

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ระดับนาโน
ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม

SYNTHESIS OF NANOSCALE MULTI-FUNCTIONAL COMPOUND
OF Zn-Cu-O BY CO-PRECIPITATION METHOD



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 132354
วัน,เดือน,ปี. 1.7...ก.ค...2557

b. 12619404
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-NT-M-001-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS OF NANOSCALE MULTI-FUNCTIONAL COMPOUND
OF Zn-Cu-O BY CO-PRECIPITATION METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER DEGREE OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2014

KMITL-2014-NT-M-001-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยวิธีตกตะกอนร่วม
Thesis Title Synthesis of Nanoscale Multi-functional Compound of Zn-Cu-O by Co-precipitation Method
นักศึกษา นางสาวกัญต์กนิษฐ์ ผิวแดง
รหัสประจำตัว 55670203
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMIFL-2014-NT-M-001-004

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร.สิรพัฒน์
รศ.ดร.วิษณุ
ผศ.ดร.สุธี
ผศ.ดร.รัชภาคย์

ประทีนเทพ
เพชรภา
ชุตินไพจิตร
จิตต์อารี

ลายมือชื่อ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 13.30 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร ชั้น 1 ห้องประชุมนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังรับรองแล้ว


(ศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว)

คณบดี

วันที่...๒๖... เดือน...พฤษภาคม...พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยวิธีตกตะกอนร่วม

นักศึกษา

นางสาวกัญต์กนิษฐ์ ผิวแดง

รหัสประจำตัว

55670203

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2557

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่การสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในระดับนาโนด้วยวิธีตกตะกอนร่วม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในหลากหลายหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ให้มากยิ่งขึ้น ภายใต้การสังเคราะห์จากสารตั้งต้นซิงค์คลอไรด์และคอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต และทำการศึกษาอัตราส่วนของซิงค์ : คอปเปอร์ในปริมาณ 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 และ 50 : 50 ตามลำดับ นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ตัวอย่างที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างและพื้นผิวผลึกของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ และคอปเปอร์ออกไซด์แสดงโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิก และจากผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าลักษณะของรูปร่าง มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณอัตราส่วนของซิงค์และคอปเปอร์เปลี่ยนไป จากนั้นสารประกอบที่เตรียมได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B) ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ต และหลอดซีนอน(แสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตและตามองเห็น) ผลการทดลองบ่งชี้ว่า ในแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต ซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมที่ดีที่สุด และในส่วนของผลการทดสอบภายใต้การใช้หลอดซีนอนกระตุ้น พบว่าเมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ลงไปในซิงค์ออกไซด์พบว่าให้ผลของการย่อยสลายสีย้อมดีขึ้น และในอัตราส่วนการผสม 1 เปอร์เซ็นต์มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมสูงที่สุด จากนั้นนำซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่ได้ไปใช้เป็นวัสดุยับยั้งเชื้อราด้วยวิธีการแพร่แบบเจลจาง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาณอัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 70 : 30 คือปริมาณอัตราส่วนที่สามารถทำให้เชื้อรา ชนิด *Trichoderma spp* เจริญเติบโตได้น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ และสุดท้ายซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุขั้วทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งผลที่ได้บ่งชี้ว่าที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ 99 : 1 ให้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด

เอกคำสำคัญ : ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์, กระบวนการตกตะกอนร่วม, สารประกอบหลายหน้าที่, ขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Nanoscale Multi-functional Compound of Zn-Cu-O by Co-precipitation Method
Student	Miss Kankanit Phiw dang
Student ID	55670203
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2014
Thesis advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

ABSTRACT

This thesis focuses on the synthesis of Zn-Cu-O nanoscale multi-functional compounds via the co-precipitation method to enhance their functionality with both ZnO and CuO using $ZnCl_2$ and $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ as starting materials. The molar ratio of Zn:Cu were designated 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 and 50 : 50, followed by calcinations process at 500 °C for 2 h to obtain Zn-Cu-O compounds. The structures and morphologies of the compounds were analyzed using X-ray diffraction (XRD) and monitored by scanning electron microscopy (SEM). The results indicate the formation of hexagonal wurtzite of zinc oxide phase and monoclinic phase of copper oxide in the compounds. The results show that the structure and morphologies of the compounds significantly vary with Zn:Cu ratio. The synthesized compounds were utilized as photocatalysts for degradation of Rhodamine B dye solution under both ultraviolet (UV lamp) and Xenon lamp irradiation. The results show that pure ZnO compound possesses better activity than the others while the compound with Zn:Cu ratio of 99:1 has a superior photocatalytic performance under visible light activation. The compounds were used for antifungal activity via agar dilution method. It is found that the compound with certain Zn:Cu ratio of 70:30 exhibits superiority in partial inhibition of strain *Trichoderma* spp. comparing to either pure CuO or ZnO. Finally, the compounds were applied as the working electrode of dye-sensitized solar cell. The results indicate that the compound with Zn:Cu ratio of 99:1 considerably enhances the performance and efficiency of the solar cell.

Keywords: Zn-Cu-O, Co-precipitation process, Multifunctional compound

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิชาญ เพชรภา สำหรับแนวทางในการทำงานวิจัยและคำแนะนำที่มีส่วนสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ตลอดจนการอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาที่ติดลตลอดมา รวมไปถึงการปลุกฝังสิ่งที่ ดึงมให้กับลูกศิษย์ทุกคน และขอขอบพระคุณวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้สถานที่ใน การทำงานวิจัยและอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญ ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มงคล เพ็ญสายใจ สำหรับคำแนะนำสั่งสอน การสนับสนุนที่ดี ตลอดจนการใช้อุปกรณ์ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ในวิทยาลัยนาโน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความรู้ รวมทั้งคำแนะนำใน การแก้ไขปัญหาต่างๆที่ผ่านเข้ามา

ขอขอบคุณบทความวิจัย หนังสือที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ข้าพเจ้าใช้ศึกษา หาความรู้เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้ความเข้าใจและแก้ไขข้อสงสัยต่างๆ

ขอขอบคุณพี่น้องในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าลาดกระบัง สำหรับคำปรึกษาที่ติดลตลอดมา

ขอขอบคุณพี่น้องๆภายในแลบ NMRL ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้ กำลังใจในยามที่ท้อแท้ และขอขอบคุณเวลาที่มิให้กันเสมอในวันที่มีปัญหาเข้ามา

สุดท้ายคุณงาม ความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้ดขอบมอบให้แก่ บิดา และ มารดาที่ข้าพเจ้าเคารพยิ่ง ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นพลังที่สำคัญแก่ข้าพเจ้า ตลอดมา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนวิชาแก่ ข้าพเจ้า

กัณฑ์กนิษฐ ฝิวแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูป.....	vii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 วัสดุนาโน.....	4
2.2 เทคโนโลยีการผลิตวัสดุระดับนาโน.....	5
2.3 สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	6
2.4 สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์.....	9
2.5 สารละลายของแข็ง (Solid solution).....	10
2.6 วัสดุผสม (Composite materials).....	12
2.7 การสังเคราะห์หอนาโนซิงค์ออกไซด์.....	14
2.8 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis Process).....	18
2.9 กระบวนการยับยั้งเชื้อรา.....	21
2.10 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC).....	25
2.11 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง.....	28
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง.....	59
3.3 สรุปแผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	
4.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไข การใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน.....	70
4.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้น ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้การเตรียม เป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์.....	76
4.4 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไข อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน.....	80
4.5 การประยุกต์ใช้งานสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการวิจัย:	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	117
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	120
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	120
เอกสารอ้างอิง.....	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของซิงค์ออกไซด์.....	7
2.2 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แฟร็กชัน.....	30
3.1 ปริมาณการเตรียมสารซิงค์ออกไซด์(ZnO) จากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน.....	61
3.2 ปริมาณการเตรียมสารซิงค์ออกไซด์(ZnO) จากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	62
3.3 ปริมาณการผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ไดไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน ต่างๆ ในน้ำปอดประจุ 100 มิลลิลิตร.....	62
4.1 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านกระบวนการเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมจากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน.....	73
4.2 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านกระบวนการเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ต่างกัน.....	77
4.3 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ หลังผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกัน ระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์.....	82
4.4 ปริมาณอัตราส่วนของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราส่วนผสม ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณอัตราส่วน ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ ที่วัดได้จากสเปกโทรการกระจายพลังงาน รังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณ.....	90
4.5 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา <i>Tichoderma</i> spp. ด้วยสารประกอบ ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน.....	103
4.6 แสดงค่าทางไฟฟ้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ เปรียบเทียบกับสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน.....	116

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	8
2.2 โครงสร้างผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์.....	10
2.3 สารละลายของแข็งแบบ Substitutional Solid Solution.....	11
2.4 สารละลายของแข็งแบบ Interstitial Solid Solution.....	12
2.5 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว.....	13
2.6 ไดอะแกรมแสดงลำดับของวิธีการสังเคราะห์ผงด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	17
2.7 ปฏิกิริยาระหว่างพลังงานจากแสงกับโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ.....	19
2.8 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวแคตาไลสต์ชนิดต่างๆ.....	19
2.9 ลักษณะเส้นใยของเชื้อราแบบมีผนังกันและไม่ผนังกัน.....	22
2.10 ลักษณะของการสร้างสปอร์ของเชื้อรา <i>Trichoderma</i> spp. ในต่อไม้สน.....	25
2.11 ส่วนประกอบ และการทำงานของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง(DSSC).....	26
2.12 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA).....	29
2.13 หลักการทำงานของเครื่องเล็ทซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	30
2.14 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM.....	32
2.15 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนและชิ้นงาน.....	33
2.16 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับเทคนิค SEM.....	34
2.17 แสดงการกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ.....	36
2.18 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง.....	37
2.19 กระบวนการเกิดการกระตุ้น.....	38
2.20 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงกับโมเลกุลของสาร.....	38
2.21 แสดงเส้นทางเดินของแสงเมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน.....	40
2.22 Electromagnetic Spectrum.....	41
2.23 โครงสร้างของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	41
2.24 Block Diagram of a Spectrophotometer.....	42
2.25 ทางเดินของรังสีใน Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว.....	43
2.26 ทางเดินของรังสีใน Spectrophotometer แบบลำแสงคู่.....	44
2.27 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยเตรียมจากสารตั้งต้นต่างชนิดกันคือ ซิงค์คลอไรด์, ซิงค์ไนเตรต, ซิงค์ซัลเฟต และซิงค์อะซิเตตามลำดับ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.28 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของ Zn^{2+} ที่ถูกปรับปรุงจากสารลดแรงตึงผิว SDS ที่ pH=8, pH=10 และ pH=12 และ (ข) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิงค์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยเตรียมจาก Zn^{2+} : SDS = 1:1 (a) pH=8, (b) pH=10, (c) pH=12 และ (d) pH=12 (ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน).....	47
2.29 (ก) ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Mg doped ZnO ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือตั้งแต่ 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอาทิตย์ภายใต้การย่อยสลาย Methylene blue โดยใช้ ZnO และ ZnO ที่ถูกเจือด้วย Mg 0.10 เปอร์เซ็นต์.....	48
2.30 (ก) ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Sn doped ZnO ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือตั้งแต่ 1,2,3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอาทิตย์ภายใต้การย่อยสลาย Methylene orange โดยใช้ ZnO และ ZnO ที่ถูกเจือด้วย Sn.....	49
2.31 ค่าคงที่การสลายตัวของ ZnO ที่เจือด้วย Cu เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการย่อยสลายสีย้อม (ก) Methylene blue และ (ข) Methyl orange ภายใต้แสงย่านตามองเห็น.....	50
2.32 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Cu-doped ZnO โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณการเจือ Cu ที่ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ตามลำดับ.....	51
2.33 (ก) ภาพถ่าย SEM และ TEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ (a) ภาพ SEM ของ ZnO-CuO (b) ภาพ TEM ของ ZnO-CuO (c) ภาพ SEM ของ ZnO และ (d) ภาพ SEM ของ CuO ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอน และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (a) ZnO, (b) CuO, (c) ZnO-CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีตกตะกอนร่วม, (d) Physical mixture ของ ZnO-CuO.....	52
2.34 บริเวณการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราโดยใช้อนุภาคนาโน ZnO (a) แบคทีเรียชนิด <i>P. aeruginosa</i> (22 มิลลิเมตร) and (b) เชื้อราชนิด <i>A. flavus</i> (19 มิลลิเมตร).....	54
2.35 บริเวณการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราโดยใช้อนุภาคนาโน CuO ละลายในสารละลาย.....	54
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (ก) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต (ข) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ค) ซิงค์คลอไรด์ (ง) คอปเปอร์คลอไรด์ ไดไฮเดรต และ (จ) โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	57
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) เครื่องกวนสาร (ข) เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (ค) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (ง) เตาอบความร้อน (จ) เตาเผา (ฉ) ตู้บ่มเชื้อ (ช) เวอร์เนีย และ (ซ) งานเพาะเชื้อชนิดพลาสติก.....	58
3.3 การตกตะกอนของซิงค์ออกไซด์	60
3.4 ขวดที่ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อในขณะที่ยังเป็นของเหลว.....	64
3.5 ขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.6 การประกอบขั้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	66
3.7 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์ออกไซด์(ZnO) จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	67
3.8 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์ออกไซด์(ZnO) จากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	68
3.9 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบโลหะออกไซด์ของซิงค์และคอปเปอร์ ในปริมาณอัตราส่วนที่แตกต่างกันด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	69
4.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารละลายตั้งต้น ซิงค์ไดไฮดรอกไซด์โดยอาศัย สมบัติทางความร้อน.....	71
4.2 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารตั้งต้นซิงค์ ไดไฮดรอกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผาที่ (ก) 200 (ข) 300 (ค) 400 และ (ง) 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	72
4.3 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารตั้งต้น (ก) ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต (ข) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต และ (ค) ซิงค์คลอไรด์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
4.4 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไข การเตรียมจากสารตั้งต้นดังนี้ (ก) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ข) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต และ (ค) ซิงค์คลอไรด์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	74
4.5 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้ (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์.....	77
4.6 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้ (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์.....	78
4.7 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมที่ต่างกัน ปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ค) 99 : 1 (ง) 95 : 5 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50.....	81
4.8 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกัน ปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

4.9 กราฟสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของ ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกัน ระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ.....	87
4.10 การวิเคราะห์พื้นระเคมีของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	92
4.11 (ภาพขยาย) การวิเคราะห์พื้นระเคมีของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้ เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก.) 70 : 30 และ (ข) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	93
4.12 กราฟการวิเคราะห์ Diffused Reflectance Spectroscopy ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ ใน ปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ค) 99 : 1 และ (ง) 90 : 10 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	94
4.13 การวิเคราะห์แถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการ เปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ.) 95 : 5 และ (ฉ) 90 : 10ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	96
4.14 แบบจำลองแถบพลังงานต้องห้ามของนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์.....	99
4.15 กราฟความสัมพันธ์ของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือคอปเปอร์ในปริมาณ 0 , 0.5 , 1 , 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	99
4.16 ภาพถ่ายอัตรการย่อยสลายสีย้อมโรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วย ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 99 : 1 ภายใต้ การฉายแสงด้วยหลอดซินอน ที่เวลาต่างๆ.....	100
4.17 ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์ คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดซินอน เป็นเวลา 180 นาที.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.18 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัวของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่าง ๆ ภายใต้ การฉายแสงจากหลอดซีนอน.....	103
4.19 ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วย ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ค.) ภายใต้การฉายแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลา 180 นาที.....	105
4.20 อัตราการสลายตัวของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลาย ด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณอัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่าง ๆ ภายใต้การฉายแสง ด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต.....	107
4.21 การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อรา Trichoderma spp. ด้วยสารประกอบ ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 15 ไมลาร์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ปริมาณดังนี้ (ก) น้ำปลอตประจุ (ข) ซิงค์ออกไซด์ (ค) คอปเปอร์ออกไซด์ (ง) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ ในอาหาร PDB และนำไปหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน.....	109
4.22 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรากับความเข้มข้นของสารประกอบ ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 ไมลาร์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่างกัน.....	112
4.23 ส่วนประกอบของเซลล์โดยใช้สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาเป็นวัสดุ ปรับปรุงชิ้นงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง.....	114
4.24 กราฟการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชิ้นงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของ ซิงค์ออกไซด์ และสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน.....	115
4.25 ภาพจำลองแสดงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของแท่งนาโน (Nanorods) และอนุภาคนาโน (Nanoparticles).....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์มากยิ่งขึ้น ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ที่ช่วยให้มนุษย์สามารถดำเนินชีวิตได้อย่างสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับเทคโนโลยีทางด้านวัสดุศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนาไปเป็นอย่างมาก โดยการใช้นาโนเทคโนโลยีเข้ามามีส่วนร่วม มีการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ๆ ขึ้นมามากมายและมีการประยุกต์ใช้งานวัสดุอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างสูงในปัจจุบันในเชิงอุตสาหกรรม และเชิงวิชาการได้แก่ วัสดุโครงสร้างนาโน คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับ 1-100 นาโนเมตร โดยการสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโน ทำให้ได้วัสดุที่มีขนาดเล็กลงแต่มีประสิทธิภาพที่โดดเด่นขึ้น สมบัติพิเศษของวัสดุเหล่านี้แสดงออกมาเมื่อขนาดของวัสดุอยู่ในขนาดนาโนเมตร อาทิเช่น โลหะเงินระดับนาโน (Nano silver) ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โลหะทองระดับนาโน (Nano gold) ที่มีสมบัติทางแสงที่โดดเด่นที่เกิดจากปรากฏการณ์ Surface Plasmon Effect [1-3] ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในหลาย ๆ ด้าน อนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพการทำงานโดยใช้แสงกระตุ้นมากขึ้นเมื่อมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง ทำให้สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น ขณะเดียวกันในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุระดับนาโนของโลหะออกไซด์อย่างแพร่หลาย สามารถเตรียมได้ง่ายและเตรียมได้ด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก มีความเสถียรภาพทางโครงสร้างและทางเคมีสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในกลุ่มของโลหะออกไซด์นั้น สารประกอบของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะมีสมบัติทางแสง ทางไฟฟ้า ทางกายภาพ ทางเคมี ที่โดดเด่นเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ตลอดจนสามารถเตรียมให้อยู่ในรูป โครงสร้างระดับนาโนที่หลากหลาย เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticle) แท่งนาโน (Nanorod) เข็มนาโน (Nanoneedle) ทรงกลมนาโน (Nanosphere) และอื่นๆ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เป็นตัวย่อยสลายสารเคมีด้วยแสง [4-5] วัสดุสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ สีย้อมไวแสง [6-7] เซลล์วัสดุสำหรับแสงอาทิตย์แบบผสม [8] วัสดุดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต [9] วัสดุตรวจจับแก๊สสารเคมี [10-11] วัสดุตรวจจับแสง [12-13] เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาที่มุ่งเน้นสร้างและสังเคราะห์วัสดุรูปแบบใหม่ที่สามารถทำงานได้หลายหน้าที่ (Multi-Functional Material) โดยอยู่ในรูปของวัสดุ แอลลอยด์ (Alloys) วัสดุผสม (Composites) หรือสารประกอบ (Compound) โดยการนำเอาสมบัติที่ดีของสารแต่ละชนิดมารวมกัน ซึ่งจะทำให้วัสดุที่สังเคราะห์ได้แสดงสมบัติที่โดดเด่นหลายประการมากขึ้น และเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น โลหะออกไซด์ของคอปเปอร์ มีสมบัติที่ดีหลายประการและเข้ากันได้ดีกับซิงค์ออกไซด์ อาทิเช่น เป็นสารกึ่งตัวนำแบบ P-type ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งยังใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และแก๊สที่เป็นพิษที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ไซยาไนด์ (Cyanide), อะซีทอลดีไฮด์ (acetaldehyde) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide; CO) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของ ZnO-CuO โดยจะมีสมบัติร่วมระหว่างซิงค์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ ทำให้ได้วัสดุใหม่ระดับนาโนที่มีสมบัติทางแสง ทาง

ไฟฟ้า ทางกายภาพ และทางชีวภาพที่ดีขึ้น และสามารถต่อยอดไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านสิ่งแวดล้อม ทางด้านพลังงาน และทางด้านชีวภาพ โดยผู้วิจัยเลือกวิธีการสังเคราะห์แบบตกตะกอนร่วม เนื่องจากเป็นการสังเคราะห์ที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ เหมาะสมกับการสังเคราะห์สารประกอบโลหะออกไซด์ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและสังเคราะห์ได้ครั้งละจำนวนมากซึ่งจะสามารถนำไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้

งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในปริมาณอัตราส่วนต่างๆกัน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้หลากหลายหน้าที่ ของซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์มากยิ่งขึ้น ภายใต้การสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม ซึ่งเป็นวิธีการที่สังเคราะห์ได้ง่าย และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ต่ำ และเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุทำงานที่สามารถทำงานได้หลายหน้าที่มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น ความเข้มข้น อัตราส่วนผสม และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อสมบัติที่สำคัญของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว สัณฐานวิทยา และสมบัติทางแสงของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 1.2.4 เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่ทำงาได้หลายหน้าที่ ที่สามารถนำไปประยุกต์ในด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและทางชีวภาพ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมระบบการสังเคราะห์แบบตกตะกอนร่วมและทำการสังเคราะห์ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 1.3.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพทางโครงสร้าง และสมบัติทางแสง ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.2.5 ศึกษาศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น ความเข้มข้น อัตราส่วนผสม และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ที่มีต่อสมบัติที่สำคัญของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.3.3 วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว สัณฐานวิทยา และสมบัติทางแสงของสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้
- 1.3.4 ทดสอบการนำซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ การยับยั้งเชื้อรา และการทำงานเป็นชั้นทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 เข้าใจถึงหลักการและวิธีการสังเคราะห์ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 1.4.2 สามารถทราบถึงสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง และสมบัติอื่นที่เกี่ยวข้องของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบตกตะกอนร่วม
- 1.4.3 สามารถทราบถึงองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทำงาน ด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม และทางชีวภาพได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโน

วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งโดยประมาณ เทียบได้กับขนาดเฉลี่ยของไวรัส หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคน ประมาณ 1,000 ถึง 100,000 เท่า ซึ่งวัสดุนาโนสามารถจัดแบ่งได้เป็นผลึกนาโน (nanocrystalline) และอนุภาคนาโน (nanoparticle) โดยที่ก้อนหรือปริมาตรของผลึกนาโนซึ่งประกอบด้วยเม็ดผลึก (grain sizes) ที่มีขนาดช่วงสเกลการวัดอยู่ในระดับนาโน ถึงประมาณ 100 นาโนเมตร แต่ขณะที่อนุภาคนาโน มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนก็คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรค่อนข้างสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ อนุภาคจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกลองลูกบาศก์ หรือ โครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่างๆ [14]

โลหะแบบก้อนใหญ่ทั่วไป จะนำไฟฟ้าได้โดยอิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานอยู่ในระดับแถบการนำ (Conduction band) แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงไปจะทำให้ฟังก์ชันคลื่นของวาเลนซ์อิเล็กตรอนเริ่มถูกกักขังในบริเวณที่จำกัด ซึ่งส่งผลทำให้ระดับชั้นพลังงานต่างๆถูกแยกออกเป็นชั้นเดี่ยวๆอย่างชัดเจน คล้ายกับระดับชั้นพลังงานของอะตอมเดี่ยว จึงทำให้โลหะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ถูกกำหนดโดยขนาดอนุภาค ทำให้วัสดุนาโนมีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างไปจากวัสดุนาโนชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่าชัดเจน สีสันก็จะแตกต่างไปจากเดิมเช่นถ้าทำให้ขนาดของทองคำเล็กลงไปเรื่อยๆก็จะเกิดปรากฏการณ์ทางแสงแบบใหม่ ที่เรียกว่า Surface Plasmon Resonance (SPR) ซึ่งจะทำให้อนุภาคทองคำนาโนดูดกลืนแสงสีเขียว (ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร) อนุภาคทองคำระดับนาโนจึงมีสีแดงทับทิม แต่ถ้าควบคุมให้มารวมตัวกันก็ทำให้เกิดเป็นสีอื่นได้อีกตั้งแต่ชมพูถึงสีม่วง ที่สามารถประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ทางชีวภาพตรวจวิเคราะห์สารต่างๆหรือนำไปใช้ทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้

สมบัติแม่เหล็กเป็นสมบัติอีกชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนไปเมื่อวัสดุมีขนาดเล็ก ในระดับนาโนเมตร เช่น อะลูมิเนียมปกติไม่มีสมบัติเชิงแม่เหล็ก แต่ถ้าเป็นกลุ่มก้อนอะตอม 13 อะตอม ที่มีขนาด 1 นาโนเมตรกลับมีสภาพเป็นสารแม่เหล็ก สมบัติเหล่านี้มีประโยชน์มากต่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เช่นหน่วยเก็บความจำ อนุภาคนาโนเมตรยังช่วยส่งเสริมทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี แสง การเคลือบผิวนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเงิน จะช่วยทำให้สมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ นอกจากนี้วัสดุโลหะและเซรามิกที่มีเกรนระดับนาโนเมตร จะมีความแข็งแรง ความทนทานต่อการแตกหักสูงกว่า มีความจุความร้อนมากขึ้น เซรามิก และสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่มี โครงสร้างผลึกในระดับนาโนเมตรจะมีความเหนียวมากขึ้น [15,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 มิติทางกายภาพถูกจำกัดขนาด

วัสดุและโครงสร้างนาโนจัดเป็นวัสดุและโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (low-dimensional system) เนื่องจากมิติทางกายภาพของวัสดุและโครงสร้างนาโนดังกล่าวมีมิติอย่างน้อยหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดระหว่าง 1-100 นาโนเมตรเท่านั้น การจำกัดขนาดวัสดุดังกล่าวส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ภายในวัสดุและโครงสร้างนาโนแตกต่างไปจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่

วัสดุและโครงสร้างนาโนสามารถจำแนกได้ 3 ระบบ ตามมิติทางกายภาพได้แก่

- ระบบศูนย์มิติ [zero-dimensional (0D) system]

วัสดุและโครงสร้างนาโนที่ถูกจำแนกในระบบนี้ต้องมีมิติทางกายภาพทั้ง 3 มิติ ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงคอลลอยด์และไททาเนียมออกไซด์ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม เป็นต้น

- ระบบหนึ่งมิติ [one-dimensional (1D) system]

วัสดุและโครงสร้างที่ถูกจำแนกในระบบหนึ่งมิติเป็นวัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสองมิติที่มีขนาดระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ส่วนอีกหนึ่งมิติมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยมิติที่มีขนาดใหญ่อาจจะมีขนาดระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร ตัวอย่างโครงสร้างที่มีสัณฐานแบบหนึ่งมิติ เช่น แท่งนาโน (nanorod) ลวดนาโน (nanowire) และท่อนาโน (nanotube) เป็นต้น โดยลวดนาโนและท่อนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1-100 นาโนเมตร และมีความยาวของลวดหรือท่อ มากกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุและโครงสร้างในระบบหนึ่งมิติมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) อย่างชัดเจน การเกิดรูปร่างแบบนี้สามารถทำนายได้ อย่างคร่าวๆ จากอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมาก วัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีรูปร่างอนุภาคเป็นลวดนาโนหรือท่อนาโนมากกว่าที่จะเป็นแท่งนาโน

- ระบบสองมิติ [two-dimension (2D) system]

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

2.2 เทคโนโลยีการผลิตวัสดุระดับนาโน

กระบวนการเตรียมหรือสังเคราะห์วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเตรียมอนุภาคหรือวัสดุต่างๆ ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนสามารถจำแนกได้ 2 แนวทางหลักๆ ได้แก่ กระบวนการจากบนลงล่าง (top-down approach) และกระบวนการจากล่างขึ้นบน (bottom-up approach)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 กระบวนการจากบนลงล่าง (top-down approach)

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างเป็นกระบวนการทำให้วัสดุที่มีขนาดใหญ่แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรสำหรับวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบดธรรมดา (conventional ball mill) และการบดด้วยพลังงานสูง

2.2.2 กระบวนการจากล่างขึ้นบน (bottom-up approach)

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากล่างขึ้นบนเป็นการทำให้วัสดุที่มีขนาดเล็กๆ ในระดับอะตอมหรือโมเลกุลรวมตัวกันกลายเป็นวัสดุหรืออนุภาคขนาดใหญ่ วิธีที่นิยมใช้เตรียมอนุภาคนาโน เช่น กระบวนการโซล-เจล (sol-gel) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) และการตกตะกอน (precipitation) เป็นต้น

การเตรียมวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนด้วยกระบวนการจากบนลงล่างและกระบวนการจากล่างขึ้นบนนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรและมีคุณภาพสูง โดยทั่วไปลักษณะของอนุภาคที่ต้องการมีลักษณะต่างๆ ดังนี้

- 1) อนุภาคต้องมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร
- 2) อนุภาคต้องมีขนาดเท่ากันทั้งหมด (monosize) และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ (monodisperse)
- 3) อนุภาคต้องมีรูปร่างและรูปทรงทางเรขาคณิตเหมือนกัน
- 4) อนุภาคมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน
- 5) อนุภาคต้องไม่รวมตัวกัน

2.3 สมบัติของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ และสามารถเตรียมให้บริสุทธิ์ได้ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์มีช่องว่างแถบพลังงาน (band-gap energy) ที่อุณหภูมิห้องกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นสารที่มีสมบัติพิเศษทางแสง โดยเรืองแสงได้ที่ความยาวคลื่นสั้นในช่วงแสงสีเขียวถึงฟ้า ลักษณะที่สำคัญของโครงสร้างเวอริตไซต์ (wurtzite) คือ เป็นโครงสร้างสมมาตรที่ไม่มีอะตอมกลางและลักษณะผิวมีขั้ว โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) $a = 0.3296$ และ $c = 0.52065$ nm โครงสร้างออกไซด์ เกิดจากการยึดเกาะกันของอะตอมโลหะ (ประจุบวก) กับอะตอมออกซิเจน (ประจุลบ) ด้วยพันธะไอออนิก โดยอะตอมออกซิเจนเรียงตัวยึดกันแน่นชิดมากที่สุดแบบ hexagonal close packing เกิดช่องว่างเตตระฮีดรอล (tetrahedral hole) โดยมีอะตอมของโลหะแทรกอยู่ในช่องว่างเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องที่มีอยู่ทั้งหมดหรือแบบ hole เว้น hole ซึ่งในโครงสร้าง wurtzite ของ ZnO ประกอบไปด้วยไอออนบวก (Zn^{2+}) จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับไอออนลบ (O^{2-}) และไอออนชนิดหนึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้ามเป็นแบบเตตระฮีดรอล [17] ซึ่งสำหรับสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์แสดงได้ดังตารางที่

เอก 2-1 นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

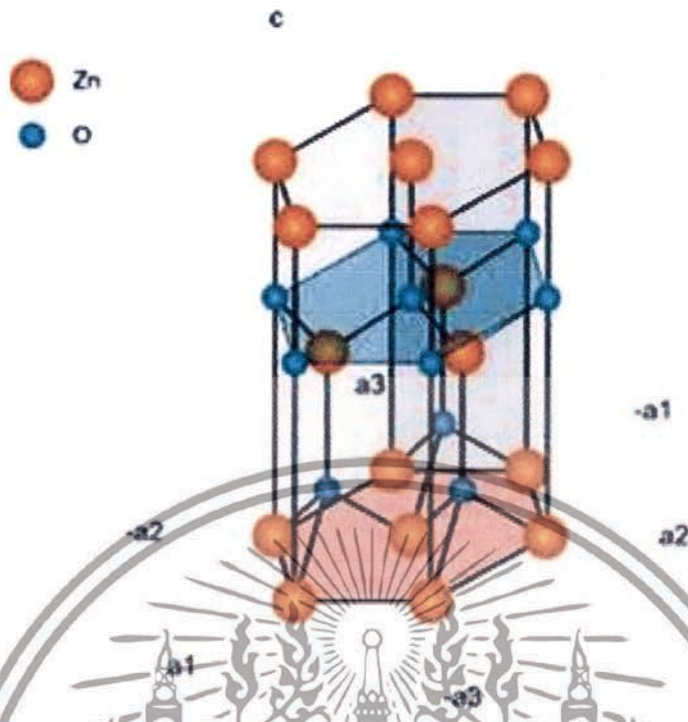
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพทั่วไป ของซิงค์ออกไซด์ [18]

ชื่อ	ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) หรือ ซิงค์ (II) ออกไซด์ (zinc (II) oxide) หรือ ซิงค์ไวท์ (zinc white)
สูตรโมเลกุล	ZnO
ลักษณะและสี	ผงสีขาว หรือขาวเหลือง
น้ำหนักโมเลกุล	81.389
ความหนาแน่น	5.606 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้อง	5.642 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ดัชนีหักเห	2.008 , 2.029
จุดหลอมเหลว (melting point)	ระเหิดที่ 1800 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (boiling point)	2248 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (specific heat)	0.125 cal/g
pH	6.95
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์
การดูดกลืนรังสี	รังสีที่อยู่ในย่านของรังสียูวีแทบทั้งหมดซึ่งมีความยาวต่ำกว่า 360 นาโนเมตร

2.3.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

โครงสร้างผลึกโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบเวอร์ตไซด์ (wurtzite) โดยมีผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) อนุภาคของซิงค์ออกไซด์อาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม รูปเข็ม (acicular) หรือเป็นก้อนกลม (nodular) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์ โดยมีโครงสร้างผลึกดังรูป 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ [18]

เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้าง มีค่าพลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป จึงมีประสิทธิภาพสูงมากในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิต่ำ จึงสามารถประยุกต์ใช้งานในอุณหภูมิที่สูง ต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำที่ไม่ใช่แถบพลังงานกว้าง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นตามสมการดังนี้

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

หรือเมื่อต้องการเป็นหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์และ λ เป็นหน่วยนาโนเมตร

$$E_g (\text{ineV}) = \frac{1240}{\lambda (\text{in nm})} \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- E_g คือ พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน
 - c คือ ความเร็วแสง
 - h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 - λ คือ ค่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา

