แสดงถึงขนาดของโซนไฮโปเธติกที่มีผลมาจากชนิดของสารตั้งต้นและชนิดของตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน จากการศึกษอิทธิพลของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันพบว่า สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรตและซิงค์ไนเตรตสามารถเกิดกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งสอง โดยขนาดของโซนไฮโปเธติกที่ความเข้มข้นที่เท่ากันนั้น มีขนาดนั้นที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรตและซิงค์ไนเตรตนั้นสามารถทำให้เกิดกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ในส่วนของการศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวตกตะกอนพบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวตกตะกอนที่ทำให้เกิดกลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีมากกว่าแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์จากการใช้ตัวตกตะกอนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีขนาดเล็กกว่า ขนาดอนุภาคจากการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จึงทำให้มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่า เพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาที่มากกว่า ในส่วนของลักษณะทางสัณฐานวิทยานั้นก็ส่งผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในทางที่สอดคล้องเช่นเดียวกับเรื่องของขนาดอนุภาค โดยลักษณะสัณฐานวิทยาจากชนิดตัวตกตะกอนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น มีลักษณะที่ค่อนข้างแหลม

และหลักทำให้สามารถเจาะเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ง่ายกว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของ ซิงค์ออกไซด์จากตัวตกตะกอนแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ลักษณะรูปร่างที่ใหญ่และปลายมน



รูปที่ 4.22 ขนาดของโซนใสที่เกิดจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (ก-ข) สารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต (ค-ง) สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต ตามลำดับ

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการเชิงกลและกระบวนการทางเคมี โดยใช้กระบวนการบดผสมย่อยและเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า ในกระบวนการบดผสมย่อยจากสารตั้งต้นโลหะซิงค์นั้น อุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญในการก่อให้เกิดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ที่สูงและมีขนาดอนุภาคที่เล็ก คือที่อุณหภูมิในการแคลไซน์เท่ากับ 800 องศาเซลเซียส ในส่วนของการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล พบว่าชนิดของสารตั้งต้นและตัวตกตะกอนนั้นส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยชนิดของสารตั้งต้นที่ทำให้ได้อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากที่สุด คือ สารตั้งต้นซิงค์ไนเตรต และตัวตกตะกอนที่ทำให้มีขนาดเล็กมากที่สุด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และในที่สุดท้ายในเรื่องของสมบัติทางชีวภาพนั้น อนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสังเคราะห์ทุกเงื่อนไขสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เช่นเดียวกัน โดยเงื่อนไขที่เกิดการยับยั้งมากที่สุดคือ เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล จากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดและตัวตกตะกอนเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อยจากสารตั้งต้นโลหะสังกะสีและกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลชนิด จากสารตั้งต้นและชนิดของตัวตกตะกอนที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยมีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยาทางแสง โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะศึกษาถึงอิทธิพลของการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อยและเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่จะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก ขนาด และเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์นั้นจะแบ่งเป็นสองประเภท คือ การบดผสมย่อยแล้วแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ถึง 900 องศาเซลเซียส เพื่อดูอุณหภูมิที่เหมาะสมในการก่อให้เกิดซิงค์ออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงคือ อุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซึ่งที่อุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส ยังทำให้ได้ขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กมากที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่น ในส่วนของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้นสังกะสีเป็นซิงค์อะซิเตรต และซิงค์ไนเตรต ทำปฏิกิริยากับตัวตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้ความดันและอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจะศึกษาถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์แต่ละเงื่อนไข โดยผลที่ได้จากการศึกษา ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และการประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยการผสมบดย่อยมีความบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป และเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด
2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการบดผสมย่อยจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (nanoparticles)
3. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลมีความบริสุทธิ์ในเงื่อนไขในการสังเคราะห์ทุกเงื่อนไข
4. การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลพบว่าเงื่อนไขที่ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากที่สุดคือ ซิงค์ไนเตรตทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. อิทธิพลของชนิดตัวตกตะกอนในเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาสำหรับสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้มีลักษณะรูปร่างเป็นปริซึมฐานหกเหลี่ยม (nanorods) โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้มีลักษณะรูปร่างคล้ายดาวสามแฉก (three-pointed star symbolic of nanoparticles) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะรูปร่างคล้ายดัมเบล (dumbbell-shaped nanorods) ในส่วนสารตั้งต้นซิงค์ไนเตรด นั้น โพลีเทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้อนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นๆ (nanosheets) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ทำให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นดัมเบล

6. สมบัติทางชีวภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งอนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยการบดผสมย่อยและเทคนิคไฮเทอร์มอล โดยเงื่อนไขที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือเงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้สารตั้งต้นทั้งสองชนิดทำปฏิกิริยากับตัวตกตะกอนโพลีเทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ

- 5.1.1 ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกัน
- 5.1.2 ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของชนิดตัวตกตะกอนแตกต่างกัน



บรรณานุกรม

- [1] B. Subhash and et al., "ZnO nanoparticles: a green efficient catalyst for the room temperature synthesis of biologically active 2-aryl-1,3-benzothiazole and 1,3-benzoxazole derivatives" p. 1, 2014.
- [2] S.-G. Javad and et al., "Zinc oxide nanoparticles: A highly efficient and readily recyclable catalyst for the synthesis of xanthenes" 2012.
- [3] J. Eue-Soon and et al., "Antibacterial mechanism of ZnO nanoparticles underdark conditions" *ELSEVIER*, pp. 430-431.
- [4] B. D. Aleksandra and e. al., "Optical Properties of ZnO Nanostructures" *small*, pp. 945-948, 2006.
- [5] S. Amna and et al., "Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism" *Nano-Micro*, pp. 220-227, 2015.
- [6] S. K. Surabhi and et al., "Synthesis, characterization and optical properties of zinc oxide nanoparticles" *International nano*, pp. 2-3, 2013.
- [7] L. J. Xie and et al., "Propability of Zinc Oxide" pp. 5-7.
- [8] S. P. Pramod and et al., "Effect of hydroxide anion generating agents on growth and properties of ZnO nanorod arrays" *ELSEVIER*, p. 387, 2014.
- [9] ดร.ศุภมาส ตำนวิททยากุล, "ซิงค์ออกไซด์วัสดุอเนกประสงค์" *M.T.E.C*, pp. 14-16, เมษายน-มิถุนายน 2556.
- [10] C. Ho and et al., "SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOPARTICLES HAVING PRISM SHAPE BY A NOVEL GAS CONDENSATION PROCESS" *Advanced Study Center*, pp. 734-737, 2008.
- [11] X. Jingzhe and et al., "A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles" *SCIENTIFIC REPORTS*, 2014.
- [12] A. Weiqin and et al., "Mechanochemical synthesis of zinc oxide nanocrystalline" *ELSEVIER*, pp. 149-150, 2006.
- [13] C. Mogens and et al., "Size and Morphology Dependence of ZnO Nanoparticles Synthesized by a Fast Continuous Flow Hydrothermal Method" *CRYSTAL GROWTH&DESIGN*, pp. 4027-4030, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Z. Peixin and et al., "Synthesis of morphology-controlled ZnO microstructures via a microwave-assisted hydrothermal method and their gas-sensing property" *ELSEVIER*, pp. 1337-1340, 2013.
- [15] J. Eue-Soon and et al., "Antibacterial mechanism of ZnO nanoparticles under dark conditions" *ELSEVIER*, pp. 430-437, 2017.
- [16] M. Melendrez and et al., "Estimation of the surface interaction mechanism of ZnO nanoparticles modified with organosilane groups by Raman Spectroscopy" *ELSEVIER*, pp. 11838-11840, 2017.
- [17] S. Murugesan and et al., "Raman and Photoluminescence Studies of Ag and Fe-doped ZnO Nanoparticles" *Chem Tech Research*, 2015.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ภูมิพันธ์ จันทร์สา
วัน เดือน ปีเกิด 7 กันยายน 2538
ที่อยู่ 62/90 ซอยสายไหม48(หมู่บ้านชวนชม) แขวงสายไหม เขตสายไหม
จังหวัดกรุงเทพ 12150
ประวัติการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนประเทืองทิพย์วิทยาจังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนประเทืองทิพย์วิทยาจังหวัดกรุงเทพมหานคร

แผนการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ พ.ศ. 2556

ระดับชั้นปริญญาตรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้