จากสมการจะเห็นได้ว่า สารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้าง จะเปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงสีฟ้า เป็นต้น ซึ่งสารซิงค์ออกไซด์จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ทำให้เปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นสั้น ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นที่นิยมนำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน (light emitting diodes ; LED) , ไดโอดเลเซอร์ (laser diodes) และตัวตรวจจับแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet photodetector) เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นแล้วซิงออกไซด์ยังมีลักษณะโครงสร้างนาโนหลายรูปแบบ เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticle) แท่งนาโน (Nanorod) เข็มนาโน (Nanoneedle) ทรงกลมนาโน (Nanosphere) เป็นต้น โครงสร้างนาโนแต่ละรูปแบบก็จะมีคุณสมบัติที่น่าสนใจให้มีการศึกษาและการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้งานนาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ ใช้สำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในทางทันตกรรม ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับคนโดยตรงคือเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งครีมกันแดดที่เริ่มนิยมนำซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโนมาใช้เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากมีระดับความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ในระดับเดียวกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ขนาดใหญ่กว่านาโน แต่ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดของครีมกันแดดที่มีอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบ คือการส่งผ่านแสงได้ดีกว่า ทำให้ไม่ทิ้งร่องรอยให้เห็นเป็นสีขาวอย่างชัดเจนบนผิวเมื่อเทียบกับครีมกันแดดที่ใช้อนุภาคขนาดใหญ่ จากเหตุที่ซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจในการใช้ประโยชน์มากขึ้น ทำให้เกิดการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ตามมาคือการศึกษาด้านความเป็นพิษของนาโนซิงค์ออกไซด์ ในแง่มุมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านสิ่งแวดล้อมหรือด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

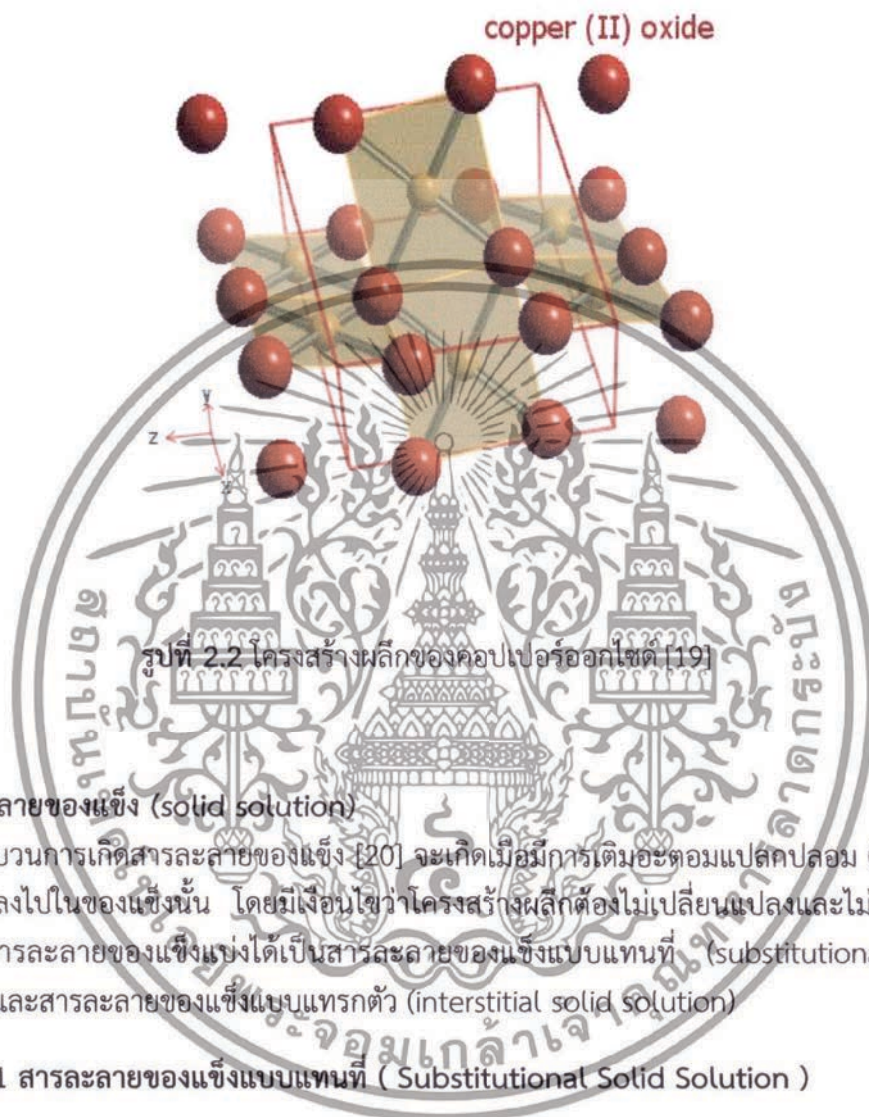
นอกจากนั้นแล้ว ซิงค์ออกไซด์เมื่อถูกเจือด้วยสารบางชนิด เช่น อะลูมิเนียม (Al) ทองแดง (Cu) และเงิน (Ag) สมบัติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งการเจือจะทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนไป ส่งผลให้สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็กเปลี่ยนไปได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือหรือผสมด้วยคอปเปอร์โดยวิธีตกตะกอนร่วมให้อยู่ในรูปของสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่สามารถทำงานหลากหลายหน้าที่มากยิ่งขึ้น

2.4 สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์

ทองแดงหรือคอปเปอร์ (Copper ; Cu) [19] เป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้อย่างมากในปัจจุบัน เพราะมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง ดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้เป็นโลหะตัวนำที่มีราคาถูก มีจุดหลอมเหลว 1,084 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,567.2 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic), CCP (cubic close-packed) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเป็นสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ได้ 2 เฟส คือ CuO และ Cu₂O ซึ่งลักษณะและสมบัติของ CuO มีสีดำ ส่วน Cu₂O จะมีสีแดง คอปเปอร์ออกไซด์หรือเรียกว่า Copper (II) Oxide หรือ Cupric oxide มีสูตรทางเคมีว่า CuO มีลักษณะเป็นผงสีดำ คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สามารถเตรียมได้จากสารตั้งต้นที่หาได้ทั่วไปด้วยวิธีการให้ความร้อน เช่น คอปเปอร์ไนเตรต [copper (II) nitrate], คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ [copper (II) hydroxide] หรือคอปเปอร์คาร์บอเนต [copper (II) carbonate] คอปเปอร์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ monoclinic แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 และ CuO ยังมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type โดยมีแถบพลังงานแคบเท่ากับ 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และยังมีสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านเซลล์ไฟฟ้าเคมีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงได้มีการนำคอปเปอร์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับแก๊ส, อุปกรณ์ทางแสง, ขั้วนำไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น รวมทั้งมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรีย



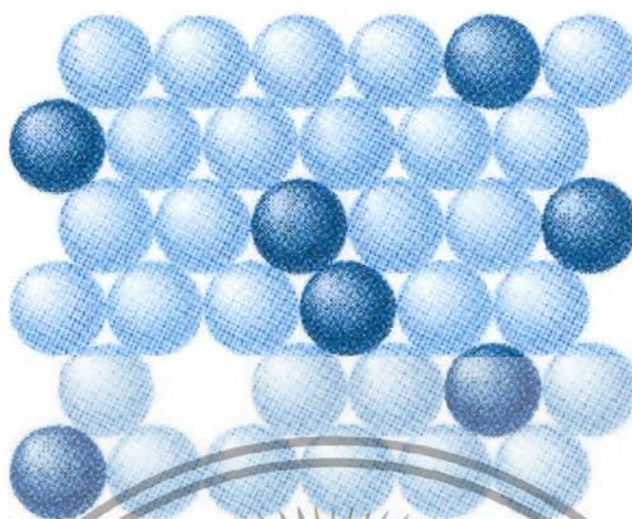
2.5 สารละลายของแข็ง (solid solution)

กระบวนการเกิดสารละลายของแข็ง [20] จะเกิดเมื่อมีการเติมอะตอมแปลกปลอม (impurity atom) ลงไปในของแข็งนั้น โดยมีเงื่อนไขว่าโครงสร้างผลึกต้องไม่เปลี่ยนแปลงและไม่มีเฟสใหม่เกิดขึ้น สารละลายของแข็งแบ่งได้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทนที่ (substitutional solid solution) และสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (interstitial solid solution)

2.5.1 สารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution)

เกิดจากอะตอมของธาตุ 2 ชนิด คือ อะตอมของตัวถูกละลาย (Solute atoms) สามารถเข้าไปแทนที่อะตอมของตัวทำละลาย (Solvent atoms) ในโครงสร้างผลึกได้ ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของโลหะผสมชนิดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อาจเกิดการเสียรูปไปบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดของอะตอมต่างกัน ดังภาพ แสดงอะตอมของธาตุ 2 ชนิด (Cu และ Ni) โดยอะตอมทองแดงจะเข้าไปแทนที่อะตอมของนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงสารละลายของแข็งแบบ Substitutional Solid Solution [20]

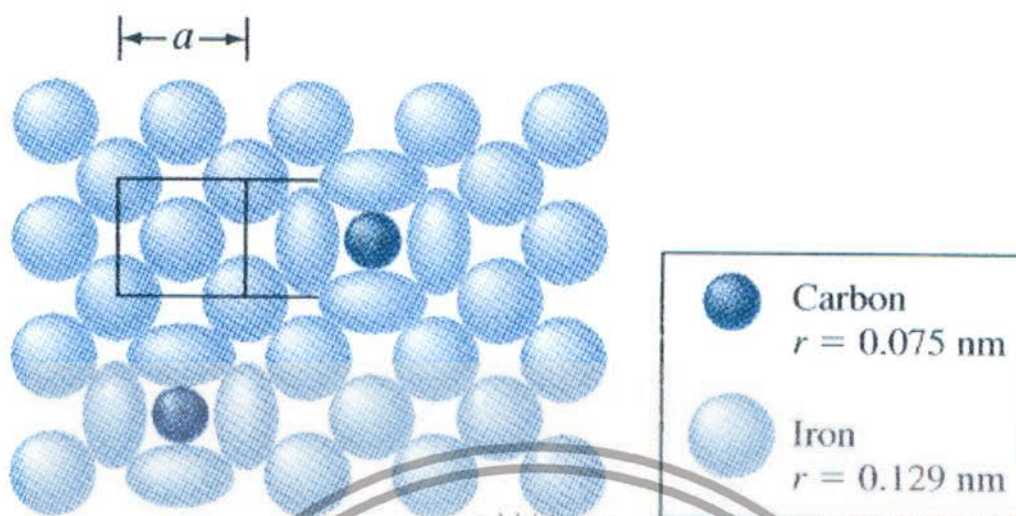
- สภาวะที่อะตอมหนึ่งจะไปแทนที่อีกอะตอมหนึ่งได้ จะต้องมึลักษณะดังนี้คือ

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมทั้งสองจะต้องไม่ต่างกันเกิน 15 เปอร์เซ็นต์
2. โครงสร้างผลึกของธาตุทั้งสองจะต้องเหมือนกัน
3. ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี หรือสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ จะต้องตรงกันไม่มากนัก มิฉะนั้นจะเกิดสารประกอบไม่ได้
4. จะต้องมึค่าเวเลนซ์เท่ากัน

2.5.2 สารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial Solid Solution)

เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของตัวถูกละลายเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างอะตอมตัวทำละลาย ช่องว่าง ระหว่างอะตอมของตัวทำละลาย ช่องว่างระหว่างอะตอมของตัวทำละลายนี้ถูกเรียกว่า ซอก (Interstices) สารละลายของแข็งเซลล์แทรก สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอะตอมของตัวทำละลายมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอะตอมของอะตอมของตัวถูกละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงสารละลายของแข็งแบบ Interstitial Solid Solution [20]

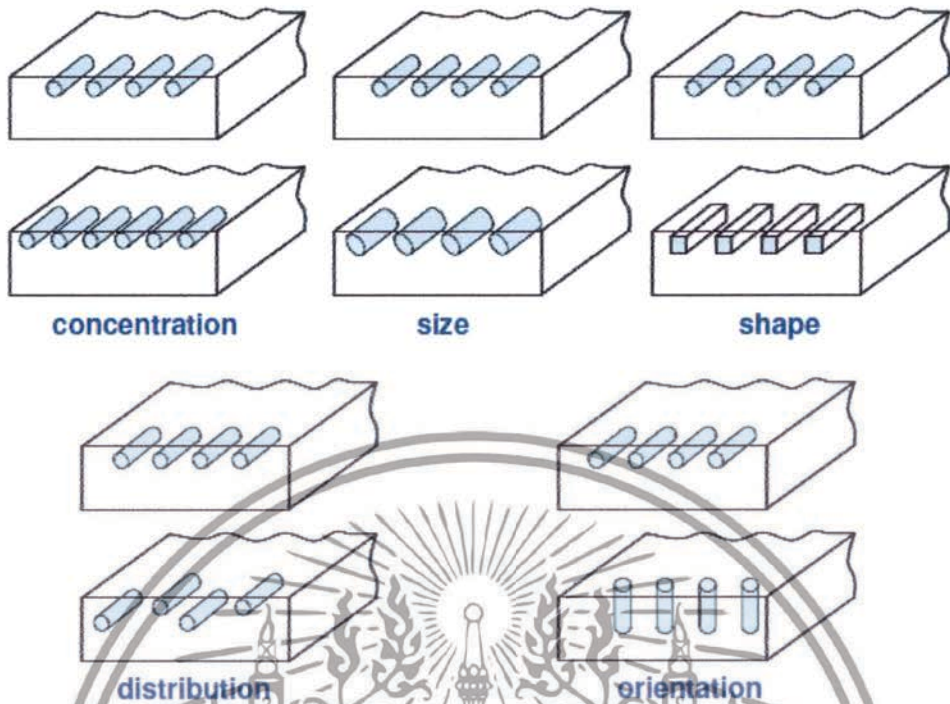
2.6 วัสดุผสม (composite materials)

วัสดุผสม หรือคอมโพสิต (composite) [21] คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้น รวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ยกตัวอย่าง คอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) หรือกระดูก ซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (apatite) กับ โปรตีนคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น

ในส่วนของคอมโพสิตสังเคราะห์นั้น จะถูกเตรียมขึ้น มาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมโพสิตที่ดีจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ รูปที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว สุดท้ายคอมโพสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ คอมโพสิตเสริมแรง ด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite), คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) และ คอมโพสิตโครงสร้าง (structural composite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว [21]

1.) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือคอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง(flake) เป็นอนุภาคกลม (particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (filler) เป็นต้น

2.) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งตึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดุลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

3.) คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite)

คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย เราสามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (sandwich panel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ [22,23] สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีซึ่งในแต่ละวิธีนั้นต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งก็แล้วแต่ว่าผู้ทำการวิจัยจะเลือกเอาข้อดีและข้อเสียนั้นๆ มาปรับใช้ในงานวิจัยได้อย่างไร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาพอสังเขปดังนี้

2.7.1 วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method)

วิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ผง ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่น คือ มีความสม่ำเสมอทั้งองค์ประกอบทางเคมีและขนาดของอนุภาค เทคนิคนี้จะมีการให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาพวกเกลือของโลหะออกไซด์ ไฮดรอกไซด์หรือผงโลหะต่างๆที่อยู่ในรูปของสารละลาย หรือสารแขวนลอย (ปกติจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) ด้วยอุณหภูมิและความดันที่สูง ซึ่งการตกตะกอนภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ จะทำให้เกิดผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก มีการกระจายตัวของอนุภาคน้อย มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดี แต่การสังเคราะห์สารด้วยวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันที่สูง ความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วง 20 เมกะปาสคาล การสังเคราะห์ผงโดยวิธีนี้จะต้องมีการควบคุมค่า pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากันในหม้อนิ่งอัดไอ (autoclave) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ตามความต้องการ โดยปกติแล้วจะมีการบุผนังภายในของหม้อนิ่งอัดไอ (autoclave) ด้วยพลาสติก เช่น เทฟลอน (teflon) เพื่อลดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของผนังหม้อจากสารละลาย ผงที่สังเคราะห์ได้อาจจะเป็นแบบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันก็ได้ ซึ่งจะมีขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายตั้งต้นจะเกิดการสูญเสียส่วนที่เป็นของเหลวโดยการระเหยออกไป และจะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) จากนั้นก็จะเกิดนิวเคลียสขึ้นและเติบโตตามมา ในกรณีที่อัตราการเกิดนิวเคลียส (nucleation rate) เป็นไปอย่างรวดเร็วแต่อัตราการเติบโต (growth rate) ช้า ผงที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและละเอียดมาก

2.7.2 วิธีโซล - เจล (Sol-gel method)

การสังเคราะห์ผงโดยวิธีโซล - เจล เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากสามารถเตรียมในที่อุณหภูมิไม่สูงมาก เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้หาง่าย และราคาไม่แพง เช่น น้ำ และ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้สารตั้งต้นที่ถูกลมผสมเข้ากันเป็นอย่างดีนั้น สามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุลจึงทำให้ผงที่สังเคราะห์ได้มีอนุภาคขนาดเล็กและละเอียดมาก พื้นที่ผิวสัมผัสมาก มีความบริสุทธิ์สูง และสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล ซึ่งการสังเคราะห์ผงด้วยวิธีนี้ทำได้โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นสารละลายมาผสมกันในปริมาณที่เหมาะสม แล้วทำให้อนุภาคนั้นมีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในขั้นนี้จะเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในของเหลวเรียกว่า โซล (sol) หลังจากนั้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการระเหยของของเหลวบางส่วน จะเกิดการเหนียวทำให้เกิดการสร้างพันธะที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายต่อเนื่องในสามมิติ ซึ่งตัวสารละลายจะมีความหนืดมากขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นสารกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เรียกว่า เจล (gel) ขั้นตอนการเกิดเจลจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาการสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) และ

เอกลิงคิงเป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ในการใช้ข้อมูลการวิจัยในขั้นต้น ข้อมูลนี้สงวนลิขสิทธิ์และสงวนการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) จากนั้นนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งโดยการอบและบดให้เป็นผง แล้วนำไปแคลไซน์ในอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป

2.7.3 วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

เป็นวิธีที่นิยมให้กันมากเนื่องจากเตรียมได้ง่าย โดยเริ่มจากการนำเอาสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็งตามปริมาณที่ต้องการมาบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่องบดจากนั้นนำไปอบให้แห้ง และเผาตามอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อเสียคือ ผลผลิตที่ได้มักจะมีความบริสุทธิ์ต่ำเนื่องจากมีสารประกอบอื่นเจือปนจากสารตั้งต้นหรืออาจเกิดจากชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการบด ได้สารที่มีเนื้อสารที่หยาบและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อสมบัติต่างๆของสารที่ต้องการเตรียม การเตรียมผงจากวิธีปฏิกิริยาของแข็งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่ผงที่สังเคราะห์ได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้ต้องมีการบดย่อยลดขนาดซึ่งต้องมีการใช้ลูกบดเพื่อทำการบดลดขนาด ยิ่งทำให้ผงถูกปนเปื้อนมากขึ้น นอกจากนั้นการบดย่อยลดขนาดก็จะทำให้ไม่สามารถควบคุมรูปร่างของอนุภาคที่เตรียมได้

2.7.4 วิธีการอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning)

เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความสนใจอย่างยิ่งในการผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กตั้งแต่ระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร โดยหลักการเทคนิคนี้อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ละลายเข้มข้นออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor’s cone) เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ จะเกิดแรงขับดันให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีประจุพุ่งออกมาเป็นสาย ตกลงสู่แผ่นรองรับที่มีประจุตรงกันข้าม และในระหว่างการเคลื่อนที่ลงสู่แผ่นรองรับ เกิดการระเหยของตัวทำละลาย ทำให้ได้เป็นเส้นใยขนาดเล็กจากกลไกดังกล่าว เครื่องอิเล็กโตรสปินนิงจึงมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง 2) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะขนาดเล็ก และ 3) วัสดุรองรับที่เป็นโลหะ ทั้งนี้ลักษณะของแผ่นรองรับมีหลายรูปแบบสำหรับการผลิตเส้นใยลักษณะต่างๆ เช่น แผ่นรองรับแบบวงล้อเคลื่อนที่สำหรับใช้ผลิตเส้นใยแบบขนาน (Aligned fibers) และแผ่นรองรับแบบระนาบไม่เคลื่อนที่สำหรับใช้ผลิตเส้นใยแบบไม่ถักทอ (Non-woven fibers) สำหรับเส้นใยที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง มีสมบัติที่เด่นชัด คือ 1) เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานาโนเมตรจนถึงประมาณ 1-2 ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่า เส้นใยนาโน (Nanofibers) หรือ เส้นใยนาโนอิเล็กโตรสปิน (Electrospun nanofibers) 2) โครงร่างจากเส้นใยที่ได้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูงมากกว่า 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยในระดับไมโครเมตร และ 3) โครงร่างจากเส้นใยนาโนที่ได้ มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของเหลวและแก๊สได้ดีจากสมบัติดังกล่าว ทำให้เส้นใยอิเล็กโตรสปินนิงได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แม้ว่าพอลิเมอร์จากธรรมชาติจะมีข้อดี ที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่มักทำบริสุทธิ์ได้ยาก มีราคาสูง และผลิตเส้นใยที่มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ พอลิเมอร์สังเคราะห์หลายชนิดจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากมีราคาต่ำ ทำได้ง่าย ทำให้ได้เส้นใยที่ลักษณะ สม่ำเสมอ และมีคุณภาพคงที่ในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุกครั้ง แม้ว่าการผลิตเส้นนาโนอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนนัก แต่เนื่องจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้มีการศึกษาเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศค่อนข้างจำกัด

2.7.5 วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

การตกตะกอน เป็นการให้โมเลกุลหรือไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายแยกตัวออกมาจากสารละลายอย่างช้าๆ โดยอาศัยปริมาณสารเคมีที่พอเหมาะที่เรียกว่าตัวตกตะกอน (precipitant) หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน เพื่อทำให้ความสามารถในการละลายของระบบลดลงจึงทำให้เกิดการตกตะกอนของระบบขึ้นได้ สิ่งส่งผลต่อผลลัพธ์ของการตกตะกอนในสมดุเคมี ได้แก่ ธรรมชาติของการตกตะกอน ความบริสุทธิ์ของสาร อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่า pH และ อัตราส่วนในการผสมสามารถทำการตกตะกอนได้ทั้งกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ส่วนสารที่ตกตะกอนได้นี้จะมีความเหมาะสมหรือไม่เพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่อไป

1) สารนั้นต้องมีการละลายต่ำ (low solubility) เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์และไม่เกิดการสูญเสียตะกอนในขณะที่ล้างตะกอน

2) สารที่ตกตะกอนได้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง

3) ตะกอนที่ได้ต้องมีขนาดพอเหมาะเพื่อที่จะสามารถกรองออกได้ง่าย

4) สารที่ตกตะกอนได้ต้องไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีขณะทำให้แห้งหรือขณะเผา และสารที่เตรียมได้ต้องส่วนประกอบที่แน่นอน

สำหรับการเตรียมสารนั้น ต้องใช้สารที่มีสมบัติของการแยกตัวเป็นไอออนและการรวมตัวเพื่อเกิดสารใหม่ นั่นคือสารตัวหนึ่งต้องเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และสารอีกตัวหนึ่งต้องเป็นตัวรับอิเล็กตรอน จากนั้นจึงนำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งแล้วนำไปเผา ซึ่งการทำดังกล่าวนี้ทำให้ได้ผลละเอียดที่มีความสม่ำเสมอของเนื้อสาร การตกตะกอนประกอบกลไกที่สำคัญดังนี้

1) สารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง (supersaturation) เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นได้โดยที่ สารละลายอิ่มตัวยวดยิ่งนี้เป็นสารละลายที่เกิดจากการตกตะกอนละลายเข้าไปอยู่ในวัฏภาคที่เป็นของเหลว จนความเข้มข้นของสารที่เป็นตะกอนมากกว่าความเข้มข้นของสารนั้นที่อยู่ในสภาวะสมดุล สารละลายนี้จะมีค่าอิ่มตัวยวดยิ่งสัมพัทธ์มากขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของทั้งสองปริมาณนี้แตกต่างกันมากขึ้น

2) การเกิดนิวเคลียส (nucleation) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจากสารละลายที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยวดยวด โดยเริ่มเกิดจากไอออนหรือโมเลกุลที่น้อยที่สุดรวมตัวกันจนเกิดเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของวัฏภาคที่เป็นตะกอนของแข็ง

3) การเจริญเติบโตของผลึก (crystal growth) หลังจากขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสโดยไอออนต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของอะตอมจะมาจับเกาะกันบนผิวของอนุภาคที่เล็กที่สุดจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้นิวเคลียสมีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ แล้วจึงรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าแยกตัวออกจากสารละลาย

เทคนิคการตกตะกอนร่วมนั้นเริ่มจากการผสมสารละลายของพวกโลหะที่เป็นเกลือกับสารช่วยให้ตกตะกอน (precipitation agent) ได้แก่ กรดออกซาลิก กรดซิตริกหรือพวกกรดอินทรีย์อื่นๆ การคำนวณว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นพวกที่มีความสามารถในการละลายต่ำเป็นสมบัติสำคัญ ในระหว่างการตกตะกอนร่วมนั้น ลักษณะของการตกตะกอนที่อาจเป็นไปได้มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ การตกตะกอนร่วมแท้ (true precipitation) ซึ่งเป็นการตกตะกอนของสารผสมระหว่างโลหะของสารตั้งต้นที่เป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์เคมี (chemical stoichiometry) และการตกตะกอนร่วมที่มีการจับก้อนในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นการตกตะกอนที่เกิดจากการจับก้อนกันของกระจุกตะกอนที่เกิดจากอนุภาคต่างพวกกัน การตกตะกอนจะเกิดแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายที่ใช้ ปัญหาทั่วไปที่มักพบในการตกตะกอนร่วม คือ การที่ตัวทำปฏิกิริยาต่างชนิดกันในสารละลาย มีอัตราการตกตะกอนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของสารที่ตกตะกอนไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตกตะกอนให้เหมาะสม การควบคุมการตกตะกอนสามารถทำได้โดยการควบคุมอัตราการผสมกัน อุณหภูมิของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ความเป็นกรด - เบส และอัตราการคนสารละลายให้เข้ากันเป็นต้น กลไกของการตกตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแสดงลำดับของวิธีการสังเคราะห์ผงด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการสังเคราะห์แบบตกตะกอนร่วม เนื่องจากเป็นการสังเคราะห์ที่ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ต้นทุนต่ำ ควบคุมลักษณะรูปร่างได้ เหมาะสมกับการสังเคราะห์สารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี

2.8 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis Process)

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส [24] จะเกิดขึ้นได้ จำเป็นต้องมีองค์ประกอบคือ แคตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัว เป็นต้น, พลังงาน ซึ่งอาจมาจากแสงในช่วงอุลตราไวโอเล็ต หรือแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อุลตราไวโอเล็ต, น้ำ และออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนซ์อื่น

หลักการเบื้องต้นของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย โดยสามารถนำหลักนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการบำบัดหรือทำให้น้ำ และอากาศบริสุทธิ์

2.8.1 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

1) Homogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว

2) Heterogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

2.8.2 ชนิดของตัวแคตาลิสต์

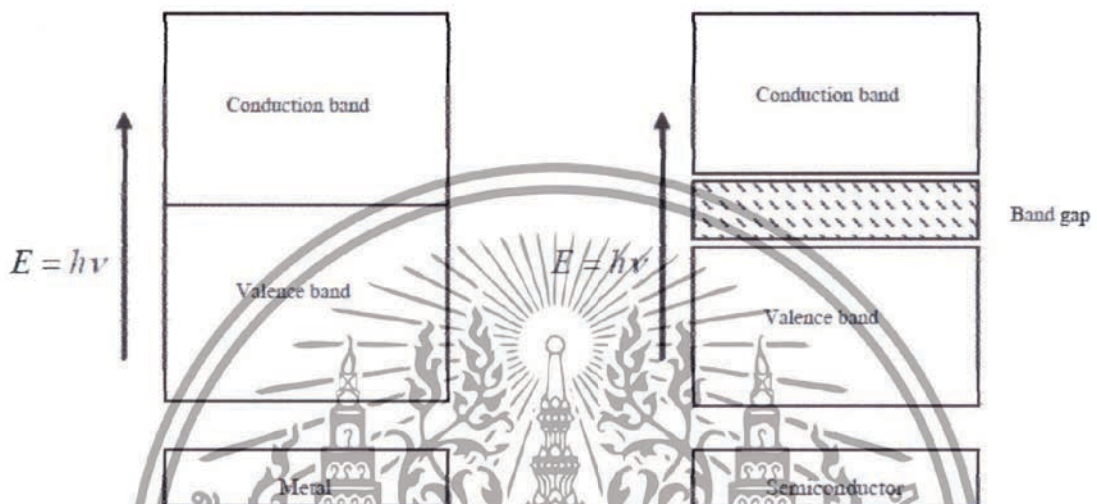
สาร 2 ชนิดที่ใช้เป็นตัวแคตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

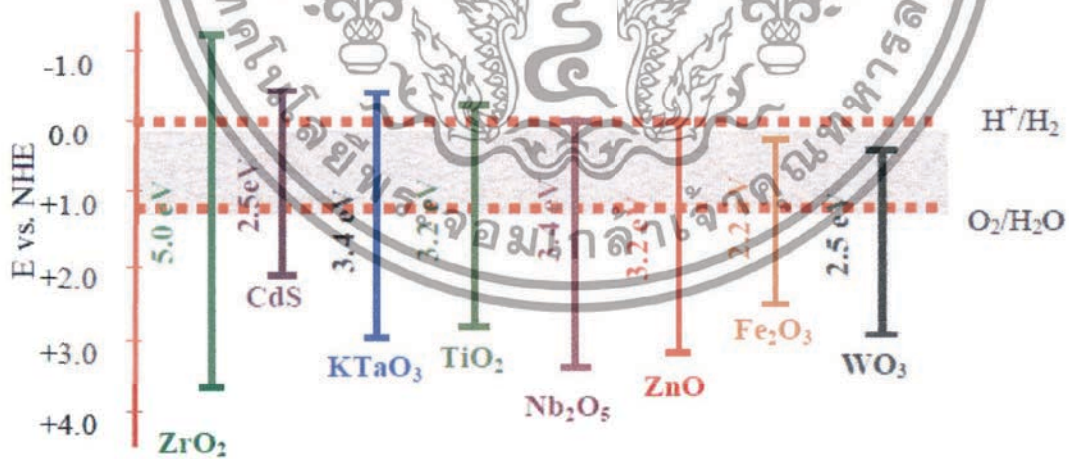
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำตัวแคตาลิสต์ที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน ในโลหะจะมีแถบวาเลนซ์และแถบการนำติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) เมื่ออิเล็กตรอนได้รับที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากแสง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ ในขณะที่แถบวาเลนซ์จะเกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบการนำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วแถบการนำเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในโลหะตัวนำคู่อิเล็กตรอน-โฮล สามารถเคลื่อนที่ไประหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแถบต้องห้ามคั่นอยู่

ด้วยนี่จึงเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมกันได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากกว่าเพราะมีแถบพลังงานคั่นอยู่ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลอยู่ได้นาน รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาระหว่างพลังงานจากแสงกับโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ โดยค่าของช่องว่างของพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง โดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาระหว่างพลังงานจากแสงกับโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ [24]



รูปที่ 2.8 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวแคตาลิสต์ชนิดต่างๆ [24]

โดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดูดซับ (Adsorption) และการฉายแสง (Irradiation process)

1) การดูดซับ คือการที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซจะถูกดึงให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการดูดซับเช่นนี้เป็นการเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งผ่านเวลาสำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับอายุการใช้งานไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊ส มายังพื้นที่ผิวของของแข็ง เรียกว่าตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2) การฉายแสง คือกระบวนการที่อนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งต้องมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ หรือช่องว่างของอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังคอนดักชันแบนด์แทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ทำให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำโฮลที่เกิดขึ้นในวาเลนซ์แบนด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant) และอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ จะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี

2.8.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลและเรดิคัลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัลตามสมการที่ 2.10 ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นสารออกซิแดนท์หลักในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก F^- แต่สูงกว่า Cl^- และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงได้ดังนี้

การกระตุ้น



การเกิดเรดิคัล จาก e^-/h^+



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole recombination)



เมื่อ h^+	คือโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band hole)
e^-	คือ อิเล็กตรอนที่แถบการนำ (Conduction band electron)
OH^\cdot	คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl in radical)
O_2^\cdot	คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide in radical)
HO_2^\cdot	คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)
H^\cdot	คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและโฮลที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ไฮโดรซิลเรดิคัล และขณะเดียวกันโฮลเกิดการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตาไลติกจึงเกิดขึ้นได้ 2 ทางคือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออน ได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวแคตาลิสต์กับโฮลซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนตัวแคตาลิสต์

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบการย่อยสลายสีย้อม โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และคำนวณอัตราการย่อยสลาย ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ

$$\ln \frac{C}{C_0} = -k_{obs}t \quad (2.12)$$

2.9 กระบวนการยับยั้งเชื้อรา

เชื้อรา เป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีอาหารเองได้ ดำรงชีวิตด้วยการย่อยและดูดซึมสารอาหารจากการย่อยสลายซากพืช และสัตว์โดยทั่วไปใช้อากาศ ในการเจริญเติบโต เชื้อราส่วนมากจะเติบโตและขยายพันธุ์ได้ดีในอุณหภูมิระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส เชื้อราประกอบไปด้วยเซลล์หลายเซลล์ขยายพันธุ์ด้วยสปอร์ที่สามารถแพร่กระจายไปได้ด้วยการพัดพาของอากาศ ดังนั้นสปอร์จึงเป็นตัวสำคัญในการแพร่กระจายและพบว่าเชื้อราสามารถทนอยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งแวดล้อมในสภาพที่ไม่เหมาะสมได้นาน เชื้อราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ทาง การแพทย์ คือ การผลิตยาปฏิชีวนะ ทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารหมัก หรือนำมาเลี้ยง เพื่อผลิตเป็นเอนไซม์ใช้ในการผลิตเบียร์ การทำลูกกวาด นอกจากนี้ยังใช้ผลิตกรดซิตริกหรือกรดน้ำส้ม ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในวงการแพทย์และเครื่องปรุงอาหาร รวมทั้งมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำหมัก สีย้อมและการทำแม่พิมพ์ แม้ว่าเชื้อราจะมีประโยชน์มาก แต่ก็สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ปฏิกิริยาความไวรับผิดปกติ (โรคมะเร็ง) เป็นต้น

2.9.1 ลักษณะพื้นฐานของราโดยทั่วไปมีดังนี้

1) เซลล์เป็นแบบ Eukaryotic cell (มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส) ในหนึ่งเซลล์อาจมีมากกว่า หนึ่งนิวเคลียส

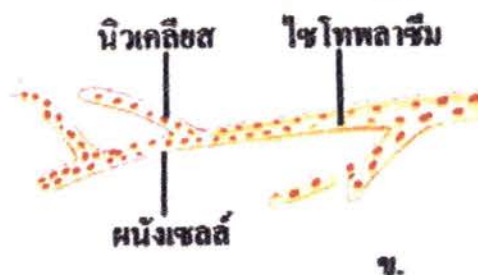
2) ราสร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) ไม่มีคลอโรฟิลล์ต้องได้รับพลังงานและ สารอาหารจากแหล่งอาหารอื่น ด้วยการออกซิโดซสารอินทรีย์ ดูดซับสารจากสิ่งแวดล้อม หรือเป็นผู้ ย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือเป็นปรสิต หรือ Symbionts

3) ผนังเซลล์ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) (พบเฉพาะใน Zygomycota) หรือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) หรือ ไคติน (Chitin)

4) มีลักษณะเป็นเส้นใย หรือไฮฟา (hypha) เส้นใยของรา มีหน้าที่ยึดติดกับอาหาร และ สืบพันธุ์ รวมทั้งสร้างอวัยวะสืบพันธุ์คือสปอร์ (spore) เส้นใยของเชื้อราแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

เส้นใยแบบไม่มีผนังกัน (non septate hypha) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อ ภายในมีนิวเคลียส และไซโทพลาซึมกระจายอยู่ทั่วไป

เส้นใยแบบมีผนังกัน (septate hyphae) ภายในเส้นใยมีผนังกัน



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเส้นใยของเชื้อราแบบมีผนังกันและไม่มีผนังกัน [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การขยายพันธุ์ของรา

ราขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศ แต่ส่วนใหญ่จะขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ ด้วยการสร้างสปอร์ที่ไม่อาศัยเพศ

ราขยายพันธุ์โดยการสร้างสปอร์ สปอร์ของรามีสี่ต่างๆ เช่น สีเทา เหลือง เขียว น้ำเงิน แดงสปอร์ของราแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) สปอร์ที่อาศัยเพศ (sexual spore) ได้แก่

- ไซโกสปอร์ (zygospore)
- แอสโคสปอร์ (ascospore)
- เบสิดิโอสปอร์ (basidiospore)

2) สปอร์ที่ไม่อาศัยเพศ (asexual spore) ได้แก่

- คอนิดีเนีย (conidiospore)
- สปอร์แรนจิโอสปอร์ (sporangiospore)

2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของรา

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของราในอาหารหรือในสภาวะแวดล้อมใดๆ ได้แก่

1) ปริมาณน้ำ น้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญของราปริมาณน้ำในอาหาร วัดได้ด้วยความชื้น (moisture content) และค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (water activity; a_w) ราต้องการน้ำเพื่อการเจริญเติบโตน้อยกว่า ยีสต์ (yeast) และแบคทีเรีย (bacteria) จึงสามารถเจริญเติบโตในอาหารที่มีความชื้น และมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า

- ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อราอยู่ระหว่าง 0.98-0.99 แต่ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำสุด (minimum a_w) ที่เชื้อราเจริญได้คือ 0.62 ดังนั้นในการถนอมอาหาร (food preservation) ด้วยการทำให้แห้ง (dehydration) จึงลดปริมาณ วอเตอร์แอคทิวิตีในอาหารให้ต่ำกว่า ค่าดังกล่าวเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อรา

2) อุณหภูมิ ราส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

3) ความต้องการออกซิเจน ราส่วนใหญ่ต้องการออกซิเจนเพื่อการเจริญเติบโต การเจริญเติบโตของราจึงพบบริเวณผิวหน้าของอาหาร

- การเก็บรักษาอาหารในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หรือสภาวะสุญญากาศ (vacuum) เช่นการบรรจุในสุญญากาศ (vacuum packaging) จะช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราได้

4) สารอาหาร ราใช้อาหารได้หลายชนิด ทั้งโปรตีน (protein) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ไขมัน (lipid) ทั้งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย และที่มีโครงสร้างซับซ้อน เพราะราสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ (enzyme) ได้หลายชนิด เช่น อะไมเลส (amylase) โปรตีเอส (protease) ไลเปส (lipase) ราจึงเป็นจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) หลายชนิด

2.9.4 ราเขียวไตรโคเดอร์มา (*Trichoderma* spp.)

2.9.4.1 สัณฐานวิทยาของเชื้อ *Trichoderma* spp.

Trichoderma spp. เป็นเชื้อราพวก Mitosporic Ascomycota ดำรงชีวิตแบบ saprophyte และ parasite จากการศึกษาลักษณะราเขียว *Trichoderma* spp. ของ Gams และ Bissett พบว่ามีลักษณะทางสัณฐาน ดังนี้

โคโลนี (colony) ขยายขนาดอย่างรวดเร็ว กระจายไปทั่ว ลักษณะคล้ายขนสัตว์ อาจไม่มีสีหรือสีเหลือง สีแดงเข้ม และสีเขียวเหลือง มักจะมีกลิ่นแรงหรือกลิ่นอ่อนๆ

โคนิไดอ็อพอร์ (conidiophore) แตกกิ่งจากก้านหลัก มีช่องว่างอย่างเป็นระเบียบ และแตกแขนงออกไปเรื่อยๆ จนถึงปลายสุด กิ่งที่แตกออกมีลักษณะแตกต่างกันอาจอยู่เดี่ยวหรืออยู่เป็นคู่ ลักษณะโค้งยาวหรือเป็นคลื่นหยัก และสร้างไฟอะไลด์ (phialide) จากปลายเส้นใยในอากาศ

โคนิเดีย (conidia) ของ *Trichoderma* spp. โดยทั่วไปเป็นสีเขียว และสีอื่นๆ เช่น สีเทา สีน้ำตาล ผนังเรียบถึงขรุขระ

คลามาโยโดสปอร์ (chlamydo-spore) พบกระจายทั่วไปบริเวณเส้นใยที่แตกแขนงหรือปลายบนกิ่งก้านที่แตกสั้น ของเส้นใยเจริญ ลักษณะเป็นทรงกลม หรือรูปไข่ ไม่มีสีถึงมีสีค่อนข้างเลือง หรือเขียวอ่อน ผนังเรียบ และค่อนข้างหนา

เส้นใย (vegetative hyphae) เป็นชนิดมีผนังกัน มีลักษณะใสผนังเรียบ กว้างประมาณ 1-10 ไมโครเมตร บางครั้งอาจมีสีเหลืองในเส้นใยที่เจริญ

2.9.4.2 การเข้าทำลายและการระบอดของเชื้อราเขียว *Trichoderma* spp.

- ในเห็ด ลักษณะการเข้าทำลาย คือ การเจริญครอบคลุมเส้นใยของเห็ด และการสร้างเอนไซม์ เนื่องจากเชื้อราเขียวสามารถเจริญได้ดีกว่าเส้นใยของเห็ด ทำให้เส้นใยของเห็ดเจริญได้ช้าลง จากนั้นก็จะมีการสร้างเอนไซม์ เพื่อย่อยเนื้อเยื่อของเห็ด เนื้อเยื่อของไมซีเลียม ที่ถูกทำลายจะเป็นสีน้ำตาล ยุบตัวลง ปรากฏเหี่ยว และเน่าเปื่อย มีผลทำให้เห็ดไม่สร้างดอกเห็ด

T. harzianum สร้างเอนไซม์ chitinase, laminarinase และ cellulose เมื่อทำการแยกสารโดยวิธีโครมาโตกราฟี (chromatographic) ก็จะได้ exoglucanase และ β -1, 4-D-glucanase cellobiohydrolase และสร้างสารพิษ 3 กลุ่มดังนี้

สารกลุ่ม trichothecene ได้แก่สาร trichodermin และ 2,3 - epoxytrichodermin มีฤทธิ์ในการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ peptidyl transferase ในเชื้อสาเหตุโรคพืช และยังมีผลในการส่งเสริมการเจริญของพืชด้วย

สารกลุ่ม cyclic peptide ได้แก่ alamethicine, trichotoxin, trichopolyns และ trichozianines สารกลุ่มนี้มีฤทธิ์การยับยั้งการเจริญของอินทรีย์ prokaryotes และ eukaryotes โดยจะไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์แตกสลาย

สารกลุ่ม isocyanide ได้แก่ trichoyiridin สารกลุ่มนี้เกิดได้ในบางสภาวะ พบทำลายจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเซลล์ลูโลส ทำให้เซลล์แตกสลาย

โรคราเขียวในเห็ด สร้างความเสียหายแก่อุตสาหกรรม การผลิตเห็ดเป็นจำนวนมาก ในปี 2548 พรศิลป์ มณีฉาย และคณะ ทำการสำรวจโรคราเขียวจากฟาร์มเห็ดทั่วประเทศไทย จำแนกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้ *T. harzianum*, *T. virens*, *T. virens-like*, *T. atroviride* และพบว่า *T. harzianum* เข้าทำลายเห็ดได้รุนแรงที่สุด

-ในไม้ ลักษณะการเข้าทำลาย คือ เชื้อราจะเข้าทำลายในส่วนของ เนื้อเยื่อพาราเมโซมา (parenchymatous) โดยผ่านทางรากหรือส่วนอื่นๆของต้นไม้ แล้วส่งผลให้ไม้ผุกร่อนและมีลักษณะเปลี่ยนสีไป ส่งผลต่อคุณค่าเศรษฐกิจของไม้ *Trichoderma* spp. เป็นเชื้อราที่สำคัญที่สุดในการทำลายเนื้อไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไม้เนื้ออ่อนที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ซึ่งลักษณะของเชื้อรา *Trichoderma* spp. ที่เข้าทำลายไม้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 [25-27]



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของการสร้างสปอร์ของเชื้อรา *Trichoderma* spp. ในต่อไม้สน [27]

2.10 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells, DSSC)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) [28] เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่ย้อมด้วยสี สารส่งผ่านประจุ (หรือเรียกว่า อิเล็กโทรไลต์) และขั้วไฟฟ้า โดยสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างมากในวงวิชาการและพาณิชย์ เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะผลิตเพื่อการค้าได้ไม่ยากและราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน

2.10.1 ส่วนประกอบของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า อนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และสารอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.11

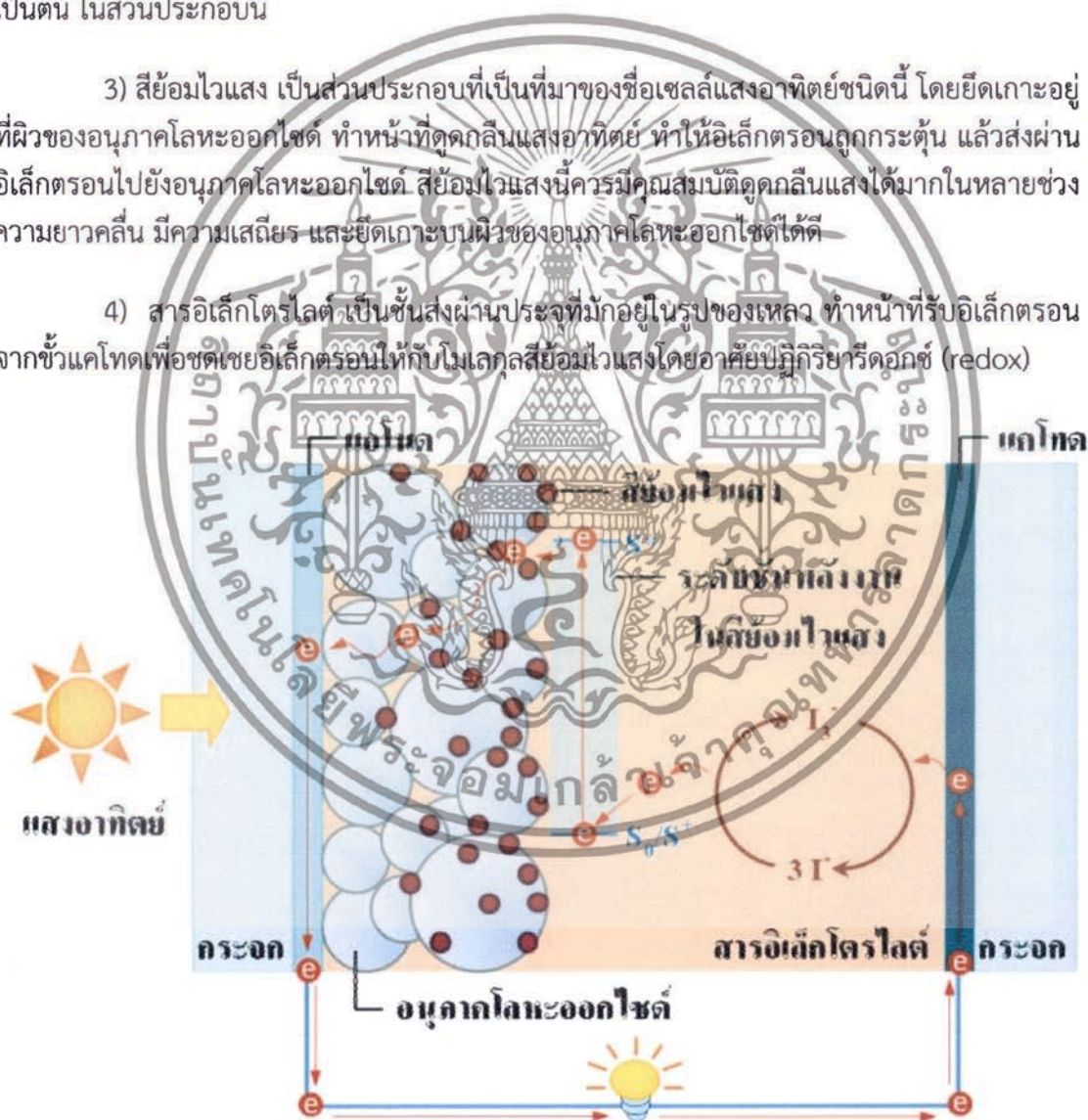
1) ขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มี 2 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบไว้ให้แสงผ่านและทำหน้าที่ถ่ายโอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ ซึ่งนิยมใช้ fluorine doped tin oxide (FTO) ที่เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้ ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (counter electrode) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ ซึ่งนิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์ที่เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้

2) อนุภาคโลหะออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะ รวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น ในส่วนประกอบนี้

3) สีย้อมไวแสง เป็นส่วนประกอบที่เป็นที่มาของชื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงนี้ควรมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียร และยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

4) สารอิเล็กโตรไลต์เป็นชั้นส่งผ่านประจุที่มักอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox)

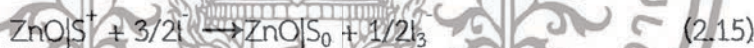


รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบ และการไหลของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 หลักการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC)

เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (ZnO) จะดูดกลืนแสง ($h\nu$) แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state, S_0) จะถูกเร้าให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state, S^*) ดังสมการดูดกลืนแสง 2.13 จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปแถบการนำไฟฟ้า (conduction band, CB) ของอนุภาคโลหะออกไซด์ดังสมการส่งผ่านอิเล็กตรอนดังสมการ 2.14 แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรรภายนอกเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วนี้สารอิเล็กโทรไลต์ (ตัวอย่างเช่นไอโอดีน/ไตรไอโอดีน) จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ดังสมการ 2.15 ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (ตัวอย่างเช่นโลหะแพลทินัม) ดังสมการ 2.16 แต่ในกระบวนการอาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบ ประกอบด้วยการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการ 2.17 และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการ 2.18



2.10.3 การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC)

ใน DSSC ที่ใช้อนุภาคนาโนเป็นขั้วรับแสงนั้น เมื่ออิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นจากแสง จะเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคนาโนอื่นๆ เพื่อเคลื่อนไปยังขั้วไฟฟ้าของเซลล์ แต่ระหว่างการเคลื่อนที่นั้นเองจะทำให้เกิดการสูญเสียของอิเล็กตรอนขึ้นที่รอยต่อระหว่างผลึกของอนุภาคนาโน การใช้วัสดุนาโนที่เติบโตใน 1 มิติมาแทนอนุภาคนาโนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุนาโนได้ดีและง่ายขึ้น ซึ่งคาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของ DSSC นั้นดีขึ้น

นอกจากนั้นยังมีแนวทางวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความทนทาน และอายุการใช้งานของ DSSC ในหลายด้าน เช่น การพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ราคาไม่แพง การพัฒนาอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีและมีพื้นที่ผิวมาก การพัฒนาสีย้อมไวแสงที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น การพัฒนาสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ใช่ของเหลวเพื่อให้ความเสถียรต่อการใช้งาน และการพัฒนาระบบการประกบเซลล์ (sealing) เพื่อยืดอายุการใช้งานของเซลล์

เป็นต้น เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะทาง

2.11.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟส หรือ การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) สามารถวิเคราะห์ได้ ทั้งในสุญญากาศ และบรรยากาศต่างๆ เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมาก และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถต่ำถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อให้ความร้อน เครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้สามารถอ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น จากกราฟที่ได้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นกลุ่มเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิก โลหะ และวัสดุทั่วไปอื่น ๆ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ ทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ ขึ้นงานภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา

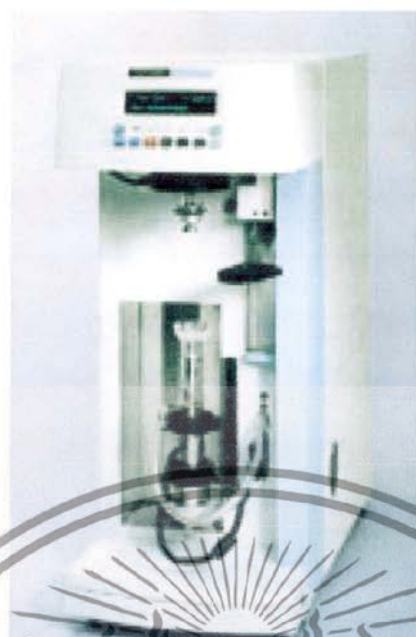
2.11.1.1 ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

- ช่วงอุณหภูมิ อุณหภูมิห้อง – 1,600 องศาเซลเซียส
- อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง – 1,100 องศาเซลเซียส 10 นาที
- อัตราการทำความเย็นตั้งแต่ 1,000 – 100 องศาเซลเซียส 25 นาที
- ความถูกต้องของอุณหภูมิ +0.5 องศาเซลเซียส
- ความแม่นยำของอุณหภูมิ +0.3 องศาเซลเซียส

2.11.1.2 ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

- องค์ประกอบของสาร (Composition)
- เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability/decomposition)
- ปริมาณสารสัมพันธ์ที่เกิดปฏิกิริยา (Stoichiometry of reaction)
- จลพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics of reactions)
- กระบวนการดูด/คายพลังงาน (Desorption/adsorption processes)
- การระเหย (Evaporation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) [29]

2.11.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer)

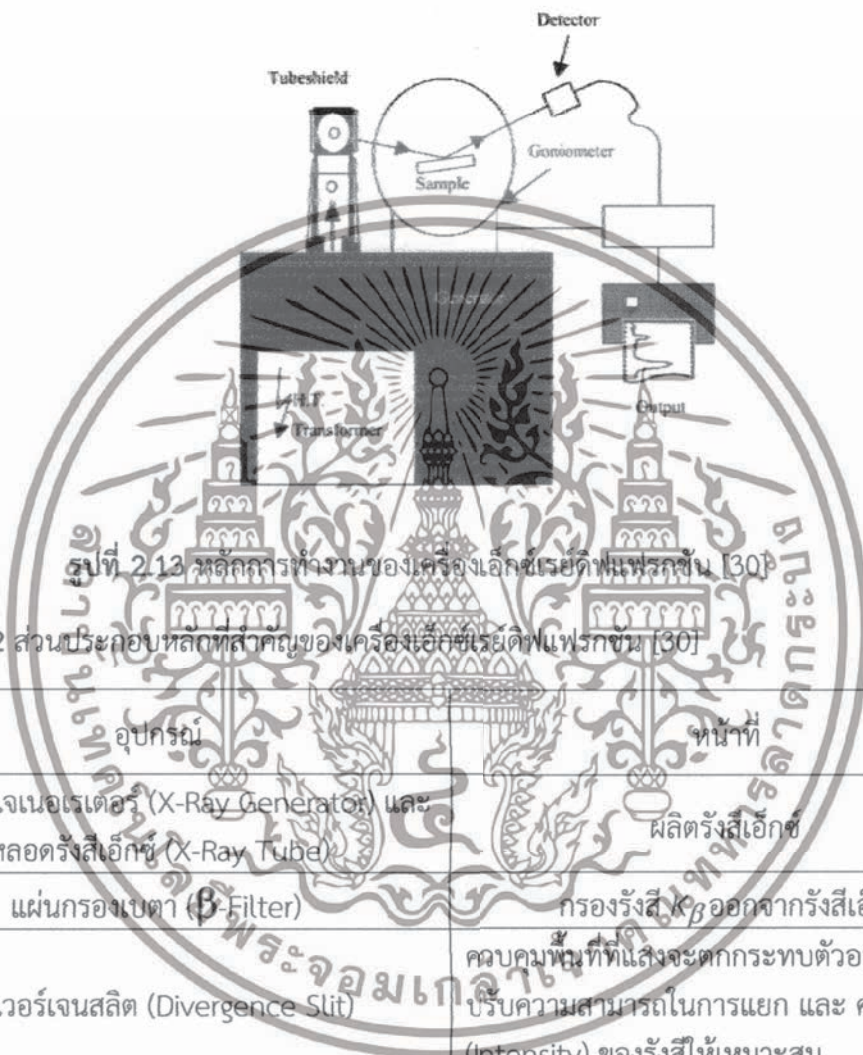
เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานชนิดการวิเคราะห์ แบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก (Crystallography) เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิตสำหรับการตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ

2.11.2.1 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

รูปที่ 2.13 แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน โดยเริ่มจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง (High-Tension Transformer) ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทดทำให้ไส้ร้อนขึ้นอิเล็กตรอนไปจับกับหนาแน่นบริเวณไส้ ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเพิ่มสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้า (Target) ที่ขั้วแอโนด มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาผ่านหน้าต่างที่ทำด้วยเบอริลเลียม (Be Window) หลอดรังสีเอกซ์ มีหลายชนิดเรียกชื่อตามชนิดของโลหะที่ใช้ทำแอโนด เช่น Mo W Cr Cu Co Ag Fe ซึ่งจะทำให้รังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ แต่โดยทั่วไปมักนิยมใช้ Cu ซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.542 อังสตรอม จะมีทั้ง K_{α} และ K_{β} สำหรับการวิเคราะห์นี้จำเป็นต้องใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic X-Ray) ดังนั้นจึงต้องใช้แผ่นกรองเบตาเพื่อกำจัด K_{β} เพื่อให้เหลือเพียง K_{α} อย่างเดียว การเลือกแผ่นกรองเบตาควรเลือกให้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับชนิดของหลอดรังสีเอกซ์ โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมวล (Mass Absorption Coefficient) จากนั้นรังสีเอกซ์ $K\alpha$ จะถูกบีบให้เป็นลำแคบลงโดยไดเวอร์เจนสลิต ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านไดเวอร์เจนสลิตจะตกกระทบลงบนตัวอย่างซึ่งติดไว้กับแกนของโกนิโอมิเตอร์ (Goniometer) รังสีที่สะท้อนกลับจากตัวอย่างจะผ่านไปยังรีซีฟิงสลิตและเข้าไปยังหน่วยรับสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปดิฟแฟรคโต-แกรม (Diffractogram)



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน [30]

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน [30]

อุปกรณ์	หน้าที่
เอ็กซ์เรย์ เจเนอเรเตอร์ (X-Ray Generator) และ หลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube)	ผลิตรังสีเอกซ์
แผ่นกรองเบตา (β -Filter)	กรองรังสี $K\beta$ ออกจากรังสีเอกซ์
ไดเวอร์เจนสลิต (Divergency Slit)	ควบคุมพื้นที่ที่แสงจะตกกระทบตัวอย่าง และ ปรับความสามารถในการแยก และความเข้ม (Intensity) ของรังสีให้เหมาะสม
โซลเลอร์สลิต (Soller Slit)	ควบคุมความสามารถในการแยกที่มุมต่ำ
รีซีฟิงสลิต (Receiving Slit)	ปรับความสามารถในการแยกและความเข้มของรังสีให้เหมาะสม
สแคตเตอร์สลิต (Scatter Slit)	ลดพื้นหลัง (Background)
โมนอโครเมเตอร์ (Monochromator)	ลดพื้นหลัง และกรอง $K\beta$
หน่วยรับสัญญาณ	รับรังสีเอกซ์ที่หักเหมาและแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของของแข็งเป็นผงละเอียดขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน และอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทางบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีจะต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (Random Orientation)

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำชิ้นตัวอย่างมาบดเป็นผงละเอียดด้วยครกบดอลูมินา (Alumina Mortar)
- 2) ร่อนผงละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช
- 3) นำผงที่ได้มาทำการอัดลงในที่ใส่ตัวอย่าง

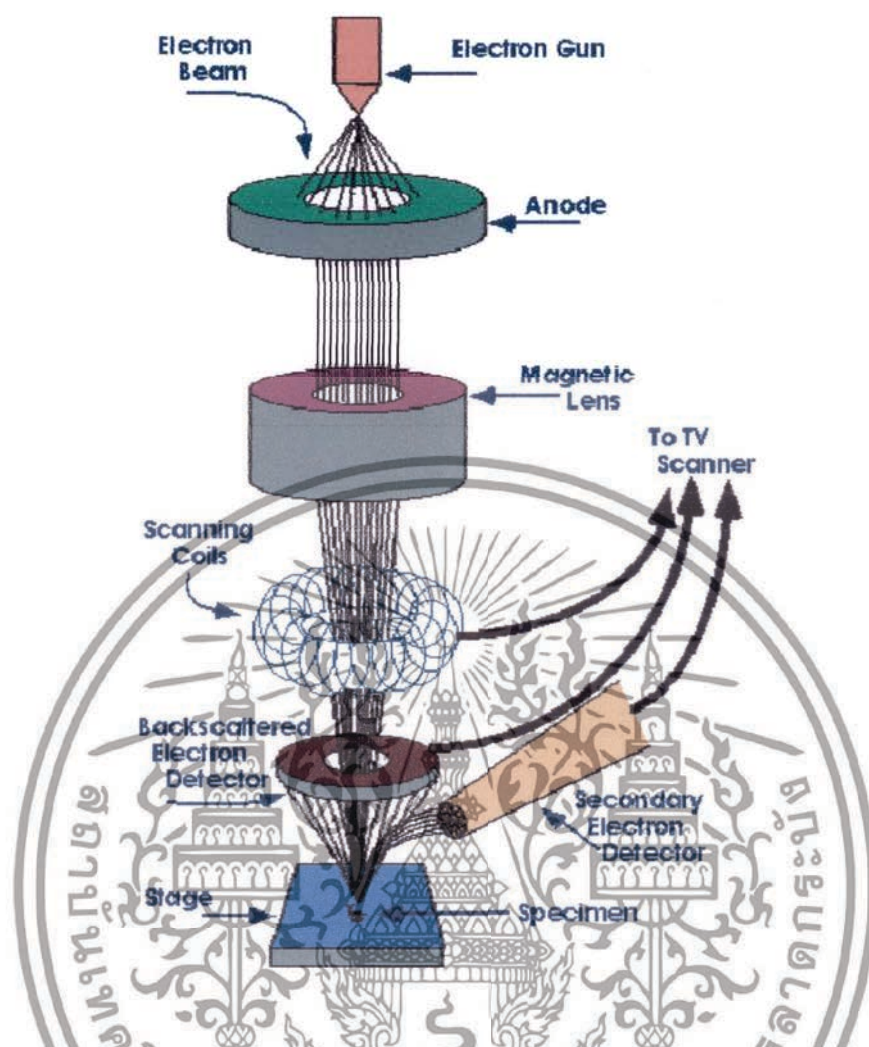
2. ข้อควรระวัง

- 1) การอัดผงตัวอย่างควรอัดด้วยแรงที่สม่ำเสมอ ไม่ควรกดแรงมากนักเพราะอาจทำให้ผลึกตัวอย่างเกิดความเครียดและให้ความมุมที่ผิดพลาดได้
- 2) ตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ต้องมีผิวหน้าเรียบมีความหนาไม่ต่ำกว่า 20 ไมครอน
- 3) ตัวทำละลาย (Solvent) หรือตัวยัดประสานที่ใช้ในการเตรียมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง

2.11.3 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ส่วนประกอบและลักษณะการทำงานโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยแอฟเพอเจอร์ (Aperture) หรือ ช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM [31]

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) สำหรับ SEM ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมากโดยตัววัสดุที่นำมาสร้างเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนต้องมีเสถียรภาพและภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดเล็ก ๆ ในปัจจุบันสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ลวดทังสเตน (Tungsten Filament) ผลึก LaB_6 (Lanthanum Hexaboride Crystal) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบโคลด์ฟิลด์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) และแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบช็อตทักฟิลด์อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source)

2.11.3.1 ลักษณะการใช้งาน SEM (SEM Operational Modes)

ในทางปฏิบัติลักษณะการใช้งาน SEM อาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลักดังนี้

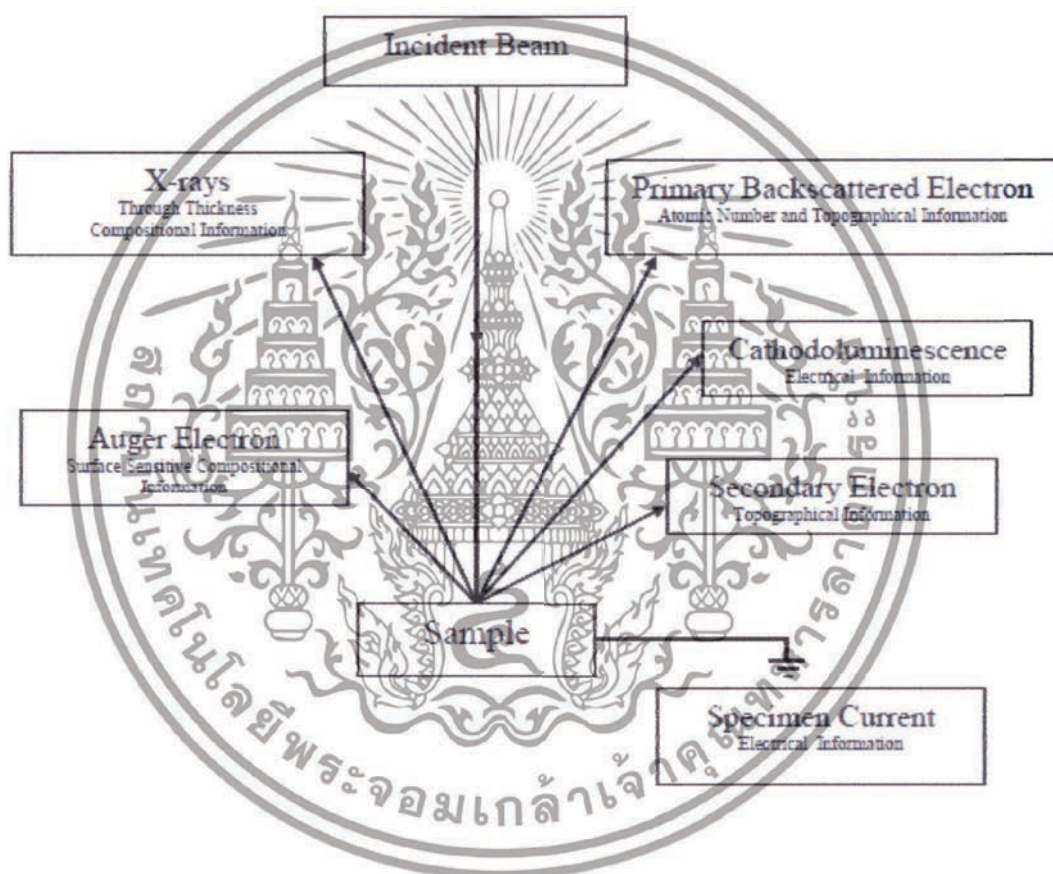
1) High Resolution Mode : สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูงๆ จึงต้องการจุดตกกระทบขนาดเล็ก ซึ่งกลุ่มนี้จะเป็นกลุ่มหลักสำหรับการมองเห็นโครงสร้างนาโน

2) High Depth of Field Mode : สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้องการใช้มุมคอนเวอร์เจนต์ของลำอิเล็กตรอนเล็ก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) High Current Mode : สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เอ็กซ์เรย์ต้องการปริมาณกระแสมาก ๆ เพื่อเพิ่มความไว (Sensitivity) ต่อการตรวจวัดปริมาณของธาตุ

4) Low Voltage Mode : นอกเหนือไปจากลักษณะการใช้งาน SEM ในแบบต่างๆข้างต้นในปัจจุบัน SEM โดยเฉพาะแบบฟิลด์อิมิชชัน (FE-SEM) ยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่า kV ต่ำ (ต่ำกว่า 5 kV) เนื่องจากการใช้ SEM ในลักษณะนี้จะได้ข้อมูลพื้นผิวดีขึ้นอีกทั้งยังลดปริมาณประจุสะสมบนผิว (Charging) จึงทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องเคลือบด้วยคาร์บอนหรือโลหะ



รูปที่ 2.15 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนและชิ้นงาน [31]

2.11.3.2 สัญญาณแบบต่าง ๆ (Various Types of Signal)

สำหรับเทคนิค SEM ที่มีชิ้นงานหนาเกินกว่าที่อิเล็กตรอนจะทะลุผ่านได้ จะให้สัญญาณแบบต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.15 ด้านบนเหนือชิ้นงาน สัญญาณที่สำคัญและใช้งานกันในกล้อง SEM ทั่วไปได้แก่

1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons): ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อย ๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered Electrons): ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีและลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิว

3) เอ็กซ์เรย์ (X-Ray): ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค EDS และ WDS

นอกเหนือไปจากสัญญาณหลักทั้ง 3 แบบที่กล่าวมา ยังมีสัญญาณอื่น ๆ อีกเช่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ (Electromagnetic Wave) ไอเจ็อิเล็กตรอน (Auger Electron) เครื่องเสียง (Acoustic Wave) และกระแสที่เกิดจากตัวอย่าง (Specimen Current) เป็นต้น สัญญาณเหล่านี้สามารถให้ข้อมูลหลายอย่างเกี่ยวกับชิ้นงานที่กำลังทำการศึกษาได้

2.11.3.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับเทคนิค SEM

การเตรียมชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับเทคนิค SEM แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ซึ่งการเตรียมจะต้องดึงนำออกจากชิ้นงานให้หมดไม่อย่างนั้นน้ำจะระเหยอยู่ในระบบสุญญากาศและสร้างปัญหาให้กับระบบ นอกจากนี้ชิ้นงานจะต้องนำไฟฟ้า (อิเล็กตรอนสามารถออกจากและเคลื่อนที่ในชิ้นงาน) เพื่อให้ไม่เกิดปัญหาการออกันของอิเล็กตรอนในชิ้นงานทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณจากอิเล็กตรอนมาสร้างภาพได้หรือเรียกว่า เกิดปัญหา Electron Charging หากชิ้นงานเป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่แล้วสามารถนำเข้าเครื่อง SEM ได้เลย แต่หากไม่นำไฟฟ้าจะต้องเข้าเครื่องสปัตเตอร์ (Sputter) เพื่อเคลือบฟิล์มบางของทองหรือกราไฟต์ เพื่อเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าให้กับผิวหน้าของชิ้นงานสำหรับตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับเทคนิค SEM [31]

2.11.4 Energy dispersive x-ray spectrophotometry (EDS หรือ EDX)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุและใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์ โดยเทคนิค EDS มีหลักการวิเคราะห์คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่า พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานเอกสารถี่เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1.การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (area scan analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เรย์แมปปิง (x-ray mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ

2.การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3.การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนพื้นผิวตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการ

$$E = h\nu \quad (2.19)$$

เมื่อ E = พลังงานของรังสีเอกซ์

h = ค่าคงที่ของพลัง (Planck's constant $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

ν = ความถี่ของรังสีเอกซ์

2.11.5 รามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)

Raman scattering [33] เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสงโมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางด้วยการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) แต่มีการชนส่วนน้อยอีกส่วนหนึ่งคือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (raman scattering)

เมื่อก้าวถึงปรากฏการณ์ของการเกิดกระเจิง ในกระบวนการกระเจิงนั้น สิ่งที่สำคัญที่จะต้องเน้นคือ การดูดกลืนแสงหรือโฟตอนเริ่มต้น และการให้อิมิสชันของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เป็นกระบวนการเกิดอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนในโมเลกุลถูกรบกวน หรือ distorted ได้ง่ายเพียงใด คุณสมบัติอันนี้เรียกว่า polarizability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า polarizability ของโมเลกุลเปลี่ยนไปในระหว่างการสั่นของโมเลกุล จะมีผลต่อการเกิด raman shifted ของโฟตอนจากการเกิดอันตรกิริยาหรือโฟตอนเริ่มต้นด้วยพลังงาน $h\nu_L$

ดังนั้น โมเลกุลที่ทำให้แสงโมโนโครมาติกเกิดการกระเจิงแล้วเกิด Raman shifted lines ได้ โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นแล้วทำให้ polarizability ของสารนั้นเปลี่ยนไป แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ [32]

2.11.5.1 องค์ประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectrometer)

องค์ประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์นั้น ส่วนที่สำคัญก็คือ ต้องมีเครื่องที่จะสามารถวัดแสงที่กระเจิงได้ ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นแสงที่มีน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูงๆ ใดๆก็ตาม เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ก็ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนคือ

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง
2. ระบบใส่สารตัวอย่าง (sample illumination system)
3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่เหมาะสม

2.11.5.2 ข้อดีของเทคนิครามาน

1. เนื่องจากปรากฏการณ์รามานเป็นกระบวนการกระเจิงของแสง ดังนั้น สารตัวอย่างที่ใช้ อาจจะมีรูปทรงหรือขนาดใดๆ ก็ได้
2. สามารถใช้วัดสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณน้อยได้
3. สามารถใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ละลายในน้ำได้ เนื่องจากโมเลกุลน้ำซึ่งมีสภาพขั้วสูงจะไม่เกิดสัญญาณรบกวนสเปกตรัมรามาน
4. ที่ใส่สารตัวอย่าง (sample holder) เป็นวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับ IR window บางตัว เช่น ZnSe

5. สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

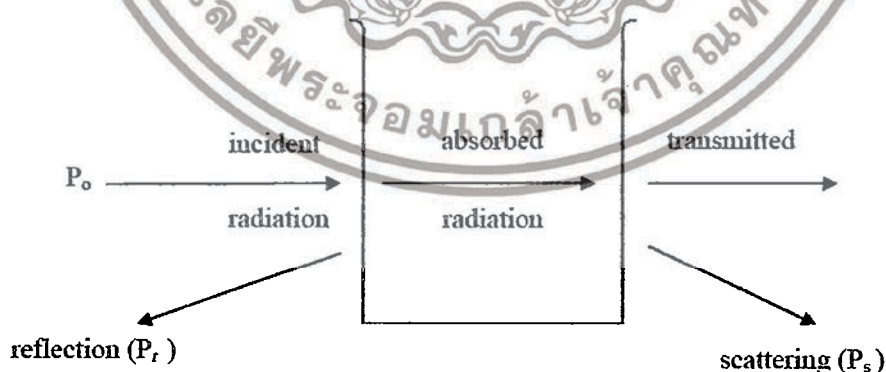
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.6 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวีวิซีเบิลสเปกโตรสโคปี (UV – VIS Spectrophotometer)

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและย่านตามองเห็น ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่ได้แก่พวกสารอินทรีย์ (Organic Compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic Compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความเที่ยงและแม่นยำ และมีสภาพไว (Sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้แต่ในกรณีที่จะนำไปใช้พิสูจน์ว่าสารตัวอย่างนั้นเป็นสารอะไรมีโครงสร้างอย่างไร อาจจะต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้าช่วยด้วยเพื่อให้เกิดความแน่ใจ เช่น ใช้เทคนิคทาง IR หรือ NMR Spectroscopy เป็นต้น

2.11.6.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

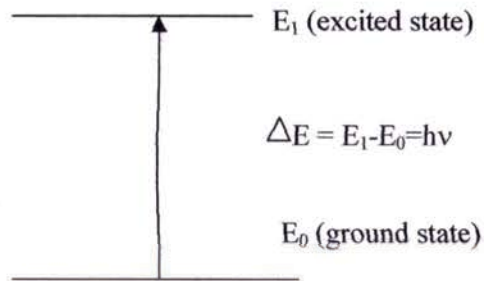
เทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่น 10-380 นาโนเมตร) และช่วงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 380-700 นาโนเมตร) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์ โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสง เริ่มจากเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็สามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ ข้อมูลที่ได้จากช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) และช่วงที่ตามองเห็น (Visible) นั้นอาจใช้ในการช่วยยืนยันข้อมูลที่ได้จากช่วงอินฟราเรด (Infrared, IR) หรือข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ที่ต่างกันแต่จะไม่สามารถใช้ระบุชนิดของสารได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเทคนิคนี้ในการใช้เกือบทั้งหมดจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ในการหาปริมาณสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ในตัวอย่างต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลาย (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง [33]

ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือ เกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า Absorption Spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กระบวนการเกิดการกระตุ้น [33]

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ เบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กฎของเบียร์ ซึ่งมีใจความดังนี้ “สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันจะเป็น Exponential Function ของความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนรังสีและความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านสารตัวอย่าง” หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้ม I_0 ไปยังเนื้อสารที่มีความหนา b โฟตอนของคลื่นแสงจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลของสาร (ดังรูปที่ 2.20) ทำให้ความเข้มของคลื่นแสงลดลงจาก I_0 เป็น I (I เป็นพลังงานของคลื่นแสงที่เหลือออกมา)



รูปที่ 2.20 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงกับโมเลกุลของสาร [33]

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \log \frac{I}{I_0} = \epsilon b c \quad (2.21)$$

- เมื่อ A คือ Absorbance หรือ Optical Density
 T คือ ค่าการส่งผ่านแสงของสาร (Transmittance)
 I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว (Intensity of Transmitted Light)
 I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง (Intensity of Incident Light)
 b คือ ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็น เซนติเมตร
 (Path Length of Sample หรือ Cell Length)
 C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น mol/dm^3 หรือ mol/L หรือ Molar

Molar

ϵ คือ Molar Absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุล คำนี้อาจระบุได้ว่า สารแต่ละตัวมีพื้นที่ที่จะดูดกลืนรังสีได้มากหรือน้อยต่อ 1 mol

การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (Electron Transition) จะมีค่า ϵ อยู่ในช่วง 0-106 ถ้า ϵ มีค่าตั้งแต่ 104 ขึ้นไป หมายความว่าสารประเภทนั้นมีค่าความเข้มของรังสีที่ดูดกลืนอยู่ในระดับที่สูง (Strong Absorption) และถ้า ϵ มีค่าต่ำกว่า 10^4 จัดว่าสารประเภทนั้นมีค่าความเข้มที่รังสีที่ดูดกลืนอยู่ในระดับปานกลาง (Medium Absorption) แต่ถ้า ϵ มีค่าต่ำกว่า 10-100 จัดว่าสารนั้นมีค่าความเข้มที่รังสีดูดกลืนอยู่ในระดับที่น้อย (Weak Absorption) (หมายเหตุ สำหรับ Forbidden Transition จะมีค่า ϵ อยู่ระหว่าง 100-1000) เนื่องจาก Spectrophotometer อาจจะวัดค่าออกมาเป็น Absorbance (Abs) หรือ Transmittance (%T) จึงอาจใช้สมการต่อไปนี้คำนวณกลับไปมาได้ดังนี้

กำหนดให้
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.22)$$

และ % T เท่ากับ
$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (2.23)$$

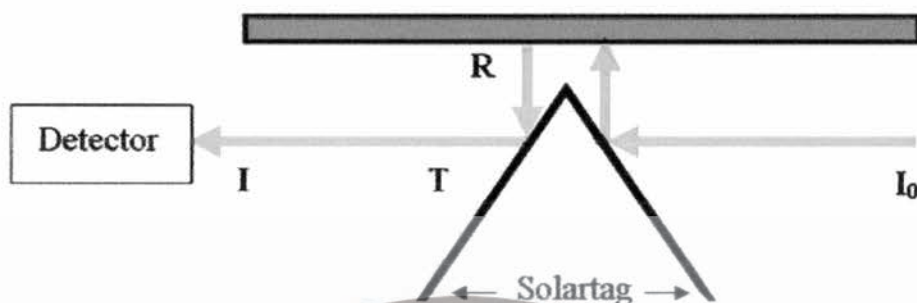
ดังนั้น
$$A = \log \frac{I}{I_0} = \log \frac{I}{T} = \epsilon b c \quad (2.24)$$

หาก A เปลี่ยนค่าจาก ∞ ถึง 0 ส่วน T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 1 และ %T จะเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 100 เราเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Abs และ %T ได้เป็น

$$A = \log \frac{100}{\%T} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้ %A = 100 - %T เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.26) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นฟิล์มที่หนามากจนแสงไม่สามารถทะลุผ่านได้จะการใช้การวัดร้อยละของแสงที่สะท้อนออกจากสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงเส้นทางเดินของแสงเมื่อวัดฟิล์มแบบร้อยละการสะท้อน [33]

เครื่องจะวัดด้วยค่า Transmittance ของความเข้มแสงเริ่มต้นและสุดท้ายเท่านั้น

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.27)$$

สำหรับแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับจะสามารถวัดเป็นค่า Reflectance ส่วนแสงที่ทะลุฟิล์มออกไปจะสามารถวัดเป็นค่า Transmittance ได้และแสงที่ถูกกักเก็บโดยฟิล์มตัวอย่างจะสามารถวัดเป็นค่า Absorption ได้

$$R + T + A = 1 \quad (2.28)$$

ค่า Reflectance ของฟิล์มตัวอย่างจะหมายถึงค่า Transmittance ที่เครื่องวัดได้ ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

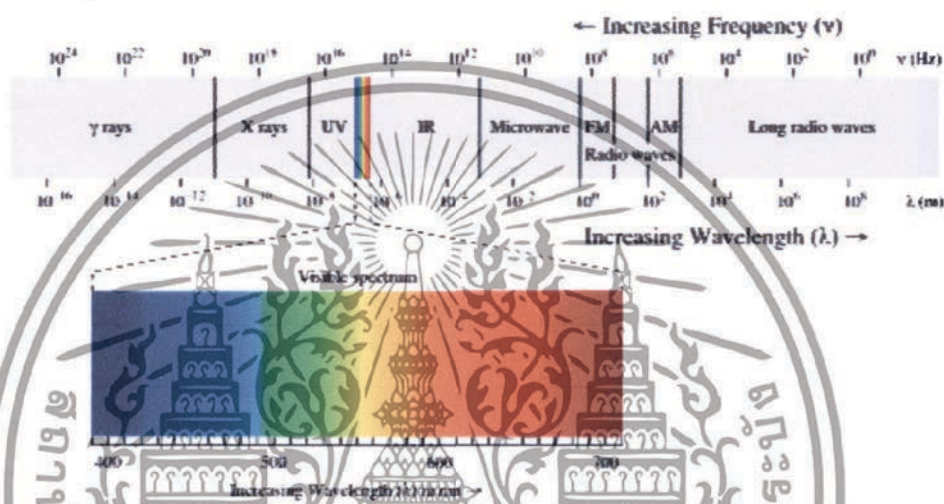
$$\begin{aligned} \text{Abs} &= -\log R \\ &= -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

ดังนั้นสามารถแปลงค่า %R เป็นค่า Absorbance ได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\text{Abs} = -\log \%R/100 \quad (2.30)$$

UV-VIS Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เลื่อนระดับชั้นพลังงานไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Electronic Transition) เนื่องจากเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

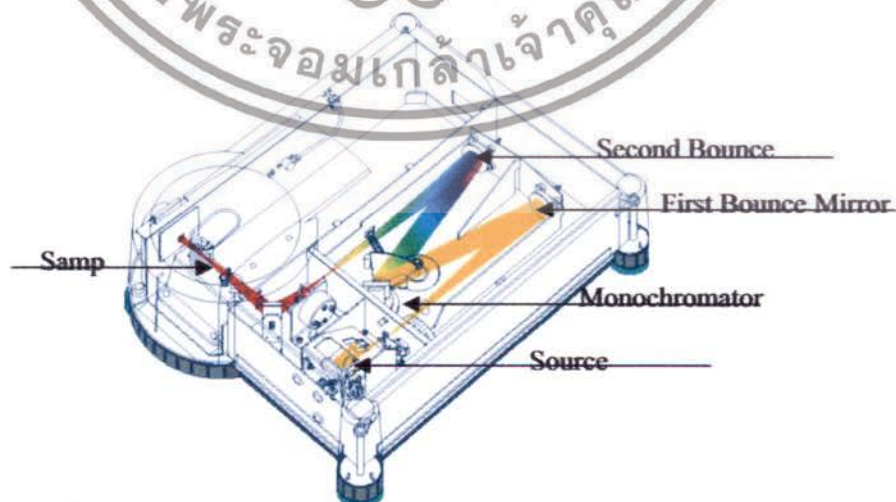
ปรากฏการณ์การกระตุ้นอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งจึงเรียก UV-VIS Spectroscopy ว่า Electronic Spectroscopy ปกติช่วงอัลตราไวโอเล็ต จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดยเครื่อง UV Spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200-380 นาโนเมตร ซึ่งเรียกว่า “Near-Ultraviolet Region” ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ จึงต้องวัดสเปกตรัมภายใต้สุญญากาศ เราจึงเรียกความยาวคลื่นของอัลตราไวโอเล็ต ในช่วงนี้ว่า “Vacuum-Ultraviolet Region” ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเรียกว่า “Visible Region” จะเป็นสเปกตรัมในช่วงประมาณ 380-780 นาโนเมตร ซึ่งจะปรากฏเป็นสีต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดง Electromagnetic Spectrum [33]

2.11.6.2 ส่วนประกอบของ UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer มีอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอยู่หลายอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดรังสี (Source) แหล่งกำเนิดรังสีใน UV-VIS Spectrophotometer ที่นิยมใช้กันแพร่หลายได้แก่

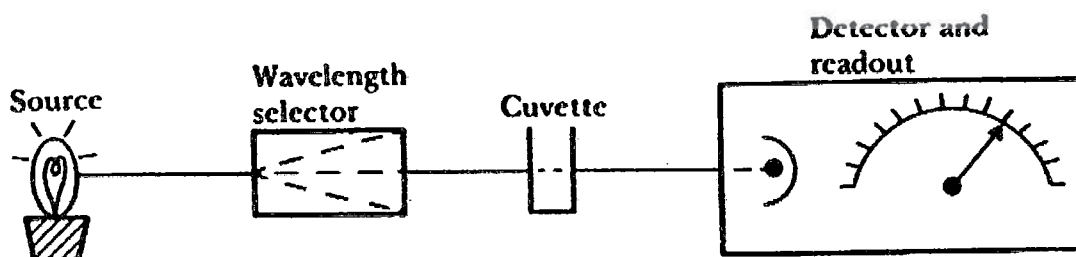
1) หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 นาโนเมตร มีทั้งประเภทใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 โวลต์) และประเภทใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 โวลต์) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงจนถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 นาโนเมตร หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2) หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสุญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ต ใกล้ช่วงแสงที่แลเห็นได้จนถึงช่วงอินฟราเรด

3) โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของ UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องให้ออกมาเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียวเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของ UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องให้ออกมาเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียวส่วนในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์สำหรับ UV-VIS Spectrophotometer ที่มีราคาแพง มักใช้ Monochromator แบบ Diffraction Grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของร่องใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

4) อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorder) หลังจากทีลำรังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้วลำรังสีจะไปที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งจะให้ข้อมูลการดูดกลืนออกมาสำหรับ UV-VIS Spectrophotometer ที่มีราคาถูกข้อมูลนี้จะปรากฏออกมาในรูปการบายเบนของเข็มบนหน้าปัดมิเตอร์หรือปรากฏเป็นตัวเลขก็ได้ในกรณีเช่นนี้ต้องบันทึกข้อมูลเหล่านี้สำหรับแต่ละความยาวคลื่นในกระดาษกราฟเส้นที่เชื่อมจุดต่างๆก็คือ สเปกตรัม นั่นเองสำหรับ UV-VIS Spectrophotometer ที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นเองโดยอัตโนมัติจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอยู่ด้วยสามารถบันทึกออกมาเป็นสเปกตรัมได้โดยตรงซึ่ง UV-VIS Spectrophotometer ชนิดนี้มีราคาแพง

5) เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง เนื่องจากแก้วธรรมดาดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต จึงจำเป็นต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยควอตซ์แทนเพื่อลดการดูดกลืนรังสีในช่วงดังกล่าว ซึ่งแผนผังทางเดินของรังสีเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 Block Diagram of a Spectrophotometer [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

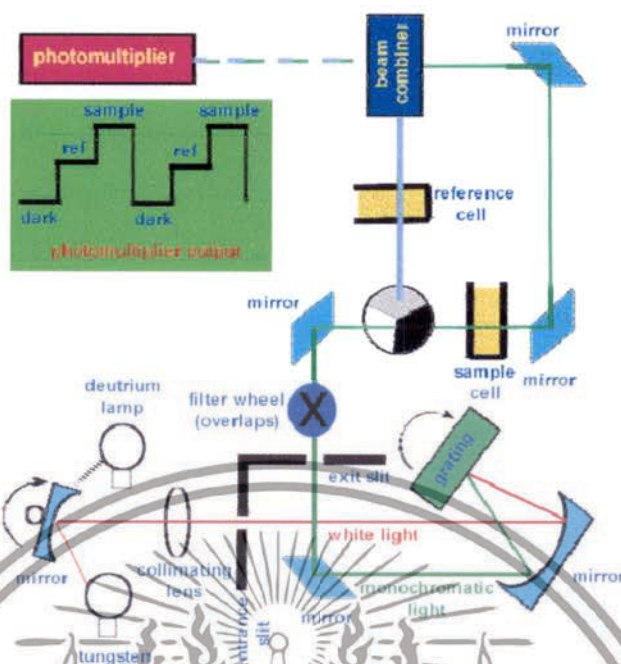
2.11.6.3 ประเภทของ UV-VIS Spectrophotometer

1) Single-Beam Spectrophotometer รูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นถึงทางเดินของรังสีใน Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยวสามารถวัดสเปกตรัมทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตาเรามองเห็นเมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีซึ่งอาจจะเป็นหลอดทวิที่เรียบหรือหลอดทังสเตนจะถูกคัดเลือกค่าความยาวคลื่นโดยผ่านปริซึมหรือเกรตติง Monochromator จากนั้นลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะผ่านเข้าสู่สารตัวอย่างแล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณตลอดเส้นทางของลำรังสีนี้มีลำรังสีเพียงลำเดียวจึงเรียก Spectrophotometer ประเภทนี้ว่าแบบลำรังสีเดี่ยวเนื่องจาก Spectrophotometer ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจาก Monochromator ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลยการวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกันเซลล์แรกจะบรรจุตัวทำละลายบริสุทธิ์ส่วนเซลล์หลังบรรจุสารละลายที่ต้องการวัดทุกครั้งที่ต้องให้รังสีผ่านเซลล์แรกเพื่อปรับค่าการดูดกลืนให้เท่ากับศูนย์แล้วจึงให้ลำรังสีผ่านเซลล์ข้อมูลความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนรังสีของทั้ง 2 จะถูกนำไปวิเคราะห์และบันทึกเป็นสเปกตรัม



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงทางเดินของรังสีใน Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงทางเดินของรังสีใน Spectrophotometer แบบลำแสงคู่ [33]

2) Double-Beam Spectrophotometer Spectrophotometer แบบลำแสงคู่ซึ่งใช้ Monochromator แบบ Doublepass ลำรังสีจากแหล่งกำเนิด (Light Source) จะถูกแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากับลำรังสีหนึ่งผ่านลงไปเซลล์ที่บรรจุสารละลายของสารอินทรีย์ที่เรียกว่าเซลล์ตัวอย่าง (Sample Cell) อีกลำรังสีหนึ่งจะผ่านลงไปเซลล์ที่บรรจุตัวทำละลายบริสุทธิ์ไว้ที่เรียกว่าเซลล์อ้างอิง (Reference Cell) ความเข้มของลำรังสีทั้งสองที่ผ่านออกจากเซลล์จะถูกเปรียบเทียบเชิง อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องบันทึกจะเปลี่ยนสัญญาณออกมาเป็นสเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 2.26

2.11.6.4 ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

- การดูดกลืนของแสง (Absorbance)
- ร้อยละของการทะลุผ่านของแสง (% Transmittance)
- ร้อยละของการสะท้อนของแสง (% Reflectance)
- ร้อยละของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (Diffuse %T)
- ร้อยละของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง (Diffuse %R)
- ร้อยละของ Variable Angle (%T)
- ร้อยละของค่าการสะท้อนแสงของสเปกคิวลาร์ (Specular %R)
- ร้อยละของการสะท้อนแสงรวม (Total %R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสง ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต วิซิเบิลเนียโออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-Visible-NIR Spectrophotometer)

Ultraviolet-Visible-NIR Spectrophotometer เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดการสะท้อนของแสงที่ชนกับบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง แล้วเกิดการสะท้อนออกมา ซึ่งการสะท้อนแสงจะมีอยู่ 2 ส่วน คือการสะท้อนแสงเสมือนจริง (Specular reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย (Diffuse reflection) ซึ่งการสะท้อนแสงเสมือนจริง คือ การสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือน และมีขนาดใกล้เคียงกันกับแสงที่ตกกระทบ แต่มีทิศทางที่ตรงกันข้าม จะเกิดขึ้นในกรณีที่พื้นผิวของวัตถุมีลักษณะที่เรียบ ในส่วนของการสะท้อนแสงกระจาย จะเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ทำให้มีทิศทางของการสะท้อนแสงกระจายไปในทุกทิศทาง ซึ่งการวิเคราะห์การสะท้อนแสงกระจาย ค่าที่ออกมาจะเป็นค่าระหว่าง เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%R) กับความยาวคลื่น (λ) ในย่านรังสียูวีและแสงขาวหรือแสงในย่านที่ตามองเห็น ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของ $F(R)$ โดยใช้สมการของ Kubelka – Munk ดังสมการที่ 2.31 เพื่อให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

จากฟังก์ชัน Kubelka – Munk

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2.31)$$

เมื่อ $F(R)$ = ฟังก์ชัน Kubelka – Munk หรือค่าการดูดกลืน (Absorbance, A)

R = ค่าการสะท้อนของแสง

2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

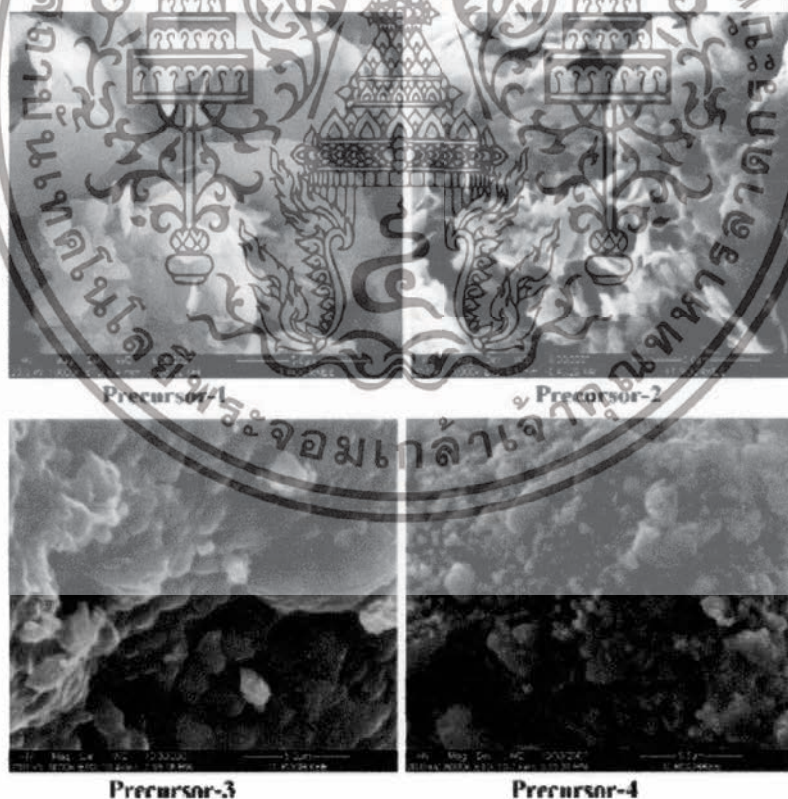
สารประกอบซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งในด้านการศึกษา ค้นคว้า และนำไปประยุกต์ใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีเสถียรภาพทางเคมี และทางโครงสร้างสูง มีโครงสร้างระดับนาโนที่โดดเด่น สามารถยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียได้ แต่อย่างไรก็ตาม ZnO ยังมีข้อบกพร่องทางด้านแสง อันเนื่องมาจากมีแถบพลังงานกว้าง แสงย่านตามองเห็น (Visible light) ที่มีพลังงานต่ำจึงไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปยังแถบนำ (Conduction Band) แต่ต้องใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงพลังงาน 45 เปอร์เซ็นต์ จากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เกิดจากแสงย่านตามองเห็นซึ่งมีความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร แต่แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่านั้นกลับมีพลังงานน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ [42,43] นอกจากนี้ อัตราการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ ZnO ยังเป็นตัวลดทอนประสิทธิภาพทางแสงอีกด้วย ดังนั้นการพัฒนาวัสดุประกอบของ ZnO กับธาตุอื่น อาทิเช่น AlZnO, CuZnO เพื่อให้มีการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมากขึ้นจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการประยุกต์ใช้งานที่สามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Srikanth และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้สารตั้งต้นที่เป็นประจุลบ (Cl_2^- , SO_4^{2-} , NO_3^- และ CH_3COO^-) ในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยกระบวนการตกตะกอน ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยเลือกใช้สารตั้งต้นที่เป็น zinc salt อาทิเช่น ซิงค์คลอไรด์, ซิงค์ไนเตรต, ซิงค์ซัลเฟต และ ซิงค์อะซิเตต โดยมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทดลอง เช่น เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ zinc salt, เปลี่ยนแปลงปริมาณของยูเรีย (urea) และเวลาในการสังเคราะห์ พบว่าอนุภาคของสารตั้งต้นทุกชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน สารตั้งต้นที่ได้จากซิงค์คลอไรด์ มีรูปร่างเหมือนอนุภาคแบบแผ่น สารตั้งต้นที่ได้จากซิงค์ไนเตรต และซิงค์ซัลเฟต มีรูปร่างอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ และสารตั้งต้นที่ได้จาก ซิงค์อะซิเตตมีรูปร่างใกล้เคียงกับอนุภาคทรงกลม ส่วนตัวอย่าง ZnO ที่ได้ภายหลังจากการนำสารตั้งต้นไปผ่านกระบวนการทางความร้อนพบว่า ZnO ที่ได้จากซิงค์คลอไรด์ มีรูปร่างอนุภาคแบบแผ่น, ZnO ที่ได้จากซิงค์ซัลเฟต มีรูปร่างแบบอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็ก และ ZnO ที่ได้จากซิงค์อะซิเตต มีรูปร่างแบบอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นที่เป็นประจุลบนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคสารตั้งต้นรวมถึงผลิตภัณฑ์ ZnO ที่ได้ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นประจุลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เหมือนตัวปรับปรุงพื้นผิว (surface modifier) จึงทำให้ตัวอย่าง ZnO ที่เตรียมได้นั้นมีขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.27 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยเตรียมจากสารตั้งต้นต่างชนิดกันคือ ซิงค์คลอไรด์, ซิงค์ไนเตรต, ซิงค์ซัลเฟต และ ซิงค์อะซิเตต ตามลำดับ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

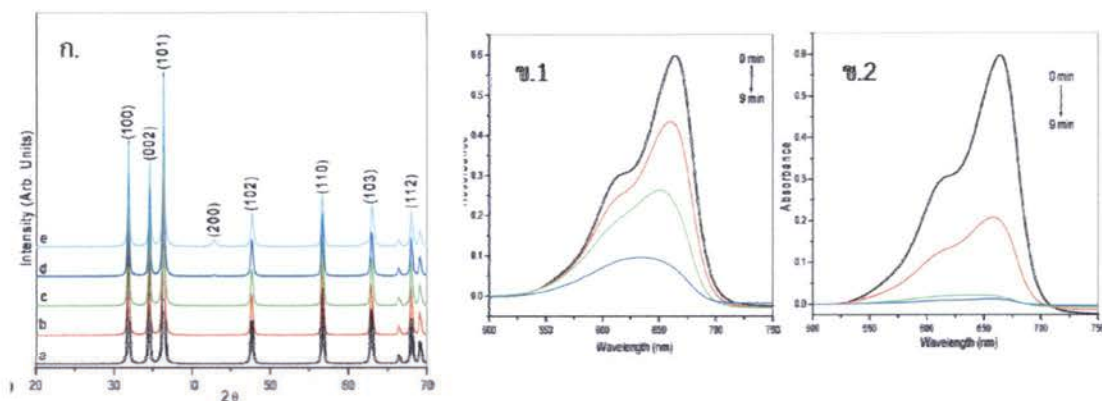
Samaele และคณะ [36] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์จากสารตั้งต้น ซิงค์อะซิเตด ไดไฮดรอต โดยใช้สารลดแรงตึงผิว โซเดียม โดดีซิล ซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate ; SDS) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ภายใต้การศึกษา pH ในช่วง 8-12 จากผลการทดลองพบว่า $Zn(OH)_2$ สามารถก่อตัวเป็น ZnO ได้ จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถตรวจพบ $Zn(OH)_2$ เฉพาะที่ pH=8-10 ในขณะที่ pH=12 ไม่พบเฟสดังกล่าว พบเพียงแค่ว่าเฟสของ ZnO เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อ pH เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการผลักกันของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า (electrostatic repulsion) ระหว่างประจุลบของกลุ่มไฮโดรฟิลิกของ SDS กับ $Zn(OH)_4^{2-}$ ทำให้ไม่สามารถพบเฟสของ $Zn(OH)_2$ และในรูปที่ 2.28 (ข) ที่ pH=8-10 พบว่าซิงค์ออกไซด์มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นแบบปริซึมมีขนาดใหญ่ และที่ pH=12 มีลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง ในขณะที่เมื่อค่า pH เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลง ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวพบว่าขนาดและทิศทางการก่อตัวของโครงสร้างซิงค์ออกไซด์สามารถควบคุมได้โดยตัวลดแรงตึงผิว SDS



รูปที่ 2.28 (ก) ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของ Zn^{2+} ที่ถูกปรับปรุงจากสารลดแรงตึงผิว SDS ที่ pH=8, pH=10 และ pH=12 และ (ข) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิงค์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยเตรียมจาก Zn^{2+} , SDS = 1:1 (a) pH=8, (b) pH=10, (c) pH=12 และ (d) pH=12 (ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน) [36]

Etacheri และคณะ [37] ได้ทำการวิจัยโดยพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของ ZnO ด้านการตอบสนองอาทิตย์ในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง โดยการเจือ Mg ลงไปใน ZnO ที่ปริมาณ 0.02 , 0.05, 0.1, 0.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากกราฟ XRD ยังไม่สามารถตรวจพบพีคเจือปนที่เป็นของ Mg พบแค่เพียงเฟสของ ZnO ซึ่งลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ และในรูป 2.30 (ข) ศึกษาสมบัติทางแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อเจือด้วย Mg โดยการนำไปใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ ในการย่อยสลายสีย้อม methylene blue พบว่า เมื่อมีการเจือด้วย Mg ที่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ จะให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายมีแนวโน้มดีขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ ZnO ที่ไม่มีการเจือ Mg เข้าไป ซึ่งในงานวิจัยนี้เค้าได้อธิบายประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของ ZnO ที่เกิดจากการเจือ Mg ลงไปแล้วส่งผลให้ พื้นที่ผิวสัมผัส surface area ของ ZnO มากขึ้น และ Mg มีส่วนช่วยทำให้ไม่ให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ระหว่าง คู่ e-hole ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ดีขึ้น

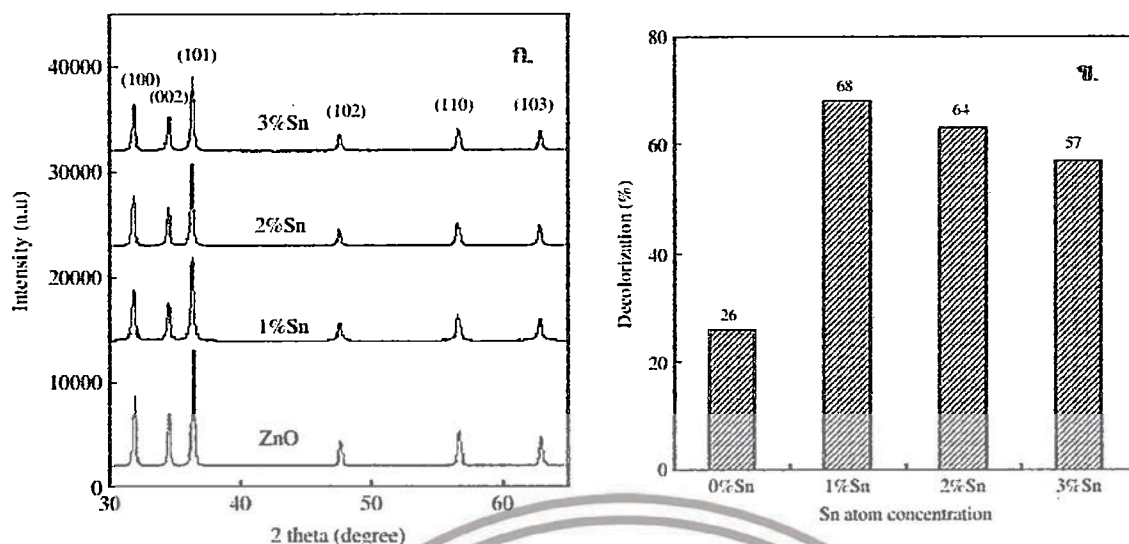
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 (ก) ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Mg doped ZnO ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือตั้งแต่ 0.02 , 0.05, 0.1, 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอาทิตย์ภายใต้การย่อยสลาย Methylene blue โดยใช้ ZnO และ ZnO ที่ถูกเจือด้วย Mg 0.10 เปอร์เซ็นต์ [37]

Zhang Li และคณะ [38] ได้ทำการวิจัยเพื่อที่จะพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของ ZnO ในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง และลดอัตราการรวมตัวกันใหม่ของ ZnO โดยการเจือโลหะดีบุกหรือทิน (Sn) เข้าไป 1-3 เปอร์เซ็นต์ ใน ZnO จากผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อมีการเจือโลหะ Sn ไป 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยังไม่พบเฟสของ Sn เจือปนอยู่ เพียงแต่ความเข้มของพีคลดลง และ ZnO ยังคงฟอร์มตัวเป็น ZnO เช่นเดิม จากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งด้วยปฏิกิริยาทางแสง โดยการย่อยสลายสีย้อม methyl orange ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเจือโลหะ Sn ด้วยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทำให้ ZnO สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุด ประมาณ 68 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 1 ชม. ที่ 2-3 เปอร์เซ็นต์ สามารถย่อยสลายได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ ZnO ที่ไม่มีการเจือ ซึ่งจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า โลหะ Sn สามารถที่จะช่วยลดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) ได้ และ โลหะ Sn จะเข้าไปสร้างชั้นพลังงานขึ้นมา 1 แถบพลังงาน โดยปกติแล้ว electron จะตกลงไปที่แถบวาเลนซ์ แต่ลงไปที่ยูนิเทิลของ Sn แทน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า surface barrier

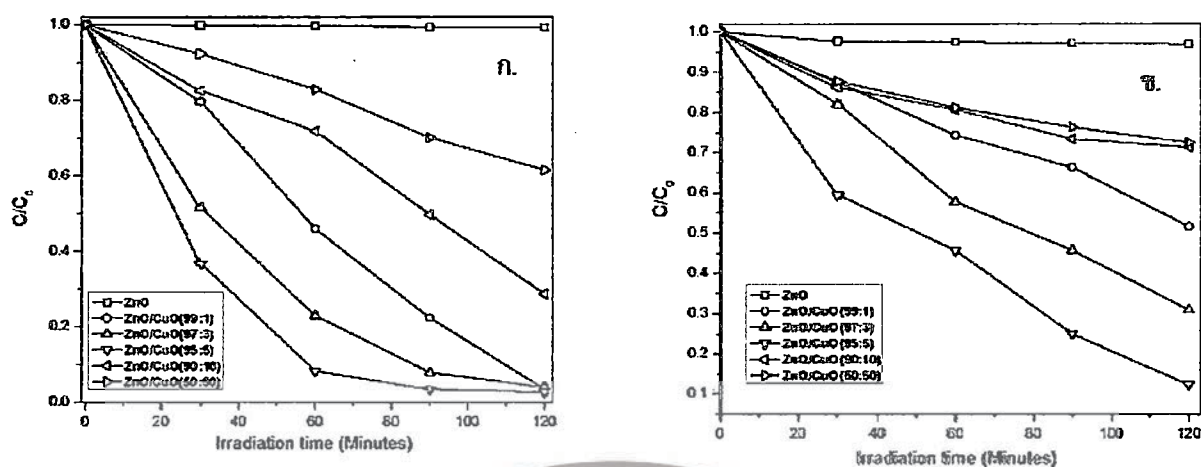
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 (ก) ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Sn doped ZnO ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือตั้งแต่ 1,2,3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอาทิตย์ภายใต้การย่อยสลาย Methylene orange โดยใช้ ZnO และ ZnO ที่ถูกเจือด้วย Sn [38]

Saravanan และคณะ [39] ได้พยายามที่จะลดข้อจำกัดทางแสงของ ZnO โดยทำการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ตอบสนองย่านตามองเห็นได้ดีขึ้น โดยการเจือ CuO เข้าไปเพื่อศึกษาการย่อยสลายสีย้อม methylene blue และ methyl orange ภายใต้การฉายแสงย่านตามองเห็น จากผลการวิเคราะห์ พบว่า CuO เริ่มมีการแยกเฟสเมื่อผสมเข้าไปปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของอัตราส่วนย่อยสลายสีย้อม methylene blue และ methyl orange ภายใต้การฉายแสงย่านตามองเห็นพบว่าปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่าง ZnO/CuO (95:5) เป็นปริมาณอัตราส่วนที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกอัตราส่วน จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า สารกึ่งตัวนำ ZnO/CuO เมื่ออยู่ร่วมกันจะส่งผลทำให้การย่อยสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงดียิ่งขึ้น ช่วยทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลง มีส่วนช่วยทำให้ดูดกลืนแสงย่านตามองเห็นได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ค่าคงที่การสลายตัวของ ZnO ที่เจือด้วย Cu เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงโดยการย่อยสลายสีย้อม (ก) Methylene blue และ (ข) Methyl orange ภายใต้แสงย่านตามองเห็น [39]

นอกจากนั้น Janyanthi และคณะ [40] ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาในผลึกนาโน ZnO เมื่อถูกเจือด้วยสารเจือชนิดต่างๆ อาทิ Li, Na, Mg, Cu และ Pr ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผลึกนาโน ZnO เจือด้วย Li, Na, Mg, Cu และ Pr ด้วยวิธีโซลิดสเตท (solid-state) พบว่าโครงสร้างของผลึกนาโน ZnO ที่ถูกเจือด้วยสารเจือชนิดต่างๆ มีโครงสร้างผลึกของเวอร์ตไซด์แบบหกเหลี่ยม (hexagonal wurtzite structure) รวมถึงโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ของ MgO ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รายงานถึงระดับของการรวมตัวของสารเจือในเฟสของ ZnO ไว้ว่า ถ้าสารเจือสามารถรวมตัวในเฟสของ ZnO ได้ดี นั่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ทำให้ตัวอย่างที่ได้มีความเป็นผลึกที่ดี โดยสังเกตได้จากค่า intensity ของตัวอย่างซึ่งระดับของการเปลี่ยนแปลงค่าแลตทิซพารามิเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่ารัศมีอะตอม (ionic radius) ของสารเจือนั้นมีค่าใกล้เคียงกับรัศมีอะตอมของ ZnO มากน้อยเพียงใด ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันมากก็จะทำให้สารเจือนั้นสามารถรวมตัวกับเฟสของ ZnO ได้ดี ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของผลึกนาโน ZnO เมื่อถูกเจือด้วยสารเจือชนิดต่างๆ นั้นพบว่าเมื่อเจือด้วย Li และ Na ตัวอย่างจะมีรูปร่างแบบ nanorods แต่ยังคงมีความเป็น nanorods น้อยกว่าการเจือด้วย Cu ตัวอย่างที่ถูกเจือด้วย Pr นั้นมีรูปร่างแบบอนุภาคกลมขนาดใหญ่มาก และตัวอย่างที่ถูกเจือด้วย Mg นั้นมีรูปร่างแบบกลีบดอกไม้ และพวกเขาายังพบว่าการเจือสารเจือที่ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ นั้นได้ตัวอย่างที่มีรูปร่างแบบแท่งนาโน (nanorods) ที่ดีที่สุด

งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการรวมตัวกันของอะตอมของสารเจือในแลตทิซของ ZnO นั้นจะช่วยปรับปรุงความเป็นผลึกของตัวอย่างและได้ตัวอย่างที่มีรูปร่างแบบแท่งนาโน (nanorods) ที่ดี (ใช้ปริมาณสารเจือที่ 2 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งการรวมตัวกันระหว่างสารเจือและเฟสของ ZnO นั้นจะรวมตัวกันได้ดีถ้ารัศมีอะตอมของสารเจือมีค่าใกล้เคียงกับรัศมีอะตอมของ ZnO และการใช้สารเจือที่ต่างกันก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sonal Singh และคณะ [41] ได้ทำการสังเคราะห์ ZnO และ Cu-doped ZnO โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณการเจือ Cu ที่ 5, 10, 15 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และ คอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) เป็นสารตั้งต้น จากนั้นใช้สารละลายแอมโมเนียหยดลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาโดยจะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 7-8 และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศปกติ เมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะเห็นอนุภาคเป็นแบบ quasi-spherical และจากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อเจือคอปเปอร์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปจะเห็นเฟสของ CuO เริ่มมีการแยกออกมา ซึ่งเป็น secondary phase ของ CuO ดังแสดงในรูปที่ เมื่อนำไปทดสอบค่า DC electrical resistivity พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือคอปเปอร์เพิ่มขึ้น และ activation จะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือคอปเปอร์เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน

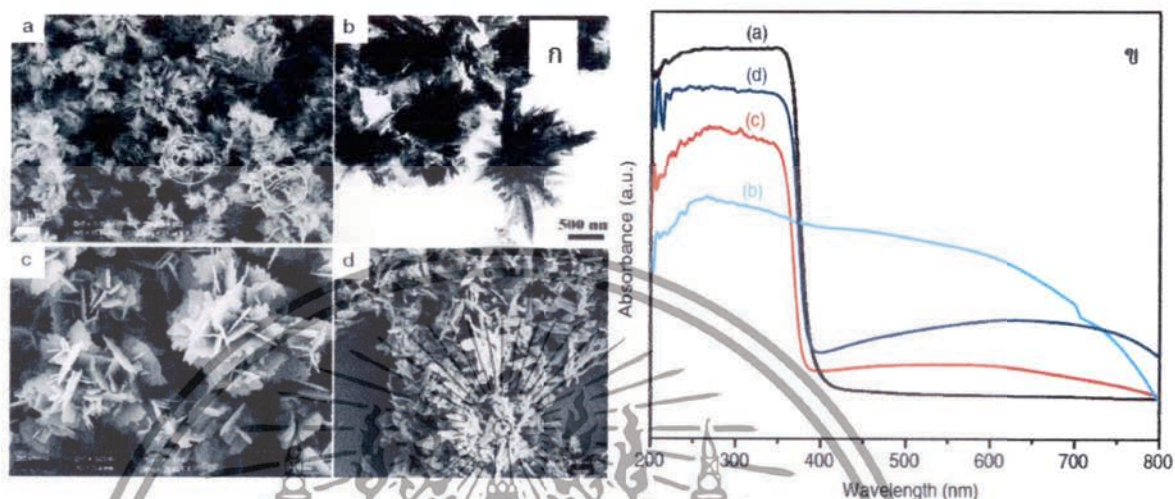
จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงการเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ได้โดยการเจือธาตุบางชนิดที่เหมาะสมเข้าไป



รูปที่ 2.32 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO และ Cu-doped ZnO โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณการเจือ Cu ที่ 5, 10, 15 20, 25 และ 30 ตามลำดับ [41]

Benxia Li และคณะ [42] ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบ ZnO-CuO ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยใช้ $ZnCl_2$ กับ $CuSO_4$ เป็นสารตั้งต้นละลายลงในน้ำกลั่น แล้วนำไปผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกวนนาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งวัสดุประกอบระหว่าง ZnO-CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีนี้มีโครงสร้าง 3D-Nanoflower ดังแสดงในรูปที่ 2.33(ก) นอกจากนี้จากผลการทดลองวัดการดูดกลืนแสง โดยที่ ZnO เพียงอย่างเดียวจะสามารถดูดกลืนแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดีที่สุดในช่วง 200-400 นาโนเมตร ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CuO เพียงอย่างเดียวจะสามารถดูดกลืนแสงได้ทุกช่วง แต่สำหรับสารประกอบ ZnO-CuO นั้นสามารถดูดกลืนในย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดีมากไปจนถึงย่านอินฟราเรดด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2.33(ข) โดยที่วัสดุประกอบที่เตรียมได้โดยวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในการย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B ด้วยการกระตุ้นด้วยแสง



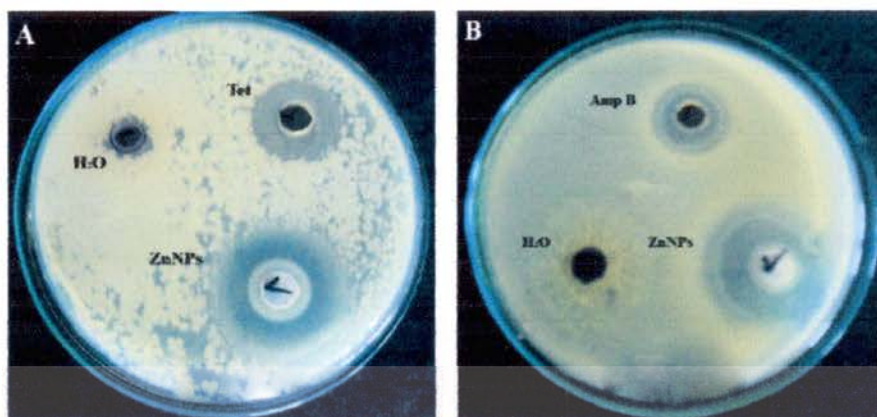
รูปที่ 2.33 (ก) ภาพถ่าย SEM และ TEM ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ (a) ภาพ SEM ของ ZnO-CuO (b) ภาพ TEM ของ ZnO-CuO (c) ภาพ SEM ของ ZnO และ (d) ภาพ SEM ของ CuO ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอน และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (a) ZnO, (b) CuO, (c) ZnO-CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีตกตะกอนรวม, (d) Physical mixture ของ ZnO-CuO [42]

Saravanan และคณะ [43] ได้ศึกษาการย่อยสลายสีย้อม methylene blue และ methyl orange โดยใช้ ZnO และ ZnO/CuO ที่มีอัตราส่วนการคอมโพสิตต่างกัน (ZnO:CuO 99:1, 97:3, 95:5, 90:10 และ 50:50 ตามลำดับ) ภายใต้การฉายแสงยูวีตามมองเห็น จากผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่า ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแท่ง และวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่าง ZnO/CuO ที่มีอัตราส่วนต่างกันนั้น มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเปลี่ยนไป ตามปริมาณน้ำหนักของ CuO ที่ผสมเข้าไป ยิ่งปริมาณของ CuO เพิ่มมากขึ้นจะยิ่งส่งผลทำให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นอนุภาคกิ่งทรงกลมมากขึ้น ในส่วนของการดูดกลืนแสงในย่านตามมองเห็น ZnO/CuO แสดงการดูดกลืนแสงได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ ZnO แต่เมื่อปริมาณ ZnO/CuO (90:10) และ ZnO/CuO (50:50) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงแย่ง จากนั้นได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม methylene blue และ methylene orange ภายใต้การฉายแสงยูวีตามมองเห็นพบว่าปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่าง ZnO/CuO (95:5) เป็นปริมาณอัตราส่วนที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกอัตราส่วน จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า สารกึ่งตัวนำ ZnO/CuO เมื่ออยู่ร่วมกันจะส่งผลให้การย่อยสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงดีขึ้น ช่วยทำให้ค่าของว่างแถบพลังงานลดลง มีส่วนช่วยทำให้ดูดกลืนแสงยูวีตามมองเห็นได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Karimi และคณะ [44] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน ZnO ที่เจือด้วย Cu โดยใช้กระบวนการ sonochemical และได้ศึกษาผลการใช้อนุภาคนาโน ZnO ที่เตรียมขึ้นเป็นตัวตรวจจับไอระเหยของเอทานอลโดยเปรียบเทียบกับอนุภาค ZnO ขนาดไมโครเชิงพาณิชย์ จากผลการวิจัยพบว่าอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu มีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal สำหรับอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu นั้นไม่ปรากฏโครงสร้างผลึกของ Cu หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ อาทิ CuO ในตัวอย่างที่เตรียมได้ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่ไอออน Cu^{2+} มีขนาดใกล้เคียงกับไอออน Zn^{2+} จึงสามารถแทนที่ Zn^{2+} ในแลตทิซของ ZnO ได้ เมื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโน ZnO พบว่ามีรูปร่างอนุภาคแบบเม็ดกระจายตัวและรวมตัวกันบางจุด ส่วนอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu มีรูปร่างอนุภาคแบบเม็ดกระจายตัวมีขนาดของเกรน 40-80 นาโนเมตร ส่วนอนุภาค ZnO ขนาดไมโครมีรูปร่างอนุภาคแบบเม็ดเกาะรวมกันมีขนาด 0.6-0.8 ไมโครเมตร องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu จากการวิเคราะห์ด้วย EDXS พบว่าหลักๆ ประกอบด้วย Zn และ O มีปริมาณ Cu เล็กน้อยซึ่งอัตราส่วนอะตอมของ Cu ใน Cu เจืออนุภาคนาโน ZnO มีอยู่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลการนำตัวอย่างอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu ไปใช้เป็นตัวตรวจจับไอระเหยของเอทานอลและสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับอนุภาคไมโคร ZnO เชิงพาณิชย์ พบว่าตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจากตัวอย่างทั้งหมดนั้นแสดงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductor) คือค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพราะเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาค ZnO ขนาดไมโคร, อนุภาค ZnO ขนาดนาโน และอนุภาค ZnO ขนาดนาโนเจือด้วย Cu พบว่าอนุภาค ZnO ขนาดนาโนเจือด้วย Cu นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดและอนุภาคนาโน ZnO เจือด้วย Cu ยังมีคุณลักษณะของตัวตรวจจับที่ดีกว่าอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาค ZnO ขนาดไมโคร เนื่องมาจากการมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและการเจือด้วย Cu นั้นทำให้ไอออนของออกซิเจนเกิดการโยกย้ายได้ง่ายและมีที่ว่างของอิเล็กตรอนอิสระสำหรับก๊าซเป้าหมาย (เอทานอล)

นอกจากนั้น Jayaseela และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราทั้งหมด 7 ชนิดด้วยการเติมอนุภาคนาโนของ ZnO ลงไปในแบคทีเรีย *Aeromonas hydrophilia* เพื่อใช้เป็นตัวช่วยในการยับยั้งทั้งแบคทีเรียและเชื้อราตัวอื่นๆ ผู้วิจัยพบว่าอนุภาคนาโน ZnO ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas aeruginosa* และเชื้อราชนิด *Aspergillus flavus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงด้วยภาพถ่ายในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 บริเวณการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราโดยใช้อนุภาคนาโน ZnO (a) แบคทีเรียชนิด *P. aeruginosa* (22 มิลลิเมตร) and (b) เชื้อราชนิด *A. flavus* (19 มิลลิเมตร) [45]

Mageshwari และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราเช่นเดียวกัน แต่ผู้ทำการวิจัยได้เลือกใช้ CuO ที่มีลักษณะอนุภาคคล้ายดอกไม้เป็นตัวยับยั้ง โดยการสังเคราะห์จากคอปเปอร์ไนเตรต เป็นสารตั้งต้น และ CuO ที่เตรียมได้ ไปละลายในสารละลายแอมโมเนีย, น้ำ, เมททานอล และเฮกเซน เพื่อเปรียบเทียบผลกับยาที่ใช้ต้านแบคทีเรียและเชื้อราคือเตตราไซคลิน (tetracycline) แสดงดังรูปที่ 2.35 ผลการวิจัยพบว่า CuO สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อละลายในน้ำและแอมโมเนีย แต่ในเตตราไซคลินยังคงแสดงบริเวณการยับยั้งทั้งแบคทีเรียและเชื้อราได้บริเวณที่กว้างกว่า ผู้ทำการวิจัยยังเชื่อว่า CuO ที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายดอกไม้สามารถยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียได้ดี คาดว่าในอนาคตอนุภาคนาโน CuO จะเป็นวัสดุที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในทางวัสดุชีวภาพได้



รูปที่ 2.35 บริเวณการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราโดยใช้อนุภาคนาโน CuO ที่ละลายในสารละลายที่แตกต่างกัน [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุซิงค์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ ที่ได้นำเสนอ นั้น จะเห็นถึง สมบัติและหน้าที่ที่หลากหลายของวัสดุทั้งสอง และความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุทั้งสองในระดับ นาโน โดยใช้วิธีตกตะกอนร่วม เพื่อให้ได้วัสดุประกอบระหว่างซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่สามารถทำงาน ได้หลายอย่างพร้อมกันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

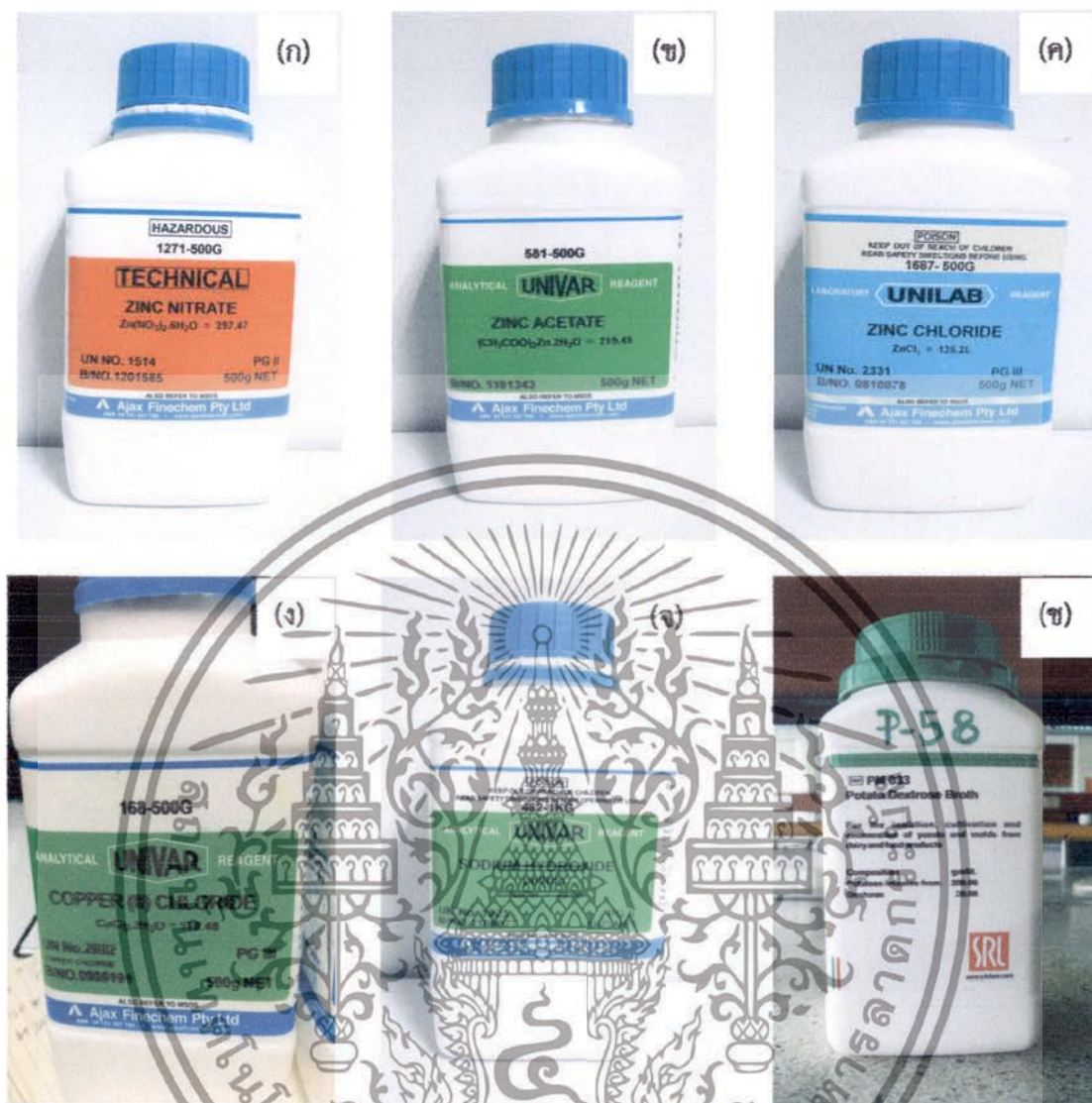
ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการสังเคราะห์สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ และ คอปเปอร์ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม ซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่สะดวก ไม่ยุ่งยาก ราคาถูก เหมาะสมกับการสังเคราะห์สารประกอบโลหะออกไซด์ ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและสังเคราะห์ได้ครั้งละจำนวนมาก นอกจากนั้นแล้วยังสามารถทำในระบบเปิดได้ และได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสารประกอบ ได้แก่ การใช้สารตั้งต้นต่างชนิดกันในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ และทำการศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้น ที่อาจส่งผลกระทบต่อลักษณะทางโครงสร้างหรือสมบัติด้านอื่นๆ และจากผลการทดลองข้างต้น ได้นำซิงค์ออกไซด์มาทำการผสมด้วยคอปเปอร์ ในปริมาณอัตราส่วนที่ต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติทางโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณการผสมคอปเปอร์ ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี, วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวีวิซีเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวิซีเบิลเนียออาร์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และศึกษาสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยศึกษาการย่อยสลายสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B ; RhB) ภายใต้การกระตุ้นด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต และหลอดซินอน ศึกษาสมบัติในการยับยั้งเชื้อรา *Trichoderma* spp. และในส่วนสุดท้ายได้นำสารประกอบที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติในการทำเป็นขั้วทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$, Zinc chloride)
- ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, Zinc acetate dehydrate]
- ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต [$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, Zinc nitrate hexahydrate]
- คอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต [$CuCl_2 \cdot 2H_2O$, Copper chloride dehydrate]
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, Sodium hydroxide)
- น้ำปลอดประจุ (De-ionization water)
- เอทานอล 95 % (C_2H_5OH , ethanol)
- อาหารสำเร็จรูป Potato Dextrose Broth (PDB)
- วุ้นผง (Agar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (ก) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต (ข) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ค) ซิงค์คลอไรด์ (ง) คอปเปอร์คลอไรด์ ไดไฮเดรต และ (จ) โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.2 อุปกรณ์

- เครื่องกวนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส
- เตาอบความร้อน
- เครื่องแก้ว
- คูชิเบล (Crucible)
- บิวเรต (buret)
- กระดาษกรองสาร
- บีมลัม

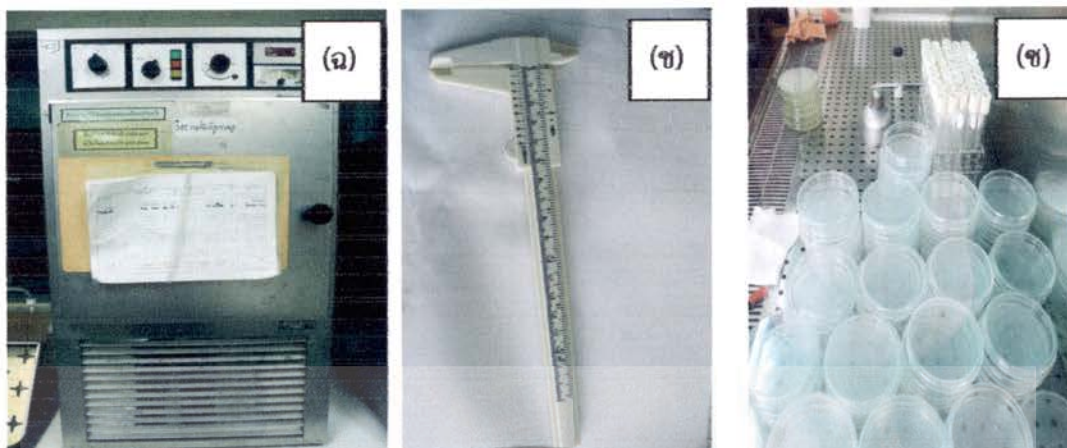
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดกรองแบบสุญญากาศ
- จานเพาะเชื้อชนิดพลาสติก
- ตู้บ่มเชื้อ
- กระจกบอทวง
- ปิเปต
- ลวดเขี่ยเชื้อ
- แท่งแก้วรูปตัวแอล
- ตะเกียงแอลกอฮอล์
- เวอร์เนียร์



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) เครื่องกรองสาร (ข) เครื่องซังละเอียต 3 ตำแหน่ง (ค) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (ง) เต้าอบความร้อน (จ) เต้าเผา (ฉ) ตู้บ่มเชื้อ (ช) เวอร์เนียร์ และ (ซ) จานเพาะเชื้อชนิดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 (ต่อ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) เครื่องกวนสาร (ข) เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง (ค) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (ง) เต้าอบความร้อน (จ) เต้าเผา (ฉ) ตู้บ่มเชื้อ (ช) เวอร์เนีย และ (ซ) จานเพาะเชื้อชนิดพลาสติก

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง

3.2.1 การเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันโดยวิธีตกตะกอน

1) ใช้สารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$), ซิงค์อะซิเตต [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$] และ ซิงค์ไนเตรท [$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$] เป็นสารตั้งต้น

2) เตรียมสารละลายซิงค์คลอไรด์, ซิงค์อะซิเตต และ ซิงค์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ โดยนำสารตั้งต้นแต่ละชนิดละลายในน้ำปลอดประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนให้ละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ดังตารางที่ 3.1

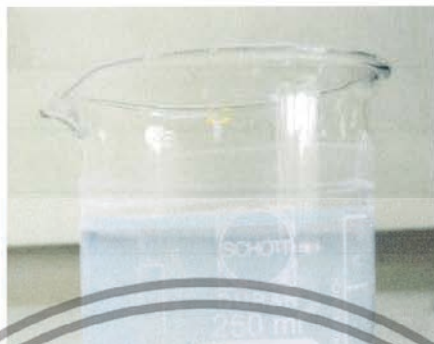
3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ โดยละลายในน้ำปลอดประจุ จากนั้นกวนให้ละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

4) หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายซิงค์คลอไรด์, ซิงค์อะซิเตต และ ซิงค์ไนเตรต ขณะที่กวนไปด้วยจะเกิดการตกตะกอนสีขาวและหยดสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่า $pH = 12-13$ กวนต่อเป็นเวลา 20 นาที ปลดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้สารเกิดการตกตะกอนโดยจะเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับตะกอนดังรูปที่ 3.3

5) ดูดน้ำออกที่อยู่ชั้นบนออกให้เหลือแต่ตะกอนด้านล่าง แล้วนำตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำปลอดประจุหลายๆครั้ง จนกระทั่งมีค่า $pH = 7$ ครั้งสุดท้ายล้างด้วยเอทานอล และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำผงที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงนาโนซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์, วิเคราะห์สมบัติเชิงสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.3 การตกตะกอนของซิงค์ออกไซด์

3.2.2 การเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม

1) เตรียมสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.4, 0.7, 1.0 โมลาร์ ดังตารางที่ 3.2

2) นำซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน ละลายในน้ำปooledประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนให้ละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ โดยละลายในน้ำปooledประจุ จากนั้นกวนให้ละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

4) หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปนสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ขณะที่กวนไปด้วยจะเกิดการตกตะกอนสีขาวและหยดสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่า $pH = 12-13$ กวนต่อเป็นเวลา 20 นาที ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้สารเกิดการตกตะกอนโดยจะเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับตะกอน

5) ดูดน้ำออกที่อยู่ชั้นบนออกให้เหลือแต่ตะกอนด้านล่าง แล้วนำตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำปooledประจุหลายๆครั้ง จนกระทั่งมีค่า $pH = 7$ ครั้งสุดท้ายล้างด้วยเอทานอล และนำไปอบที่ตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำผงที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงนาโนซิงค์ออกไซด์

6) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์, วิเคราะห์สมบัติเชิงสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณอัตราส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่างกันด้วยวิธีตกตะกอนร่วม

1) ใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และคอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) เป็นสารตั้งต้น ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณการผสมคอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต ดังตารางที่ 3.3

3) ผสมซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และคอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) ตามที่ได้คำนวณไว้แล้วละลายในน้ำปลอดประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

4) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ โดยละลายในน้ำปลอดประจุ จากนั้นกวนให้สารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

5) เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงไปในสารละลายซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรตผสมคอปเปอร์ไนเตรทไดไฮเดรต ขณะที่กวนไปด้วยสารละลายก็จะค่อยๆเกิดตะกอนสีขาวและเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง มีค่า $pH = 12-13$ แล้วกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที ปลดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้สารตกตะกอนโดยจะเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับตะกอน

6) ดูดน้ำออกที่อยู่ชั้นบนออกให้เหลือแต่ตะกอนด้านล่าง นำตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำปลอดประจุหลายครั้ง จนกระทั่งมีค่า $pH = 7$ ครั้งสุดท้ายล้างด้วยเอทานอล และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

7) นำผงที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

8) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์, วิเคราะห์สมบัติเชิงสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตารางที่ 3.1 ตารางปริมาณการเตรียมสารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน

สารตั้งต้น	ความเข้มข้นในน้ำปลอดประจุ 100 มิลลิลิตร (โมลาร์)	ปริมาณสาร (กรัม)
ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)	0.4	5.4512
ซิงค์อะซิเตต [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$]	0.4	8.7796
ซิงค์ไนเตรท [$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$]	0.4	11.8988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตารางปริมาณการเตรียมสารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

ปริมาณความเข้มข้นของสาร โดยใช้ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นสารตั้งต้น (โมลาร์) ในน้ำปอดประจุ 100 มิลลิลิตร (โมลาร์)	ปริมาณสาร (กรัม)
0.1	1.3628
0.4	5.4512
0.7	9.5396
1.0	13.628

ตารางที่ 3.3 ปริมาณการผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์และคอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรตในอัตราส่วน
ต่างๆ ในน้ำปอดประจุ 100 มิลลิลิตร

ปริมาณอัตราส่วนของสาร ซิงค์ : คอปเปอร์ (%)	ซิงค์คลอไรด์ (g)	คอปเปอร์คลอไรด์ ไดไฮเดรต (g)
100 : 0	5.4592	
99.5 : 0.5	5.4239	0.0340
99 : 1	5.39668	0.06819
95 : 5	5.17864	0.34096
90 : 10	4.90608	0.68192
70 : 30	3.81584	2.04596
50 : 50	2.7256	3.4096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ขั้นตอนการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้การเปล่งแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ตและหลอดซีนอน

สารละลายโรดามาย บี (Rhodamine B ; RhB) จัดเป็นสารประกอบเคมีและเป็นสีย้อมชนิดหนึ่ง ซึ่งมักพบได้บริเวณโรงงานทอผ้าหรือบริเวณโรงงานสี ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เป็นตัวทดสอบคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายของสารตัวอย่างโดยใช้ ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนการผสมต่างๆ ภายใต้การเปล่งแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ตและหลอดซีนอน เพื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมภายใต้แสงทั้งสองย่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการผสมด้วยคอปเปอร์ โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังต่อไปนี้ (ทั้งสองการทดลองเงื่อนไขเหมือนกัน แตกต่างกันเพียงแหล่งกำเนิดแสงเท่านั้น)

- 1) เตรียมสารละลายโรดามาย บี ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมผงซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ 100 : 0, 99.5 : 0.5 , 99 : 1 และ 95 : 5
- 3) นำสารตัวอย่างแต่ละเงื่อนไขปริมาณ 0.1 กรัม เติมลงในสารละลายโรดามาย บี
- 4) นำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กในที่มีด ประมาณ 30 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของสารตัวอย่างในสารละลายโรดามาย บี
- 5) นำสารละลายตั้งกล่าวไปวางไว้ภายใต้แสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ต หรือหลอดซีนอน โดยมีระยะห่างประมาณ 15 เซนติเมตร พร้อมทั้งคนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 180 นาที โดยจะนำทำการดูดสารละลายโรดามาย บี ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ในช่วงเวลาที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ครึ่งละ 5 มิลลิลิตร
- 6) นำสารละลายโรดามาย บี ในแต่ละช่วงเวลาทำการจัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีวิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 7) เขียนกราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนแสงของโรดามาย บี เทียบกับเวลา
- 8) คำนวณหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโรดามาย บี ด้วยผงซิงค์ออกไซด์เจือด้วยคอปเปอร์ ที่ความเข้มข้นของสารเจือที่แตกต่างกัน โดยใช้ความสัมพันธ์ Pseudo first order ดังสมการ (3.32-3.33)

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (3.32)$$

และ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = kt \quad (3.33)$$

- เมื่อ k คือ ค่าคงที่การย่อยสลายของโรดามายบี (min^{-1})
 C_0 คือ ความเข้มข้นของโรดามาย บี ที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$)
 C คือ ความเข้มข้นของโรดามาย บี หลังจากการฉายแสง ($t=t$)
 t คือ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ขั้นตอนการศึกษาผลการยับยั้งเชื้อรา โดยใช้ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่แตกต่างกัน

3.2.5.1 การเตรียมอาหารสำเร็จรูป PDB สำหรับเลี้ยงเชื้อ

เตรียมอาหาร PDB สำหรับเลี้ยงเชื้อตามสูตร โดยชั่งอาหารสำเร็จรูป 24 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร คนให้ละลาย จากนั้นชั่งวุ้น 15 กรัม โดยละลาย ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตรและต้มให้เดือด เมื่อวุ้นละลายดีแล้ว นำไปผสมกับน้ำของอาหารสำเร็จรูป จะได้ปริมาตรน้ำ 1,000 มิลลิลิตร พร้อมอุ่นให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำอาหาร PDB ที่ได้เทใส่ขวดฝาเกลียว (medium bottle) ปิดฝาพอหลวมๆนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำอาหารเลี้ยงเชื้อออกจากหม้อนึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำอาหารเลี้ยงเชื้อออกจากหม้อนึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส แล้วนำไปแช่ใน water bath อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (หรือตู้ปรับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) เทอาหารลงในจานอาหารที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้วด้วยวิธีปลอดเชื้อ

3.2.5.2 การทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา

นำสารซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน มาทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น ที่ระดับความเข้มข้น 5,10,15 ไมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อด้วยวิธี Agar dilution method [47] ทดสอบโดยการเจือจางสารทดสอบในอาหาร PDA (Potato dextros agar) และถ่ายเชื้อลงบนผิวของอาหาร สังเกตการเจริญของเชื้อภายหลังจากนำไปบ่มชั่วคราวระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นบ่มเชื้อไว้เป็นเวลา 2 วัน ที่ตู้บ่มเชื้ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกผลโดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของบริเวณการเจริญเติบโตของเชื้อราอาหารที่ผสมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตรวจสอบการยับยั้งของการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยวัดการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เกิดขึ้นภายหลัง จากการบ่มเชื้อเปรียบเทียบกับเจริญเติบโตของเชื้อราในจานเพาะเชื้อที่เป็นตัวควบคุมที่ใช้น้ำปลอดประจุในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.4 อาหารเลี้ยงเชื้อ PDB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

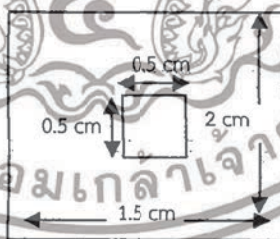
3.2.6 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้ซิงค์ คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้เป็นขั้วทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.2.6.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า

- 1.) ตัดกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 2x1.5 เซนติเมตร
- 2.) เตรียมกระจกนำไฟฟ้าไปล้างน้ำยาล้างจาน จากนั้นนำไปแช่ในอะซิโตน ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที และแช่ในสารละลายไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol: IPA) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- 3.) นำกระจกนำไฟฟ้าที่ล้างเรียบร้อยแล้ว เข้าไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

3.2.6.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode)

- 1.) เตรียมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ 100 : 0, 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5 และ 90 : 10 ใส่ในโกรงบดยา เติมน้ำปอดประจุ และสารละลายเอทานอล ปริมาณอย่างละ 1 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน จากนั้นเติมกรดฟลูออโรซิลิสิก (Fluorosilicic acid) จำนวน 1 หยด และคนให้เข้ากันจนสารละลายมีความหนืดที่พอเหมาะ
- 2.) นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไปเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า เป็นขนาด 0.5x0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีและนำไปแช่ N719 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



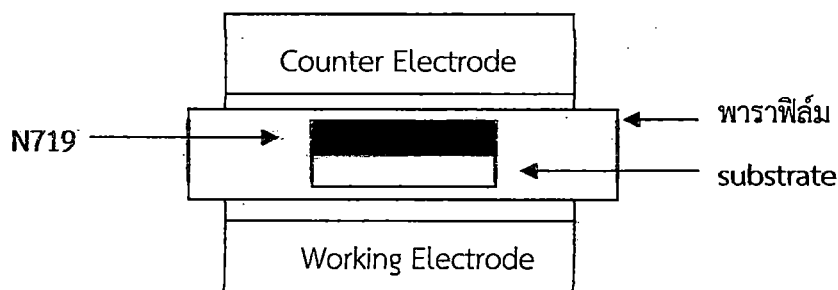
รูปที่ 3.5 ขั้วไฟฟ้าทำงาน

3.2.6.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วกระตุ้น (Counter Electrode)

- 1.) นำสารแพลทินัม (Pt) หยดลงกระจกนำไฟฟ้า จำนวน 2-3 หยด เพื่อให้สารกระจายโดยทั่ว
- 2.) นำกระจกนำไฟฟ้าที่หยดสารแพลทินัม ไปเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.4 ขั้นตอนการประกอบขั้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการประกอบขั้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

- 1.) นำสารละลายอิเล็กโทรไลต์หยดลงบนขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) จำนวน 2 หยด
- 2.) นำแผ่นพาราฟิล์ม (Patafilm) ที่ตัดไว้เป็นรูตรงกลางขนาด 0.5x0.5 เซนติเมตร มาวางบนขั้วไฟฟ้าทำงาน หลังจากหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์และนำขั้วกระตุ้นมาประกบเข้าหากัน เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังรูปที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สรุปแผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลายในการทดลอง

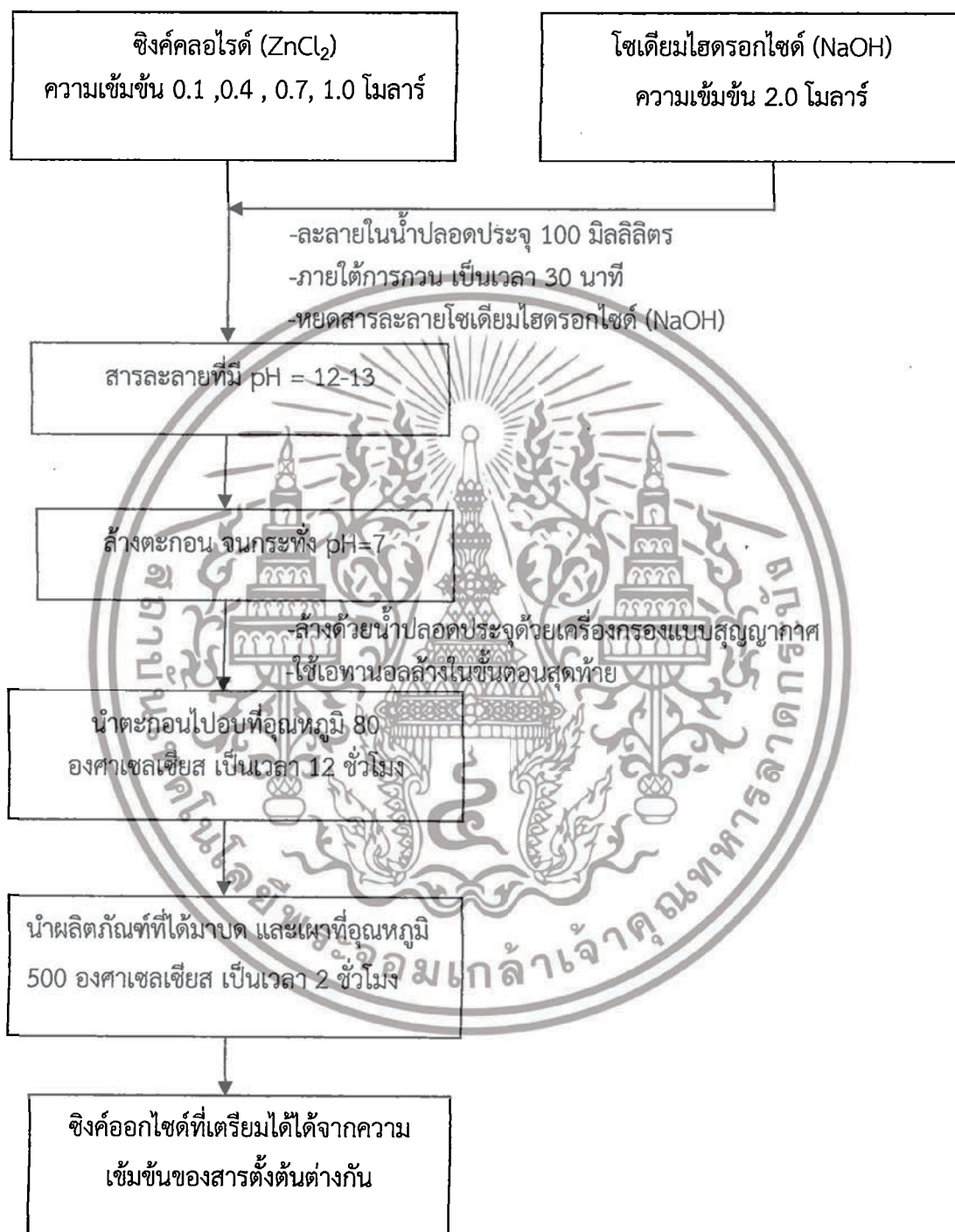
3.3.1 แผนภาพการเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันโดยวิธีตกตะกอนร่วม



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์ออกไซด์จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

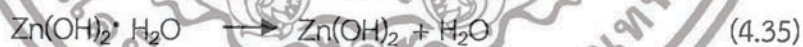
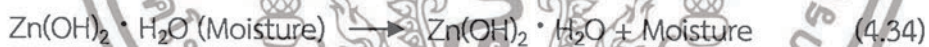
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

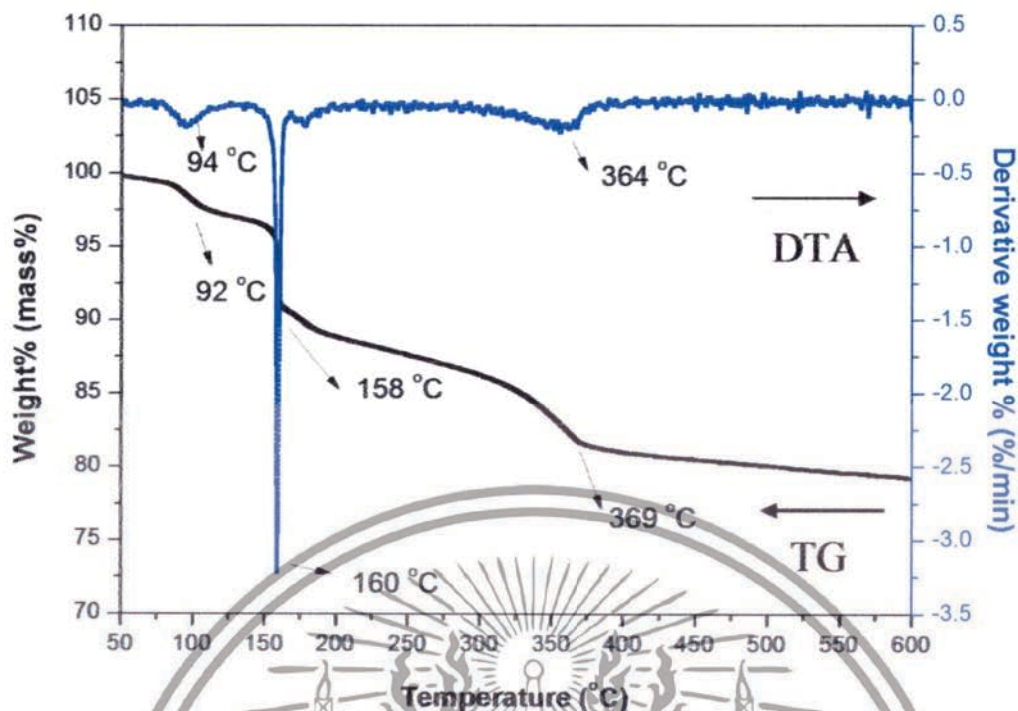
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารซิงค์ไฮดรอกไซด์ [Zn(OH)₂] ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

4.1.1. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารซิงค์ไฮดรอกไซด์ [Zn(OH)₂]

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายซิงค์ไฮดรอกไซด์ โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อสารตั้งต้นได้รับความร้อน จะเกิดการดูดกลืนพลังงานความร้อน เพื่อใช้ในการสลายตัว เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายตั้งต้นซิงค์ไฮดรอกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 50-600 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของมวลสารเป็น 3 ช่วงของการสลายตัว โดยช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 92 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารลดลง ซึ่งเป็นช่วงการสลายของความชื้นที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง แสดงได้ดังสมการการสลายตัวตามสมการที่ 4.34 ในช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 158 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักไปบางส่วนไป ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งแสดงการสลายตัวได้ดังสมการที่ 4.35 และในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้ายอยู่ที่ 369 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นช่วงการสลายตัวของกลุ่มไฮดรอกไซด์ที่สลายไป แสดงได้ดังสมการที่ 4.36 สังเกตได้ว่าหลังจากนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้น ดังนั้นโมเลกุลของซิงค์จะเริ่มรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน ส่งผลให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

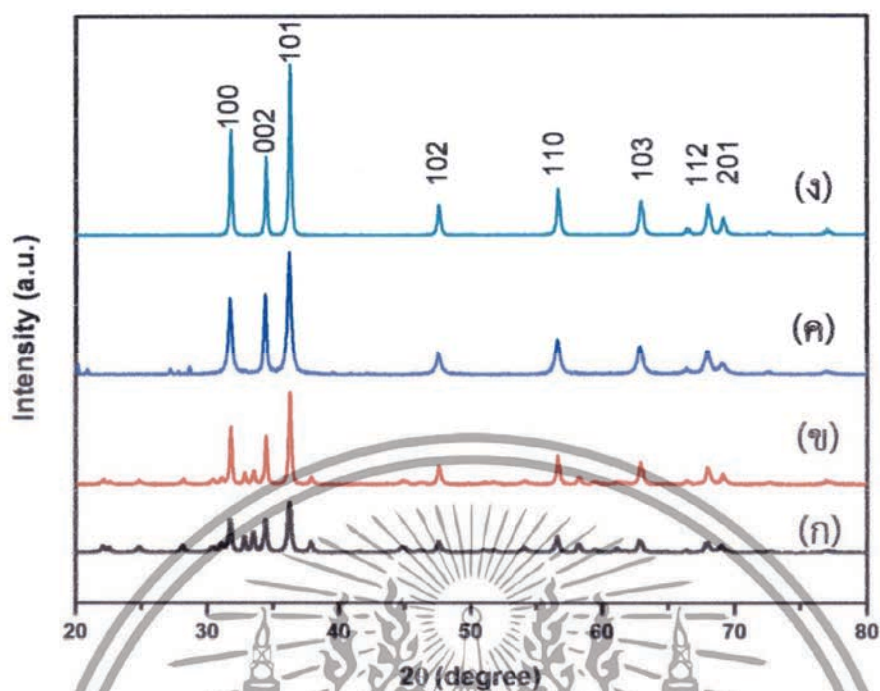


รูปที่ 4.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารละลายตั้งต้น ซิงค์ไดไฮดรอกไซด์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน

4.1.2. ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซิงค์ออกไซด์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผา

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผาที่ 200 , 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.2 พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดที่ตำแหน่ง 31.73° และ 36.21° ตรงกับระนาบ 100 และ 101 ตามลำดับ ซึ่งระนาบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเป็นเฟสของซิงค์ออกไซด์ แต่ที่อุณหภูมิการเผาที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบเฟสเจือปนเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากสารตั้งต้นยังคงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารละลายตั้งต้น ซิงค์ไดไฮดรอกไซด์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ในรูปที่ 4.1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นการสลายตัวของน้ำที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซิงค์ไดไฮดรอกไซด์จะเริ่มก่อตัวเป็นซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิเผา 400 องศาเซลเซียสยังคงพบในช่วงตำแหน่ง 20-30 องศา ซึ่งคาดว่าเกิดจากเฟสยังไม่บริสุทธิ์หรือมีสารเจือปนที่ยังไม่หมดไป แต่ที่อุณหภูมิเผาที่ 500 องศาเซลเซียสพบว่าทุกตำแหน่งในกราฟสัมพันธ์กับโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ใน JCPDS Card No. 36-1451 ด้วยเหตุนี้จึงเลือกอุณหภูมิดังกล่าวมาใช้ในการเผาเพื่อให้ซิงค์ไดไฮดรอกไซด์เกิดการฟอร์มตัวเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารตั้งต้นซิงค์ไดไฮดรอกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผาที่ (ก) 200 (ข) 300 (ค) 400 และ (ง.) 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมจากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน

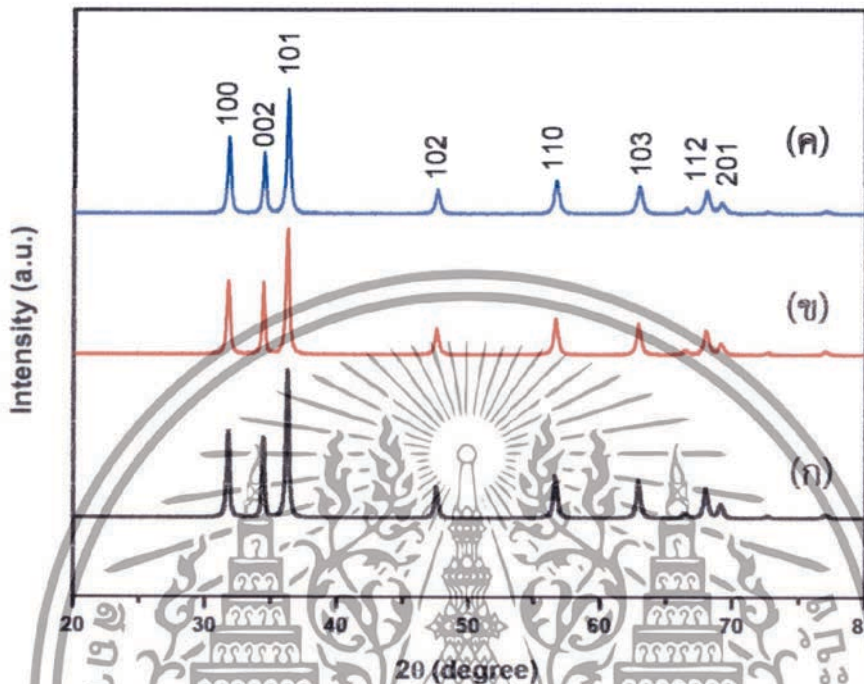
4.2.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนภายใต้เงื่อนไขสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเหมือนกันที่ตำแหน่ง $2\theta = 31.73^\circ, 34.40^\circ, 36.21^\circ, 47.49^\circ, 56.52^\circ, 62.89^\circ, 67.99^\circ$ และ 69.10° สัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ตามลำดับ สอดคล้องกับเฟสของซิงค์ออกไซด์ JCPDS Card No. 36-1451 ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ (Hexagonal wurtzite) แต่ความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากซิงค์อะซิเตดมีค่าสูงสุด และเมื่อทำการคำนวณขนาดของผลึกด้วยสมการของ Debye-Scherrer's Equation ดังสมการที่ 4.37 พบว่าซิงค์อะซิเตดไดไฮดรอกไซด์มีขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และซิงค์คลอไรด์มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเพียง 38 นาโนเมตร แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Debye-Scherrer's Equation

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.37)$$



รูปที่ 4.3 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารตั้งต้น (ก) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ข) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต และ (ค) ซิงค์คลอไรด์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมจากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน

สารตั้งต้น	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต	77.1
ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต	53.5
ซิงค์คลอไรด์	38.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจาก ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต และซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต มีลักษณะรูปร่างเป็นแบบแฉกดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก-ข) ส่วนผง นาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์ มีรูปร่างเป็นอนุภาคทรงกลมและกึ่งทรงกลมดังแสดงในรูป 4.4 (ค) สาเหตุที่ซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น มีรูปร่างที่แตกต่างกัน สาเหตุอาจเกิดมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนขณะทำปฏิกิริยา ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดนี้มีหมู่ที่แตกต่างกันที่กันคือ CH_3COO^- , NO_3^- และ Cl^- สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srikanth และคณะ [35] ซึ่งได้ศึกษาถึงไอออนลบในปฏิกิริยาที่มีผลต่อลักษณะทางโครงสร้างพื้นผิว (surface modifier) ซึ่งมีผลทำให้พื้นผิวที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะแตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าขนาดของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่า 100 นาโนเมตรทั้งสิ้นสอดคล้องกับผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และผลการวิเคราะห์นี้ยังบ่งชี้ว่าผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์ มีการก่อตัวในโครงสร้างที่ชัดเจนและขนาดมีความสม่ำเสมอเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่เป็นทรงกลม คาดว่าหากนำมาใช้ในในงานวิจัยอาจส่งผลต่อค่าพื้นผิวจำเพาะที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์สารตั้งต้นซิงค์คลอไรด์มาใช้ในการวิจัยต่อไป



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมจากสารตั้งต้นดังนี้ (ก) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ข) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต และ (ค) ซิงค์คลอไรด์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



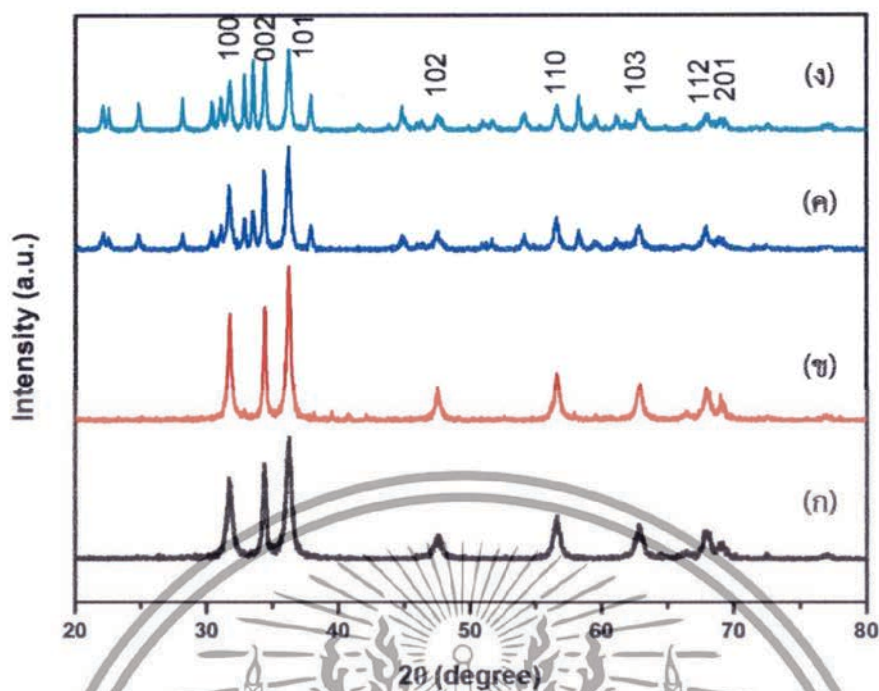
รูปที่ 4.4 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมจากสารตั้งต้นดังนี้ (ก) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (ข) ซิงค์ไนเตรทเฮกซะไฮเดรต และ (ค) ซิงค์คลอไรด์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

4.3.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์ หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.5 (ก-ข) มีตำแหน่งที่ตรงกันที่ $2\theta = 31.73^\circ, 34.40^\circ, 36.21^\circ, 47.49^\circ, 56.52^\circ, 62.89^\circ, 67.99^\circ$ และ 69.10° สัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ตามลำดับ สอดคล้องกับเฟสของซิงค์ออกไซด์อ้างอิง JCPDS Card No. 36-1451 ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ (Hexagonal wurtzite) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้น (ที่ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์) พบว่า จะมีฟีกของสารเจือปนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นฟีกของซิงค์คลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปรากฏขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณซิงค์คลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นภายในระบบของการตกตะกอน แต่เมื่อนำไปเผาแล้วอุณหภูมิเผา 500 องศาเซลเซียส อาจส่งผลทำให้การกำจัดสารเจือปนเหล่านั้นไม่หมดไป ทำให้พบฟีกดังกล่าวเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Marivone และคณะ [47] ที่พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์ ที่ 0.7 โมลาร์ พบเฟสของ $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ ปรากฏขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิเผาที่ต่ำจึงส่งผลให้พบเฟสดังกล่าวเกิดขึ้น และเมื่อทำการคำนวณขนาดของผลึกด้วยสมการของ Debye-Scherrer's Equation (สมการที่ 4.37) พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ 0.1-1.0 โมลาร์ ขนาดอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งมีขนาดของผลึกอยู่ระหว่าง 33-55 นาโนเมตร แสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้ (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ต่างกัน

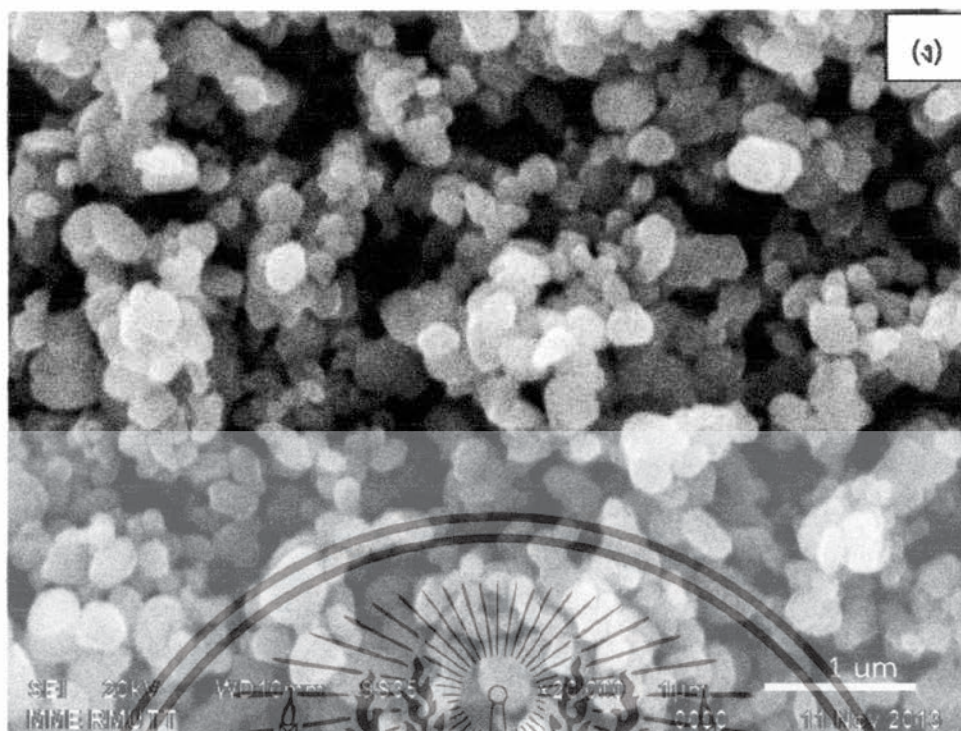
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (โมลาร์)	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
0.1	33.6
0.4	38.3
0.7	46.4
1.0	55.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์หลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้ (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



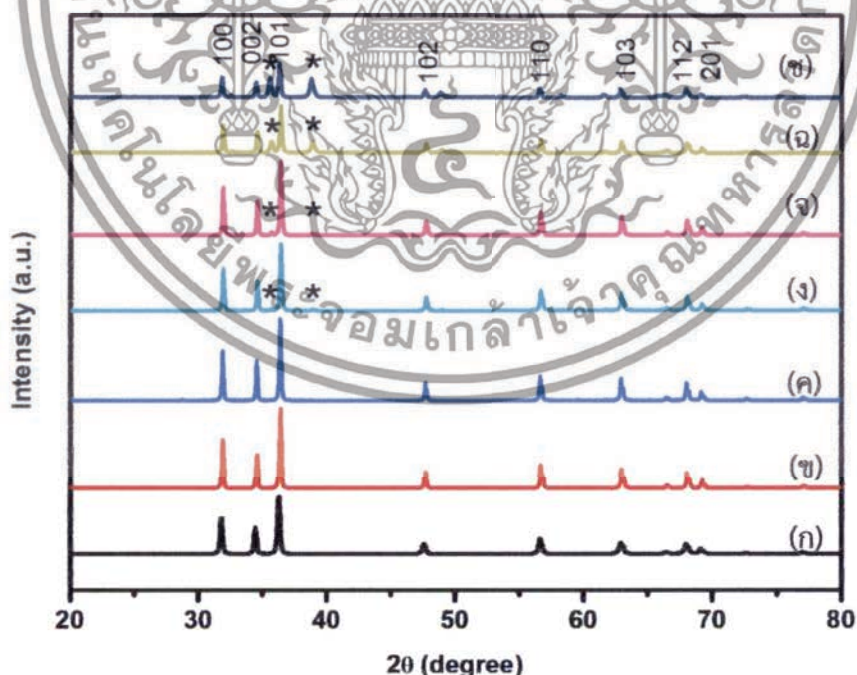
รูปที่ 4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้ (ก) 0.1 โมลาร์ (ข) 0.4 โมลาร์ (ค) 0.7 โมลาร์ และ (ง) 1.0 โมลาร์

4.4 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

4.4.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของตัวอย่างสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 100 : 0, 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 และ 50 : 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณคอปเปอร์ ที่อัตราส่วน 0, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกที่ดีโดยสังเกตได้จากพีคที่สูงและแหลม ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7 (ก-ง) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคอปเปอร์ เป็น 10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกลดลง เนื่องมาจากคอปเปอร์เริ่มมีปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้พีคของซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีความสูงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (จ-ข) ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ (hexagonal wurtzite) และเมื่อปริมาณคอปเปอร์สูงขึ้น จะเริ่มมีการก่อตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิค (monoclinic) ตัวอย่างซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ผสมด้วยคอปเปอร์ 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าที่ระนาบ 002 ปรากฏพีคที่มีความเข้มมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของรูปร่างแบบแท่งนาโน (rod like structure) โดยการก่อตัวในแนวแกนซีหรือเรียกว่า มีการก่อตัวตามแนวแกน c-axis [48,53] ซึ่งสอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมคอปเปอร์ที่อัตราส่วน 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไม่ปรากฏเฟสของสารประกอบคอปเปอร์เกิดขึ้น แต่ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณการผสมคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้นขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบแท่ง จึงส่งผลให้ขนาดผลึกมากกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบอนุภาค แสดงขนาดผลึกดังตารางที่ 4.3 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคอปเปอร์มากขึ้น พบว่าเริ่มปรากฏเฟสเจือปนขึ้นมาซึ่งเป็นเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ ดังอัตราส่วนที่ 5 เปอร์เซ็นต์ (ดังเครื่องหมาย * แสดงเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ ที่ปรากฏในกราฟ) ที่แสดงในกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.7 (จ) ซึ่งตรงกับคุณลักษณะเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Singhal และคณะ [41] ที่แสดงให้เห็นว่าเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์จะเริ่มปรากฏขึ้นหรือมีการก่อตัวโดยแยกออกมาจากซิงค์ ออกไซด์ที่ปริมาณการผสมคอปเปอร์ 5 เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการผสมคอปเปอร์นั้น หากมีการผสมที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดเป็นวัสดุผสมเกิดขึ้น และจากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าพีคของคอปเปอร์ออกไซด์จะเด่นชัดที่การผสมคอปเปอร์ ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.7 (ข) จากผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการผสมคอปเปอร์ในปริมาณน้อย คาดว่าไอออนของ คอปเปอร์ สามารถเข้าไปแทนที่ไอออนของซิงค์ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากไม่มีการตรวจพบเฟสเจือปนที่เป็นของคอปเปอร์ออกไซด์ปรากฏขึ้น เนื่องมาจากขนาดรัศมีไอออนของ Cu^{2+} (0.73 Å) มีค่าใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Zn^{2+} (0.74 Å) และจากการเข้าไปแทนที่ไอออนของซิงค์ส่งผลกระทบต่อเฟสของซิงค์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ จากการที่เฟสมีความเข้มข้นและตำแหน่งที่เลื่อนไปเล็กน้อย และในทางกลับกันเมื่อผสมคอปเปอร์ ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ตรวจพบเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น เนื่องมาจากเกิดการแยกตัวของคอปเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กลายเป็นวัสดุผสมซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ค) 99 : 1 (จ) 95 : 5 (ฉ) 90 : 10 (ง) 70 : 30 และ (ข) 50 : 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ขนาดผลึกของผงนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกัน ระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์

ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
100 : 0	38.83
99.5 : 0.5	104.54
99 : 1	83.85
95 : 5	72.65
90 : 10	87.89
70 : 30	80.18
50 : 50	88.67

4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์ และซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 100 : 0, 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 และ 50 : 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองที่ 0.4 โมลาร์ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถูกแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่มีรูปร่างแบบอนุภาคกึ่งทรงกลม (quasi-spherical) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm ดังรูปที่ 4.8 (ก) ในส่วนของรูปที่ 4.8 (ข) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบแท่งนาโน (rod like shape) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร มีความยาวประมาณ 2 ไมโครเมตร ส่วนรูปที่ 4.8 (ค-ฉ) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ผสมคอปเปอร์ ในอัตราส่วน 0.5, 1, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างเกิดขึ้น จากเดิมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน

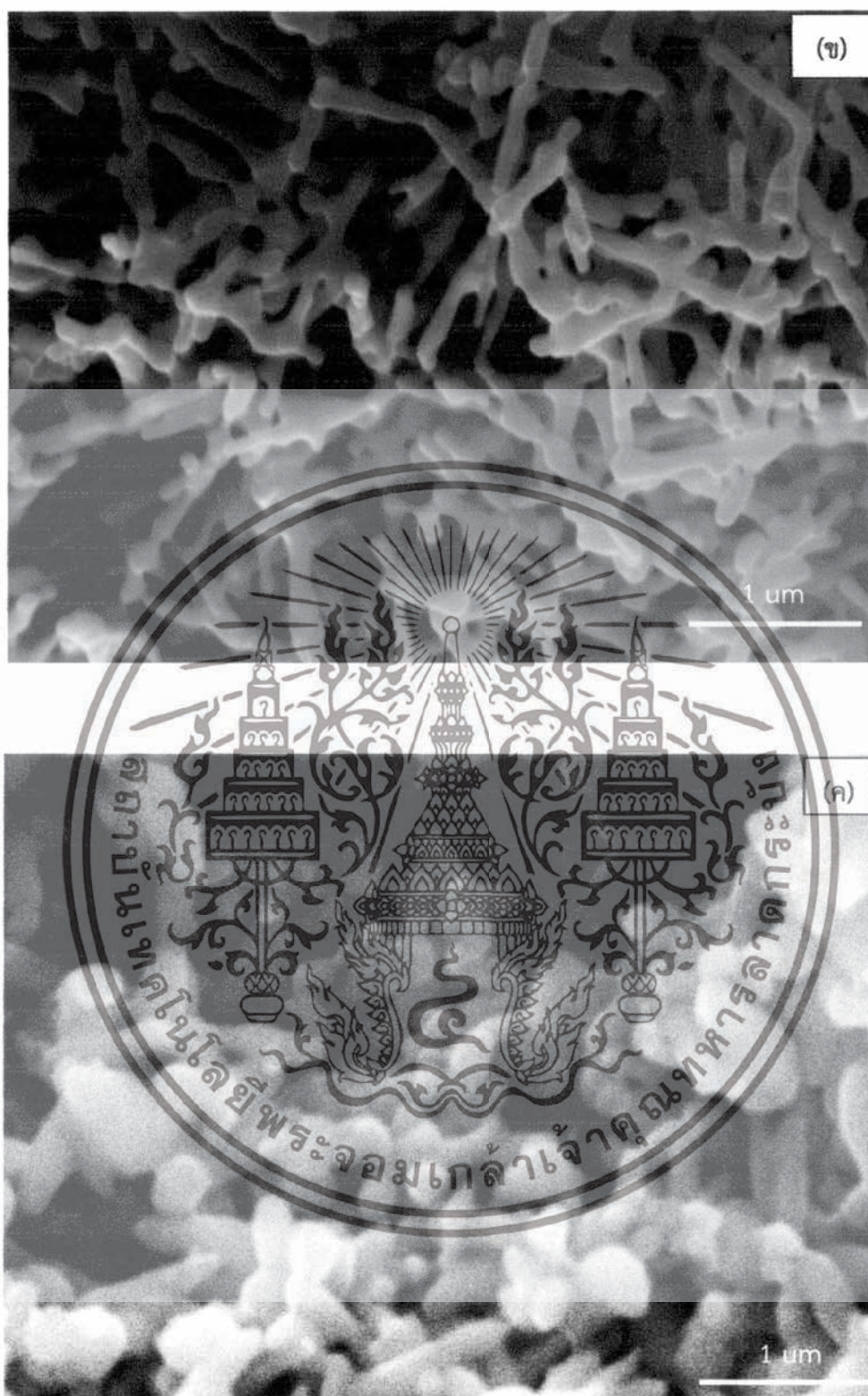
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างแบบอนุภาคกึ่งทรงกลมเปลี่ยนเป็นลักษณะโครงสร้างแบบแท่งเกิดขึ้น ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่การผสมคอปเปอร์ ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.8 (ง) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่พบว่าพีคที่ระนาบ 002 มีความเข้มสูงกว่าอัตราส่วนอื่น แสดงให้เห็นทิศทางการเติบโตของแท่งนาโนตามแกน c-axis และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้อยกว่า 100 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 1-2 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.8 (จ) แสดงให้เห็นโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ผสมคอปเปอร์ ในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่ามีรูปร่างที่ผสมกันระหว่างรูปร่างแบบแท่งนาโนขนาดเล็ก (short nanorod-liked) และรูปร่างแบบอนุภาคกึ่งทรงกลมขนาดนาโน (quasi-spherical nanoparticles) และเมื่อปริมาณการผสมคอปเปอร์เพิ่มมากขึ้นที่ 30 , 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าลักษณะทางโครงสร้างเปลี่ยนไป กลายมาเป็นอนุภาคกึ่งทรงกลมอีกครั้ง ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการเมื่อปริมาณของคอปเปอร์สูงขึ้นจึงส่งผลต่อการก่อตัวของทั้งซิงค์และคอปเปอร์ให้สามารถอยู่ร่วมกันได้อย่างมากที่สุด จึงส่งผลต่อขนาดและรูปร่างที่เปลี่ยนไป ซึ่งขนาดของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มีขนาดลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมของคอปเปอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.8 (ฉ-ช)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกันในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

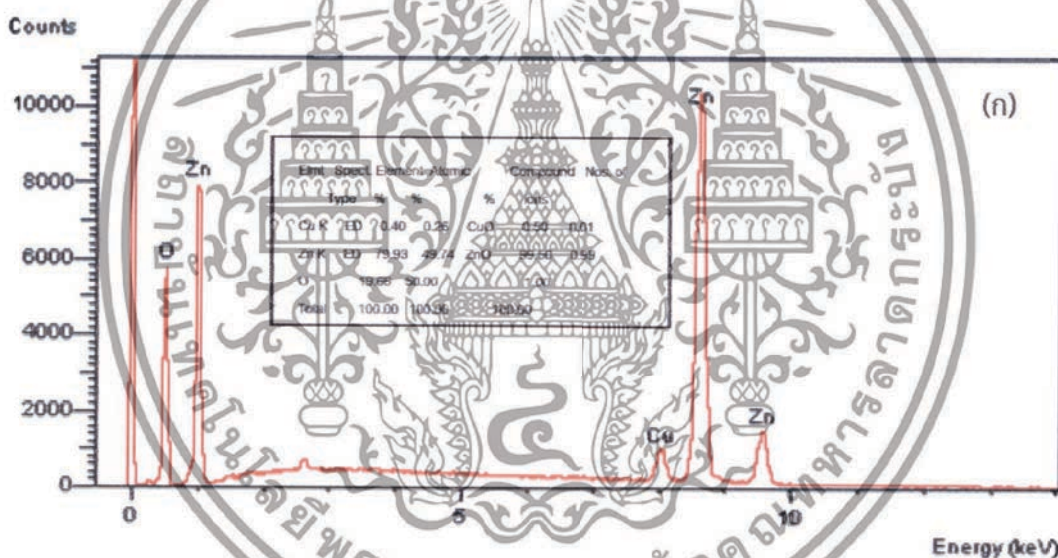


รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

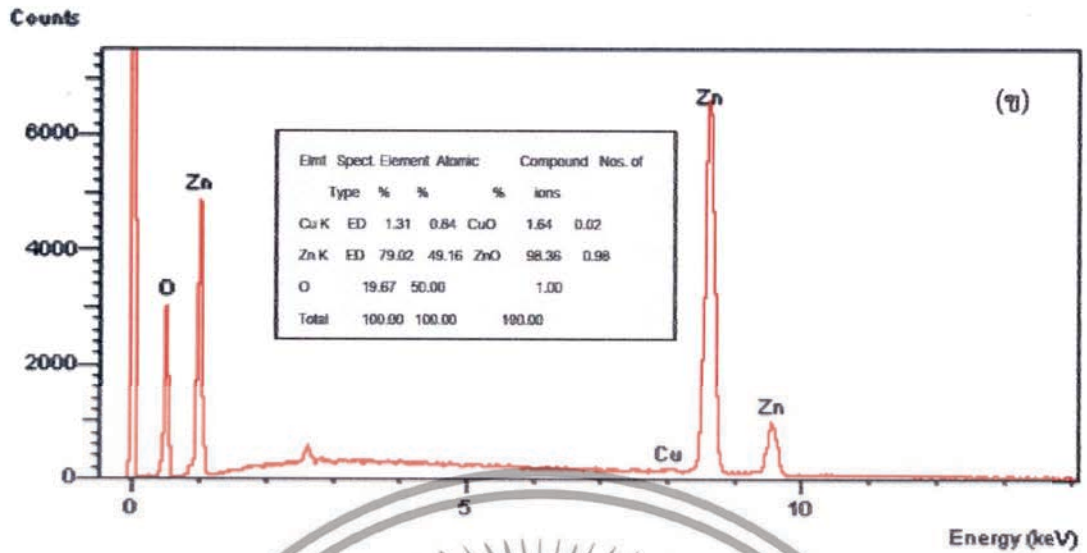
4.4.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค ENERGY DISPERSIVE SPECTROMETRY

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับ คอปเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือคอปเปอร์ อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ พบว่าปริมาณธาตุ ออกซิเจนปรากฏพีคที่ 0.53 keV และพีคของซิงค์เกิดขึ้น 3 พีค ได้แก่ 1.01, 8.69 และ 9.53 keV และธาตุคอปเปอร์เกิดพีคที่บริเวณ 8.09 keV จากสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณ ที่วัดได้ พบอยู่ระหว่าง 0.5-50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าที่ใกล้เคียงกับปริมาณของคอปเปอร์ที่ผสมเข้าไปใน ซิงค์ออกไซด์ที่ผสมลงไปใน การทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจากผลของสเปกตรัม ทั้งเชิง ปริมาณและเชิงคุณภาพให้ผลเป็นไปตามอัตราส่วนของการผสมสารประกอบ เมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์มาก กราฟสเปกตรัมเชิงคุณภาพจะมีความเข้มของพีคที่สูง ซึ่งเป็นส่วนกลับกับปริมาณ คอปเปอร์ ออกไซด์ที่มีปริมาณน้อย สอดคล้องกับความเข้มของพีคของซิงค์ที่ต่ำลง ซึ่งปริมาณของธาตุเชิง ปริมาณที่เป็นสเปกตรัมของกราฟดังกล่าวได้แสดงไว้ใน รูปที่ 4.9 [49]



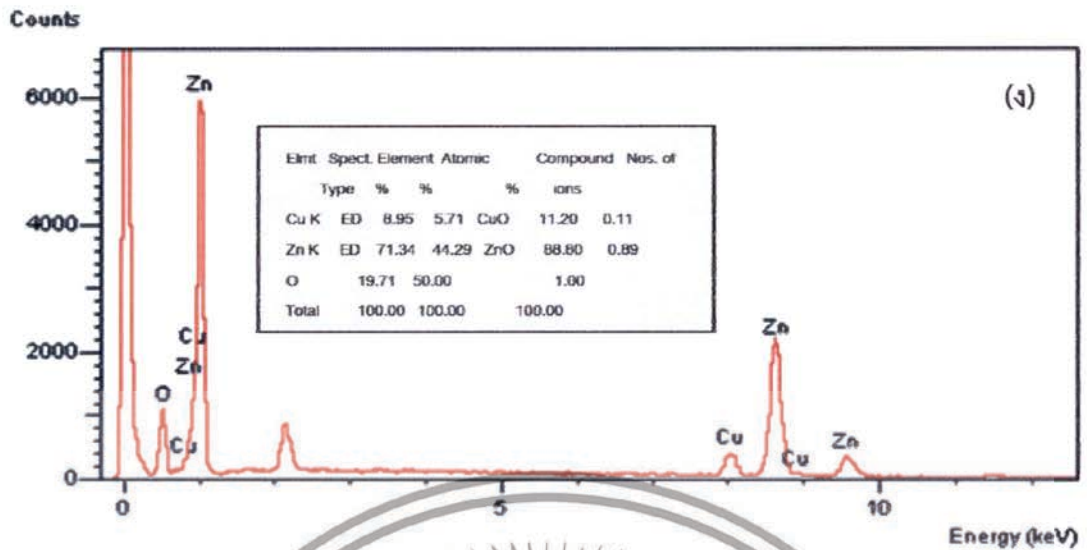
รูปที่ 4.9 กราฟสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของซิงค์คอปเปอร์ ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ใน ปริมาณดังนี้ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



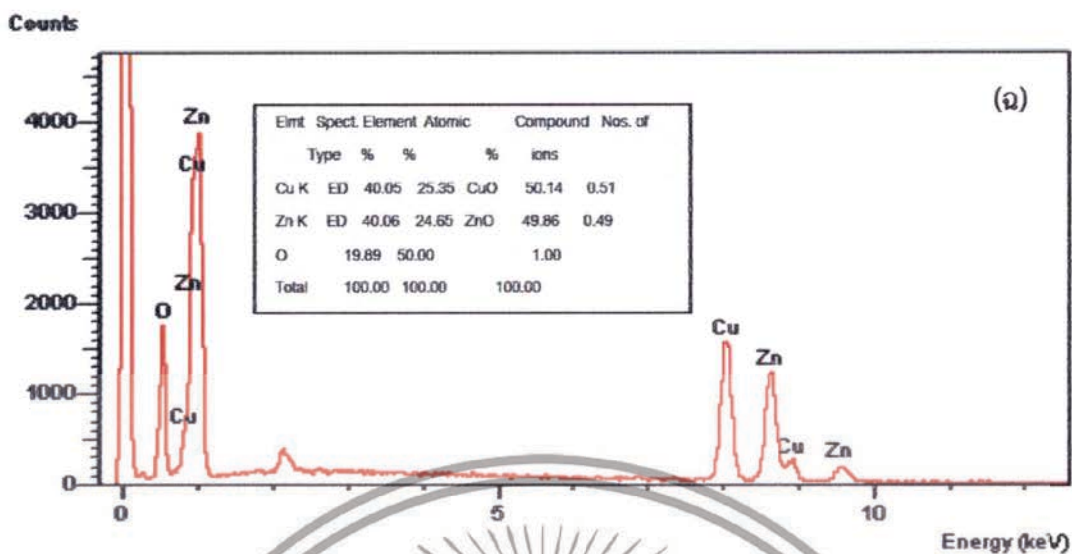
รูปที่ 4.9 (ต่อ) กราฟสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 (ต่อ) กราฟสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 (ต่อ) กราฟสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) 99.5 : 0.5 (ข) 99 : 1 (ค) 95 : 5 (ง) 90 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ

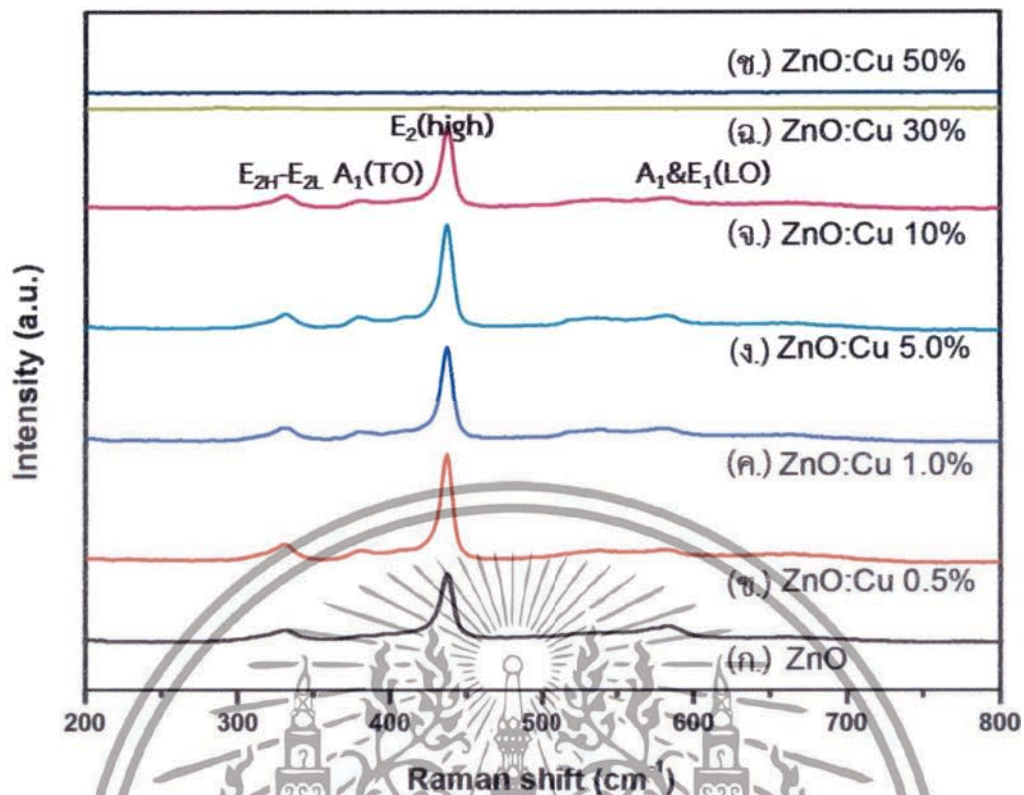
ตารางที่ 4.4 ปริมาณอัตราส่วนของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนผสม ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณอัตราส่วน ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ ที่วัดได้จากสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์เชิงปริมาณ

อัตราส่วนของ ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ จากการทดลอง	อัตราส่วนของ ซิงค์ออกไซด์ : คอปเปอร์ออกไซด์ ที่วัดได้จากสเปกตรัมการกระจายพลังงาน รังสีเอ็กซ์
99.5 : 0.5	99.5 : 0.5
99 : 1	98.36 : 1.64
95 : 5	94.26 : 5.72
90 : 10	88.80 : 11.20
70 : 30	64.83 : 35.17
50 : 50	49.86 : 50.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

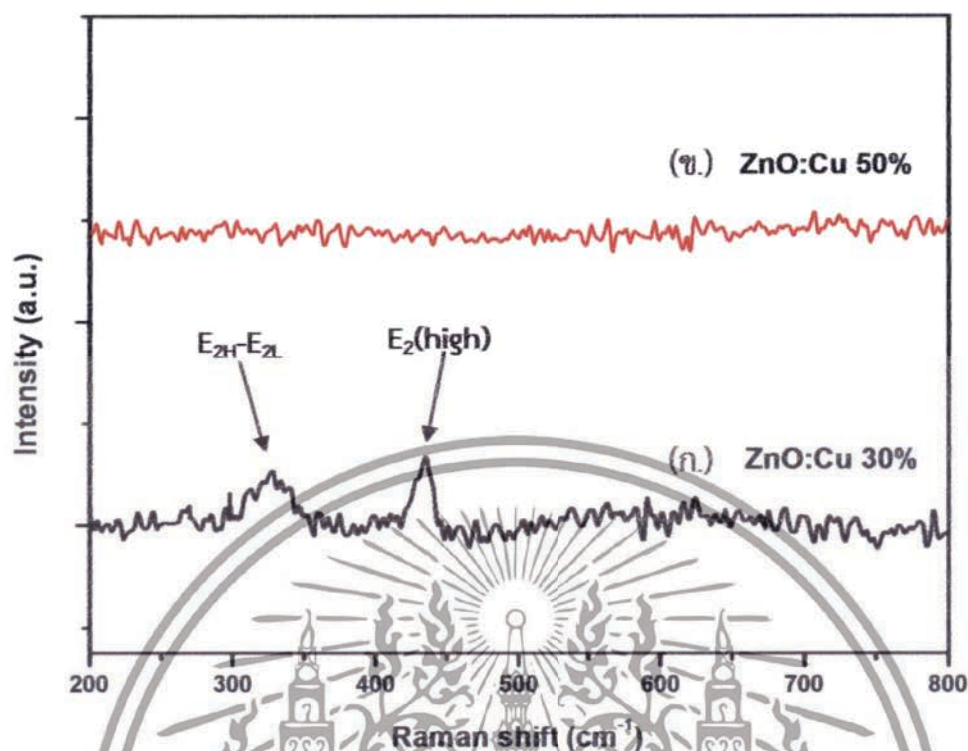
4.4.4 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโกปี

ลักษณะสเปกตรัมการวิเคราะห์พลังงานของพันธะซิงค์ออกไซด์ ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี ซึ่งลักษณะสเปกตรัมของรามานจะแสดงถึงลักษณะโหมดของความถี่ในการสั่นของที่เกิดจากการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบพื้นผิว ส่งผลให้โฟตอนปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความถี่ ซึ่งสารตัวอย่างแต่ละตัวจะมีค่าพลังงานการสั่นที่เฉพาะตัว ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนการผสมคอปเปอร์ 0-10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ตำแหน่ง 437 cm^{-1} จะเกิดพีคที่โหมด โดยจะแสดงถึงซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ และที่ตำแหน่ง $335, 380, 580 \text{ cm}^{-1}$ ก็เกิดสเปกตรัมในโหมด $E_{2H}-E_{2L}$, $A_1(\text{LO})$ และ $A_1 \& E_1(\text{LO})$ ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติแล้ว ซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ จะมีโหมดการสั่นทั้งหมด 12 โหมด โดยแบ่งเป็น Acoustic phonon จำนวน 3 โหมด และ Optical phonon จำนวน 9 โหมด คือ $A_1+2E_2+E_1+2B_1$ โดยโหมดของ A_1 และ E_1 เป็น polar phonon สามารถแยกเป็นการสั่นแบบ transverse optical (TO) และ longitudinal optical (LO) ซึ่งทั้งสองโหมดแอกทีฟกับทั้งรามานและอินฟราเรด ส่วน E_2 เป็น Non-polar phonon จะแอกทีฟเฉพาะรามานเท่านั้น และสุดท้าย B_1 โดยปกติจะไม่แอกทีฟกับทั้งรามานและอินฟราเรด [50] แสดงดังรูปที่ 4.10 แต่เมื่อมีการผสมคอปเปอร์เข้าไปพบว่าสเปกตรัมในแต่ละโหมดการสั่นของซิงค์ออกไซด์ยังคงอยู่ แต่สามารถตรวจพบเพียงแค่พลังงานการสั่นของซิงค์ออกไซด์เท่านั้น ซึ่งจากกราฟดังกล่าวพบว่าพีคของซิงค์ออกไซด์ที่มีการผสมกับคอปเปอร์ มีการเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อย (เลขคลื่นเปลี่ยน) ซึ่งอาจเกิดจากแสงที่กระเจิงโดยมีพลังงานลดลง (Stokes lines) หรือเพิ่มขึ้น (anti-Stokes lines) จะเป็นควรวัดหรือบ่งบอกถึงพลังงานในการสั่นของโมเลกุลที่เปลี่ยนไป และเมื่อปริมาณการผสมคอปเปอร์เพิ่มมากขึ้นที่ 30 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไม่ปรากฏพีคใดๆเกิดขึ้น แต่เมื่อทำการขยายกราฟที่อัตราส่วนทั้งสองพบว่าที่อัตราส่วนการผสมคอปเปอร์ 30 เปอร์เซ็นต์ พบพีคพลังงานการสั่นของซิงค์ออกไซด์แต่พีคมีความเข้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.11 คาดว่าเกิดจากการก่อตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลทำให้ความถี่ในการสั่นของพันธะของซิงค์ออกไซด์อ่อนแอลงไป หรืออีกเหตุผลหนึ่งอาจเกิดจากการผสมคอปเปอร์เข้าไปทำให้บริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่างไม่เรียบจึงอาจส่งผลต่อการกระเจิงของแสง ทำให้ไม่สามารถตรวจพบพีคใดๆเกิดขึ้น



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์พื้นระเคมีของของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ) 90 : 10 (ฉ) 70 : 30 และ (ช) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 (ภาพขยาย) การวิเคราะห์พื้นระเคมีของของซิงค์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) 70 : 30 และ (ข) 50 : 50 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

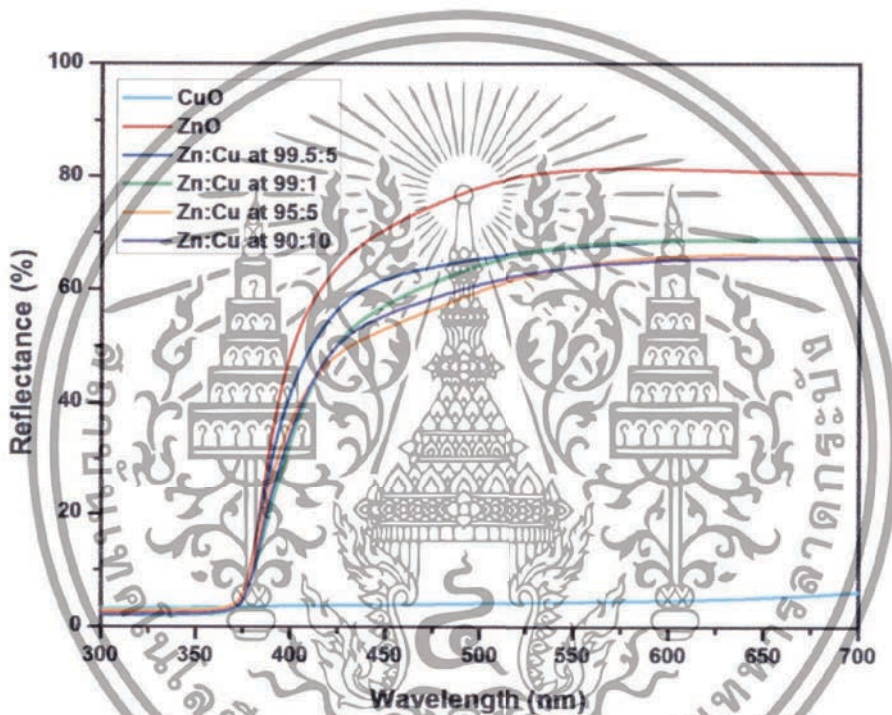
4.4.5 การวิเคราะห์ Diffused Reflectance Spectroscopy ภายใต้โหมดการสะท้อนของแสง

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแบบ Diffused Reflectance เพื่อหากระบวนการสะท้อนของสารตัวอย่าง นาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง Diffuse Reflectance Spectroscopy ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ 100 : 0, 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5 และ 90 : 10 หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้สมการของ Kubelka และ Munk [51] และเขียนกราฟการวิเคราะห์ โดยวัดค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแบบ Diffuse Reflectance เทียบกับค่าความยาวคลื่นในช่วง 300-600 นาโนเมตร พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์ มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแบบ Diffuse Reflectance สูงสุดที่ความยาวคลื่น ระหว่าง 450-600 นาโนเมตร ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนอยู่ในช่วง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้เห็นว่ามีการสะท้อนที่สูงมาก และจากผลดังกล่าวพบว่าการสะท้อนแบบ Diffuse Reflectance ของซิงค์ออกไซด์ที่ยังไม่มีการผสมด้วยคอปเปอร์ มีค่าการสะท้อนสูงสุด ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผสมคอปเปอร์ เกิดการสะท้อนแสงในทุกช่วงความยาวคลื่นเช่นเดียวกับซิงค์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนมีแนวโน้มลดลง สาเหตุเกิดจากการที่ปริมาณการผสมคอปเปอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวัดดังกล่าวเปลี่ยนไปเนื่องจากสีของคอปเปอร์ที่มีสีดำ จึงส่งผลโดยตรงต่อค่าการสะท้อนของแสงที่เป็นส่วนกลับของค่าการดูดกลืนแสง จากผลดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่าการสะท้อนของแสงลดลงเมื่อปริมาณการผสมคอปเปอร์สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.12 สอดคล้องกับการวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ที่มีค่าการสะท้อนของแสงน้อยมาก ซึ่งก็หมายความว่ามีการดูดกลืนแสงที่สูงนั่นเอง และจากวัดค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแบบ Diffuse Reflectance จะเห็นได้ว่าขอบการสะท้อนจากกราฟ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการผสมคอปเปอร์ในซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากผลดังกล่าวสามารถที่จะนำไปศึกษาแถบพลังงานของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไป โดยใช้ขอบการสะท้อนเพื่อนำไปศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้สมการของ Kubelka-Munk

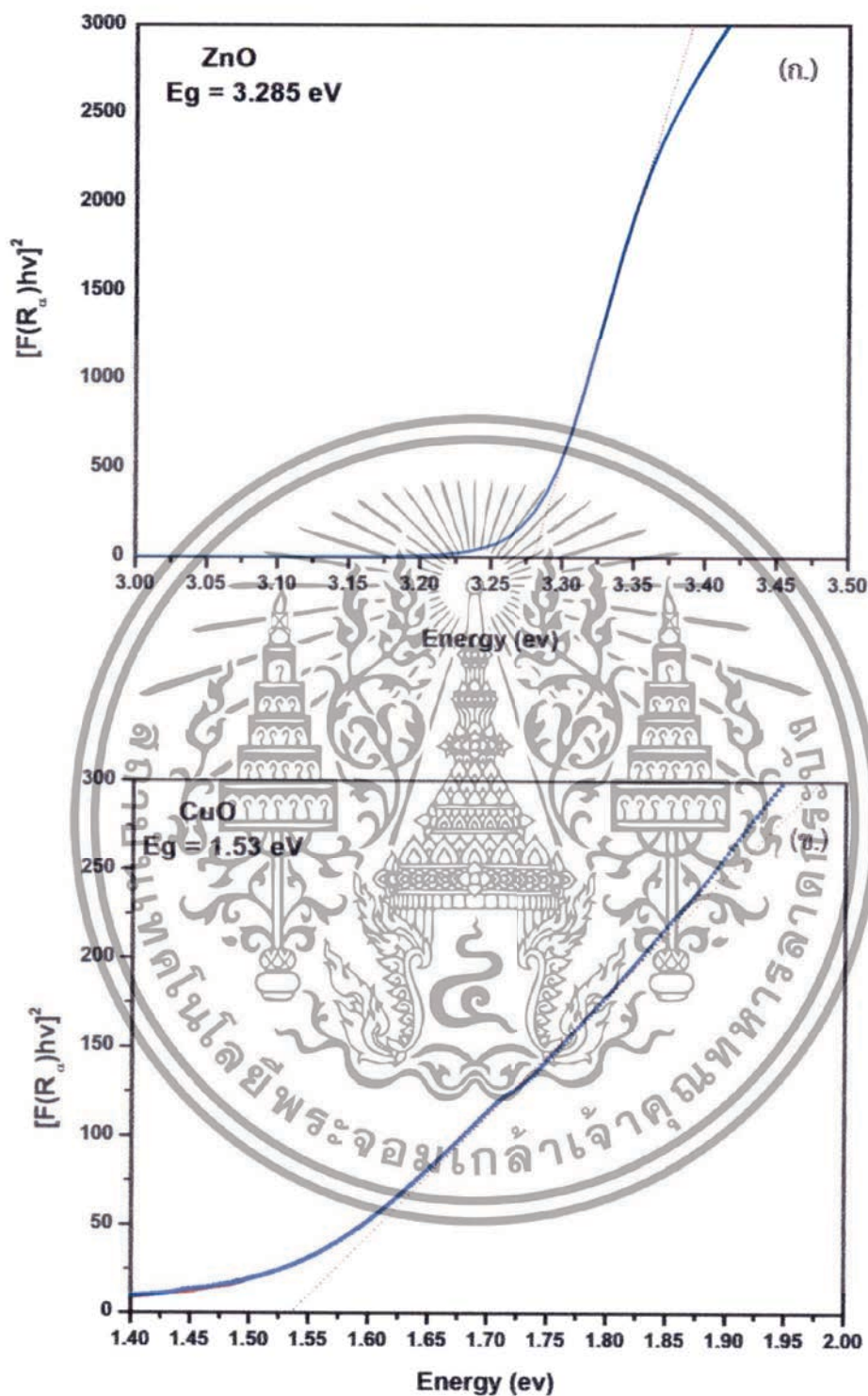


รูปที่ 4.12 กราฟการวิเคราะห์ Diffused Reflectance Spectroscopy ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกันระหว่าง ซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณ ดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ค) 99 : 1 และ (ง) 90 : 10 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

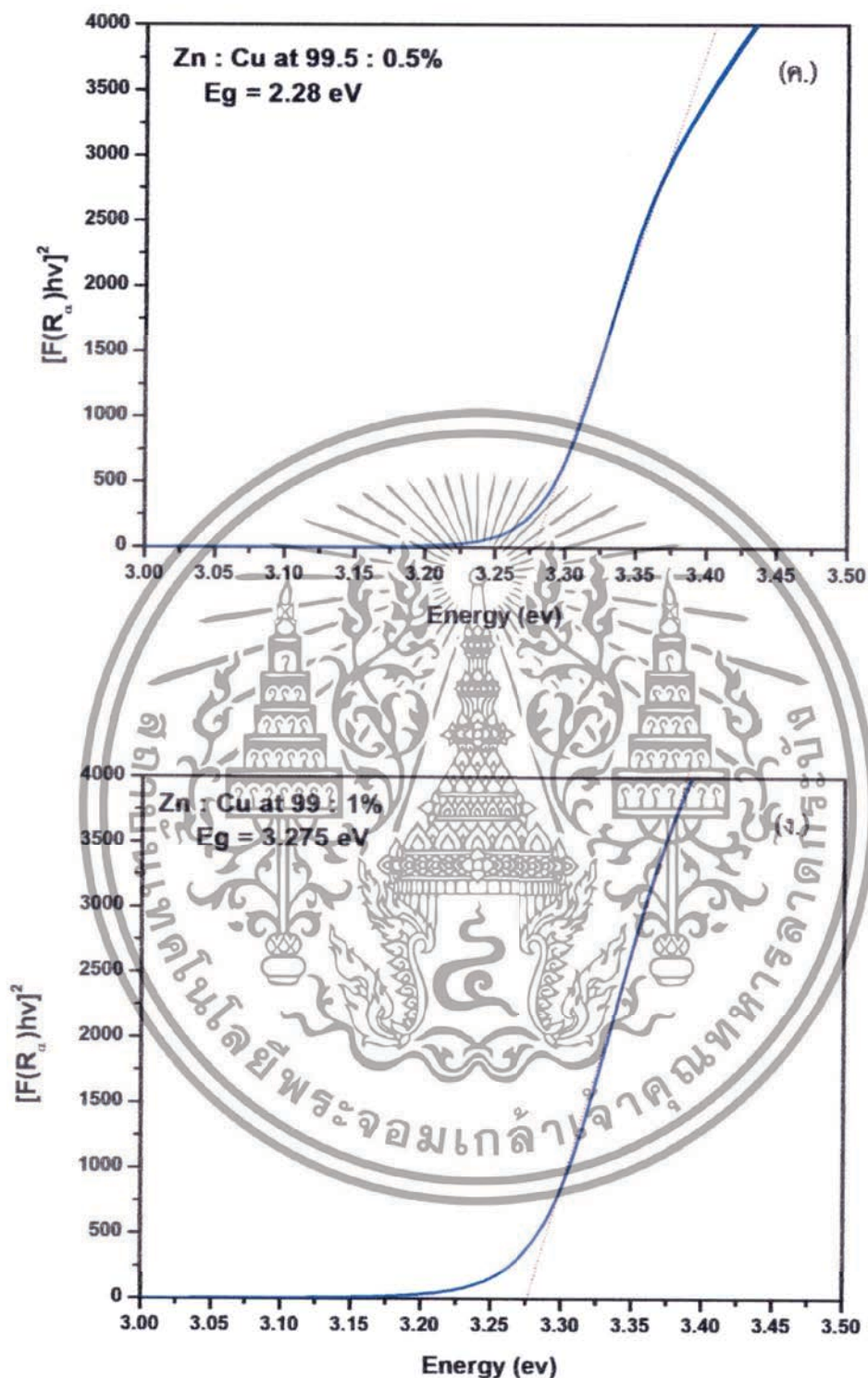
จากรูปที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของสารตัวอย่างที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผสมคอปเปอร์ที่อัตราส่วน 0-10 เปอร์เซ็นต์ โดยการหาได้จากกราฟการสะท้อนของแสงข้างต้น จากเครื่อง Diffuse Reflectance Spectroscopy จากการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ทำการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำไปคำนวณโดยใช้สมการของ Kubelka-Munk [51] ซึ่งจากเทคนิคการวัดดังกล่าวก็เพื่อเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไปของช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์เข้าไป จากรูปที่ 4.13 (ก.) แสดงค่าของช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์ จากสมการเมื่อคำนวณแล้ว พบว่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าเท่ากับ 3.285 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (3.37 อิเล็กตรอนโวลต์) และช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 1.53 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ข.) และจากการผสมด้วยคอปเปอร์เข้าไปที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5-5 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการผสมคอปเปอร์เข้าไป คือ 3.28 อิเล็กตรอนโวลต์ , 3.275 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.27 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนไปนั้นเกิดจากคอปเปอร์สามารถที่จะเข้าไปแทนที่ในอะตอมของซิงค์ทำให้คอปเปอร์เกิดการสร้างระดับพลังงาน 3d ขึ้นมา เกิดการก่อดัวเป็นระดับชั้นพลังงานใหม่ขึ้นมาอยู่ด้านล่างของแถบความนำของซิงค์ออกไซด์ขึ้น โดยระดับพลังงานที่สร้างขึ้นใหม่นี้มีค่า 0.1-0.19 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแบบจำลองแถบพลังงานต้องห้ามของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ถูกแสดงดังรูปที่ 4.14 [52,53] เมื่อปริมาณการผสมคอปเปอร์เพิ่มขึ้นถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้ค่าของช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.281 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การผสมคอปเปอร์ในซิงค์ที่จำกัด อาจส่งผลให้เกิดการก่อดัวขึ้นมาเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอาจมีการสร้างชั้นพลังงานของตัวเองขึ้นมา จึงส่งผลทำให้แถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งก็หมายความว่าช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์จะลดลงได้ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของสารเจือหรือสารที่ผสมเข้าไป ดังนั้นจากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแบบ Diffused Reflectance ดังกล่าวทำให้ทราบว่าค่าของช่องว่างพลังงานของซิงค์ออกไซด์สามารถปรับเปลี่ยนได้ หากเลือกสารเจือหรือสารผสมในปริมาณที่เหมาะสม และหากเลือกสารผสมที่มีเหมาะสมตัวอื่นเช่น โคบอลต์หรือ แมงกานีส เป็นต้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ได้ และในรูปที่ 4.15 แสดงกราฟสรุปความสัมพันธ์ของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือคอปเปอร์ในปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



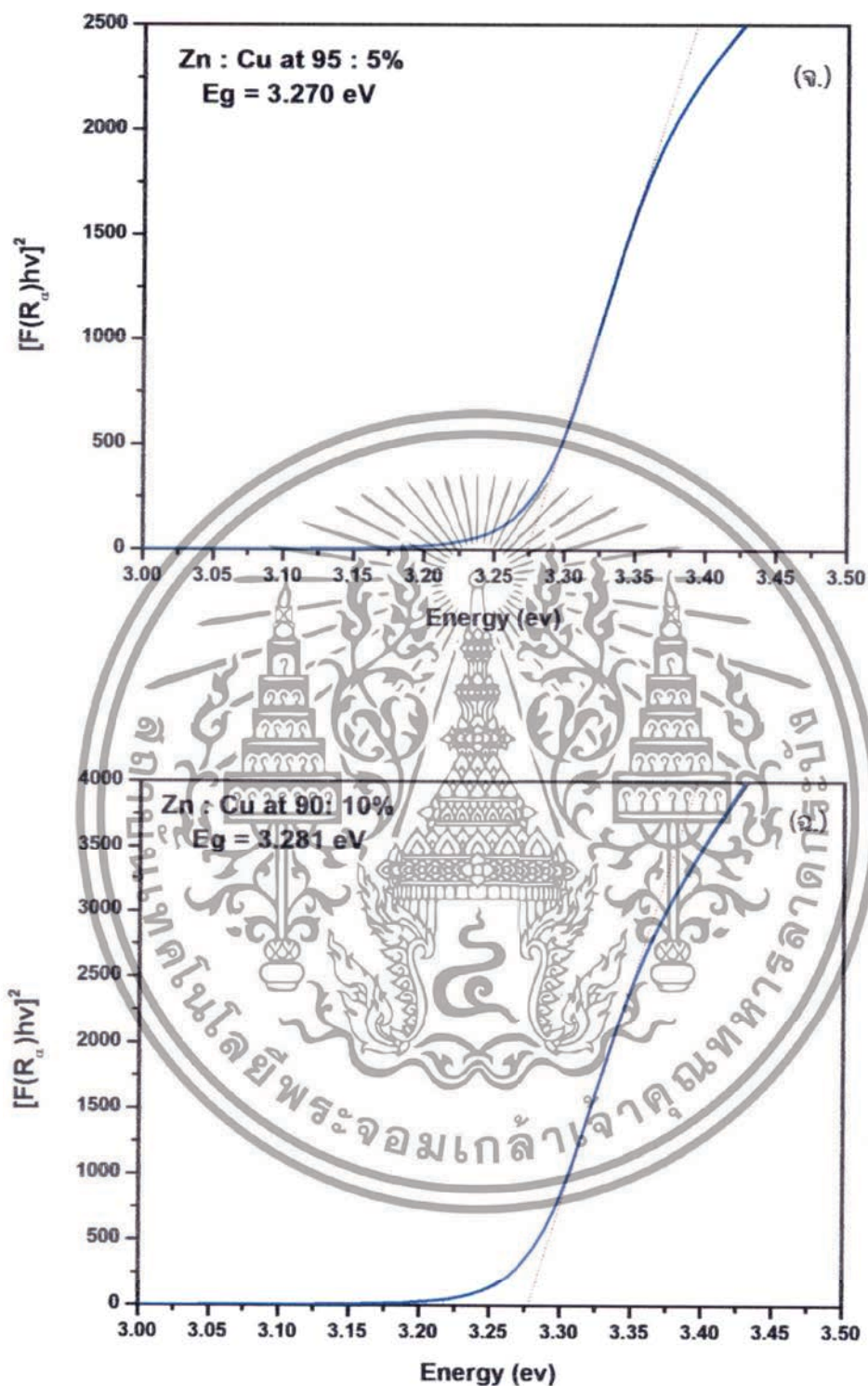
รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์แถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ.) 95 : 5 และ (ฉ) 90 : 10 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



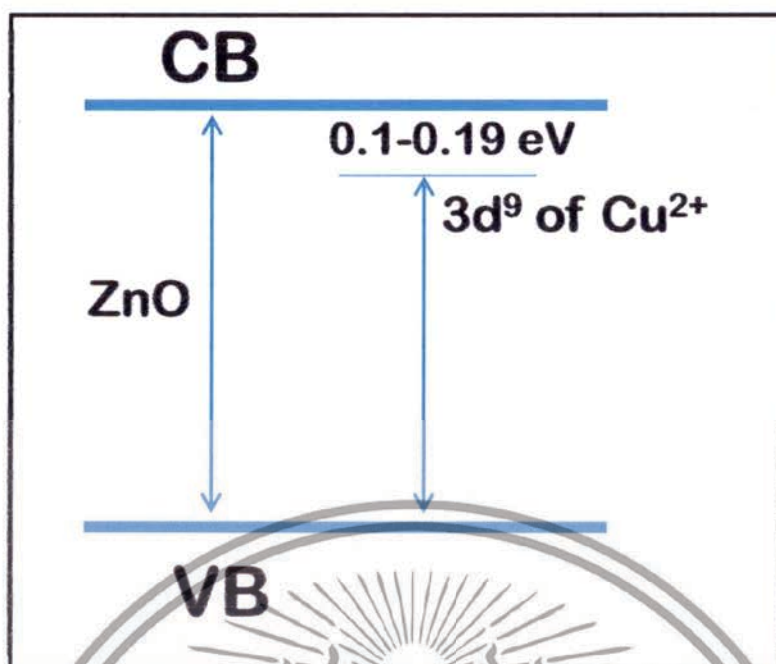
รูปที่ 4.13 (ต่อ) การวิเคราะห์แถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกัันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ.) 95 : 5 และ (ฉ) 90 : 10 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

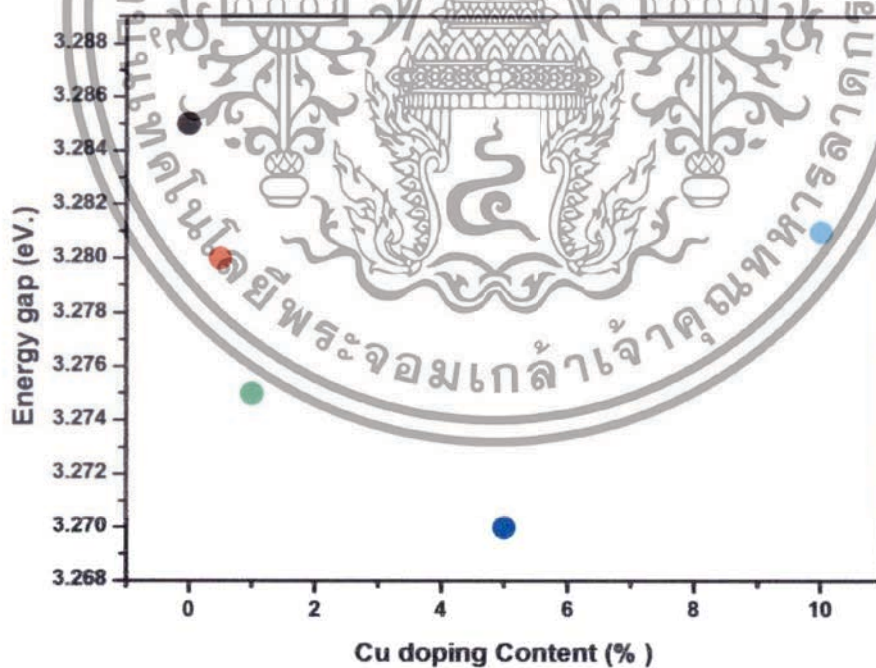


รูปที่ 4.13 (ต่อ) การวิเคราะห์แถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมที่ต่างกัันระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณดังนี้ (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์ (ค) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99.5 : 0.5 (ง) 99 : 1 (จ.) 95 : 5 และ (ฉ) 90 : 10 ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แบบจำลองแถบพลังงานต้องห้ามของนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผงนาโนซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือคอปเปอร์ในปริมาณ 0 , 0.5 , 1 , 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การประยุกต์ใช้งานสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์

4.5.1 การนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายสีย้อม ภายใต้การกระตุ้นแสงด้วยหลอดซินอนและหลอดอัลตราไวโอเล็ต

4.5.1.1 การนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายสีย้อม ภายใต้การกระตุ้นแสงด้วยหลอดซินอน



เริ่มต้น 30 นาที 60 นาที 90 นาที 120 นาที 150 นาที 180 นาที

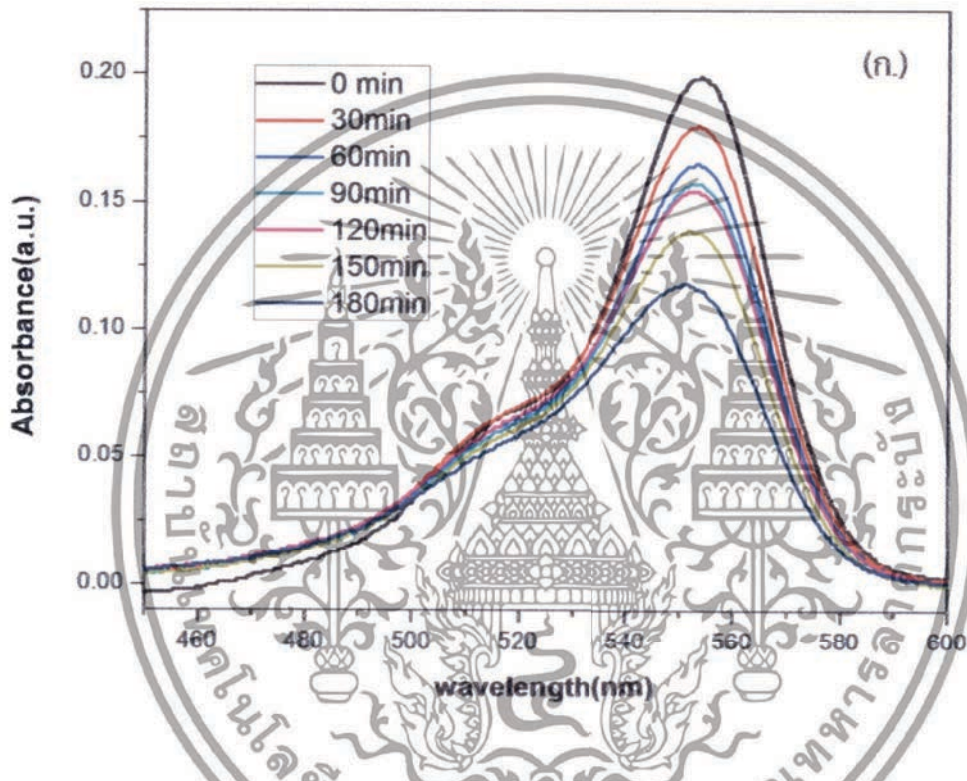
รูปที่ 4.16 ภาพฉายอัตรการย่อยสลายสีย้อมโรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 99 : 1 ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดซินอน ที่เวลาต่างๆ

จากการศึกษาการย่อยสลายโรดามาย บี (Rhodamine B - RhB) โดยใช้สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดซินอน และภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้เวลาในการย่อยสลายโรดามาย บี เป็นเวลา 180 นาที แล้วทำการวัดการดูดกลืนแสงของ โรดามาย บี เพื่อศึกษาอัตรการย่อยสลายโรดามาย บี ในช่วงนาที ที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ด้วยเครื่องยูวีวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สารละลายโรดามาย บี มีการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ในรูปที่ 4.16 แสดงการย่อยสลายสีย้อมจากการทดลองด้วยหลอดซินอน ซึ่งเป็นแสงในย่านตามองเห็นและแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที โรดามาย บี มีการเปลี่ยนสีไป เนื่องมาจากการดูดกลืนแสงโดยใช้สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และจากผลการย่อยสลายสีย้อม โรดามาย บี (จากรูป 4.17) พบว่าสีย้อมถูกย่อยสลายภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดซินอน โดยใช้ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่มีอัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ เป็น 100 : 0, 99.5 : 0.5, 99 : 1 และ 95 : 5 ตามลำดับอัตรการย่อยสลายของโรดามาย บี มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ลงไป โดย

เปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ แต่สัดส่วนปริมาณที่สามารถย่อยสลายได้สูงที่สุด คือสาร
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อสงสัยหรือต้องการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

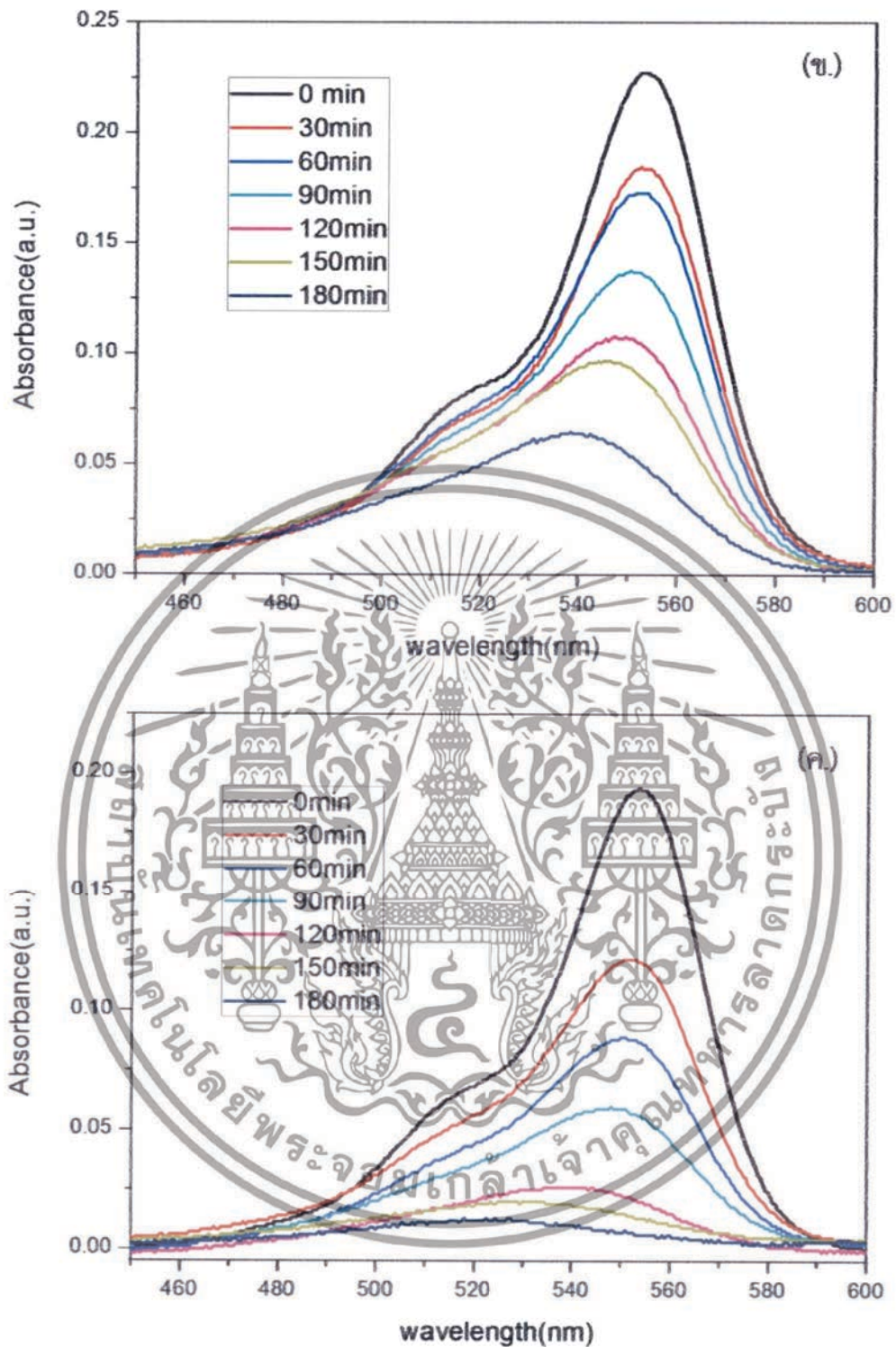
ตัวอย่างที่มีปริมาณการเจือด้วย คอปเปอร์ 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลผลการทดลองดังกล่าว สามารถนำไปหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$ กับ เวลา (นาที) เพื่อหาค่าคงที่

การสลายตัวของโรดามาย บี ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 เมื่อปริมาณของสารเจือ คอปเปอร์เท่ากับ 0, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าสารซิงค์ออกไซด์ ที่ผสมด้วยคอปเปอร์ลงไป มีส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงในย่านความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น



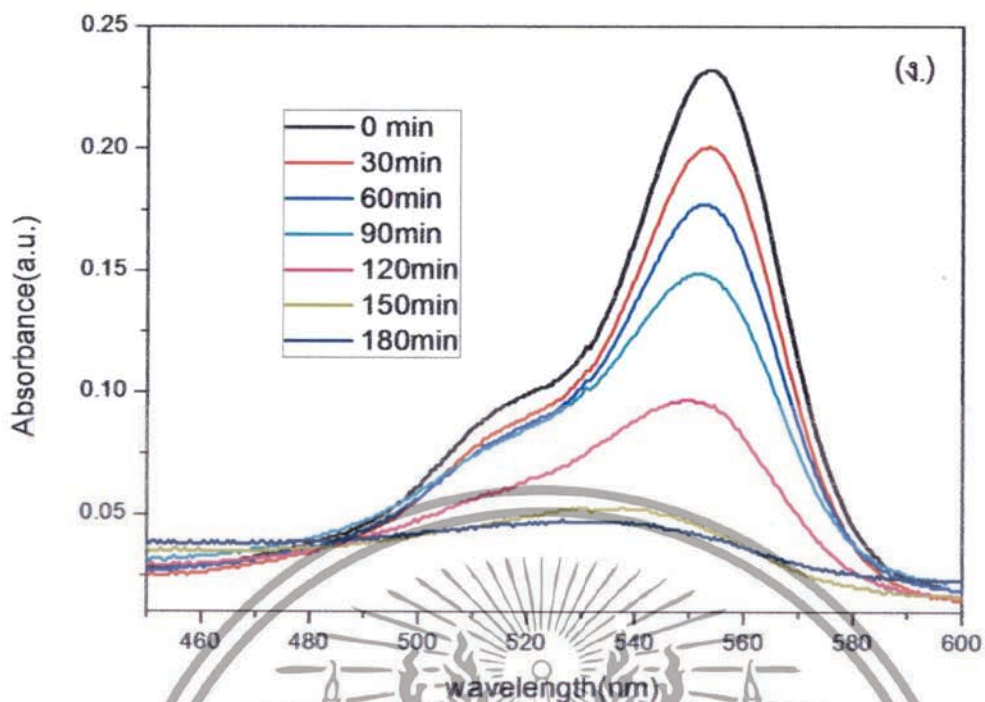
รูปที่ 4.17 ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดซินนอน ที่เวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

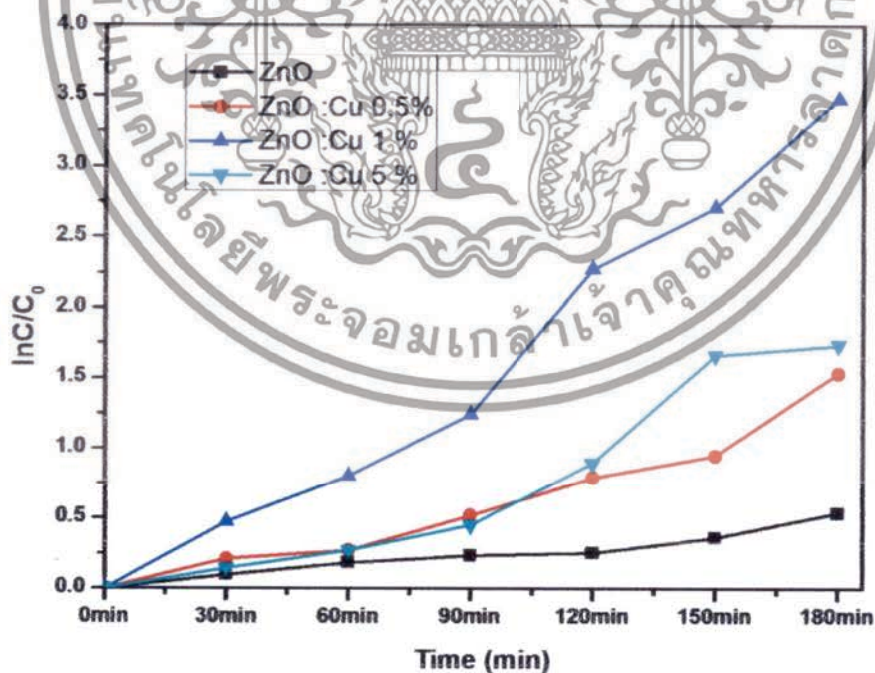


รูปที่ 4.17 (ต่อ) ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดซีนอน ที่เวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 (ต่อ) ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปรอทเซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดซินอน ที่เวลา 180 นาที

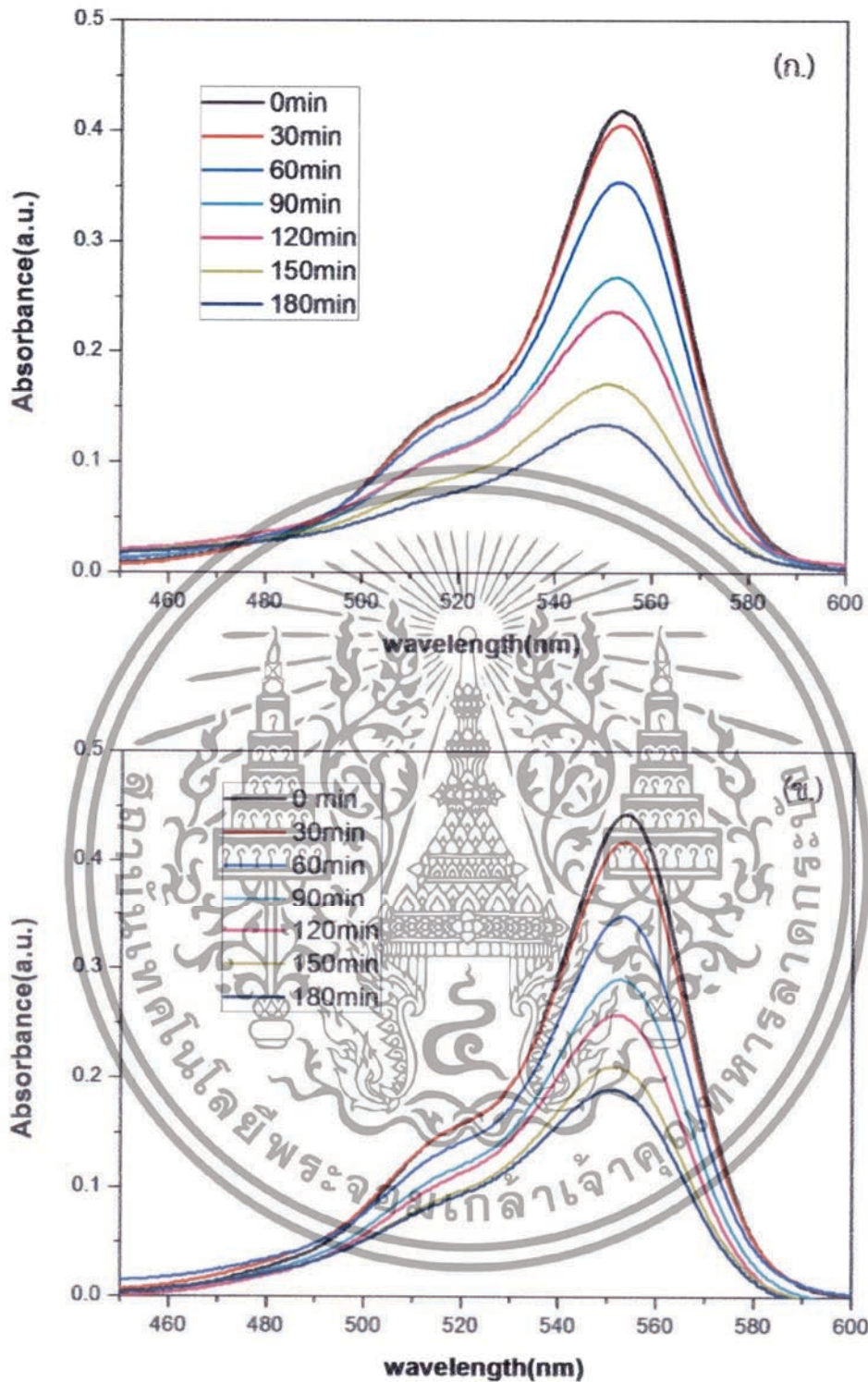


รูปที่ 4.18 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัวของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่าง ๆ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดซินอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

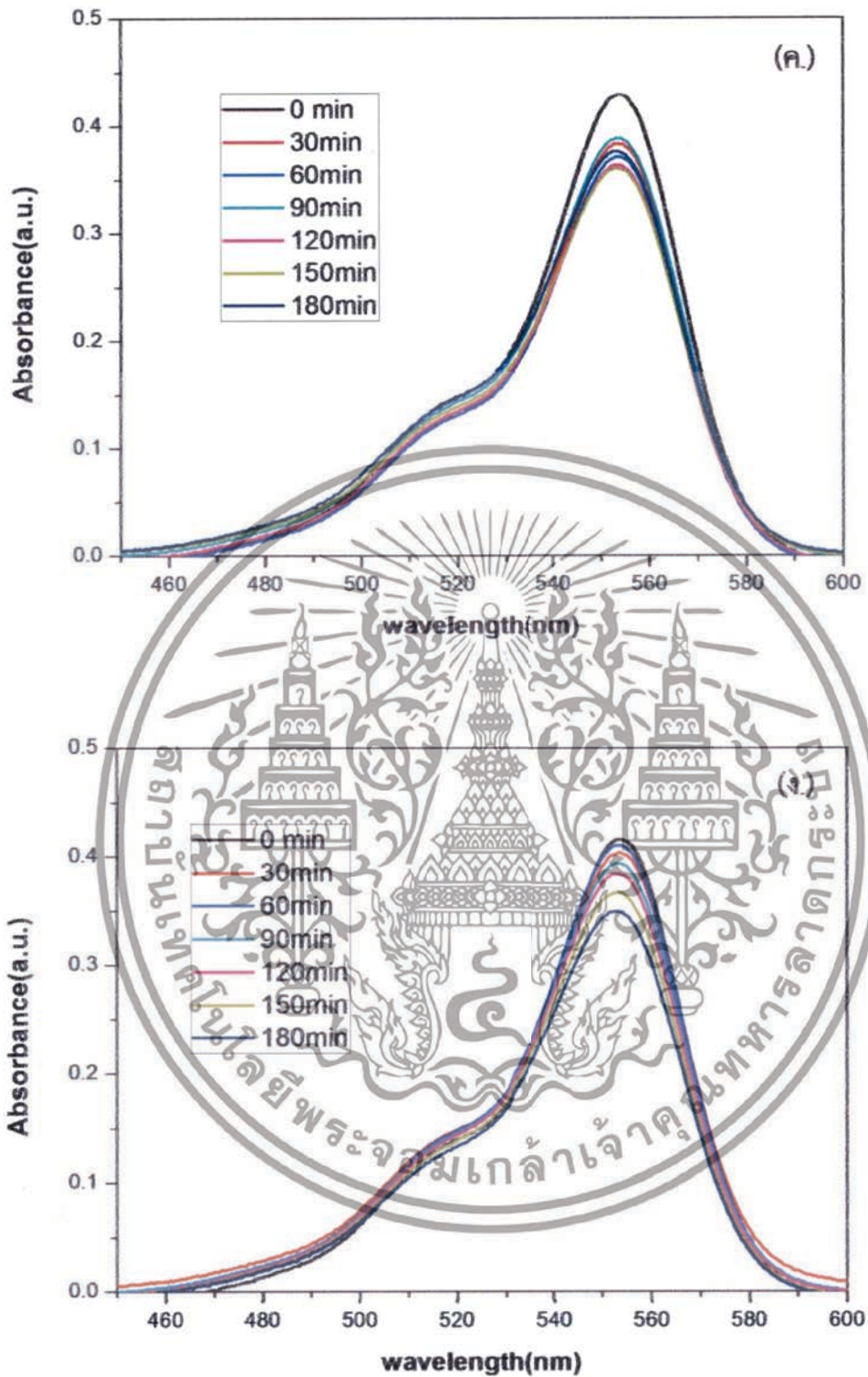
4.5.1.2 การนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ต

ผลการทดลองยานของการดูดกลืนแสงภายใต้เงื่อนไขการใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ต จากรูป 4.19 พบว่าซิงค์ออกไซด์มีการย่อยสลายสีย้อมโดยเมื่อเวลาผ่านไปโรดามาย บี จะถูกย่อยสลายไปตามเวลา แต่เมื่อมีการผสมคอปเปอร์เข้าไปทุกอัตราส่วน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมโรดามาย บี มีแนวโน้มลดลง และตัวที่มีการย่อยสลายสูงที่สุดเมื่อถูกฉายแสงด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต คือ ซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือด้วยคอปเปอร์ เนื่องมาจากเมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ ส่งผลทำให้การตอบสนองต่อแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตลดลง สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามที่ลดลง เมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ จึงทำให้ซิงค์ออกไซด์ที่เป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ตอบสนองต่อแสงในย่านตามองเห็นได้ดีกว่าแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต และจากการที่สารดังกล่าวดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตลดลง เมื่อมีการเจือด้วยคอปเปอร์เข้าไป สามารถนำผลที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$ กับ เวลา (นาที) เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของโรดามาย บี ซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 แสดงถึงประสิทธิภาพของอัตราการย่อยสลายที่เปรียบเทียบกัน เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าซิงค์ออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การกระตุ้นด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ตสูงที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสองเงื่อนไข ภายใต้การใช้แสงกระตุ้นในย่านที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าคอปเปอร์มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวคะตะลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์ในการตอบสนองต่อแสงที่มากขึ้น โดยใช้หลอดซีนอนเป็นหลอดจำลองแสงอาทิตย์ จากเดิมที่ซิงค์ออกไซด์มีข้อจำกัดในการทำงานภายใต้แสงอาทิตย์ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อมีการนำมาทำเป็นสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ส่งผลทำให้ซิงค์ออกไซด์สามารถตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ในความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น



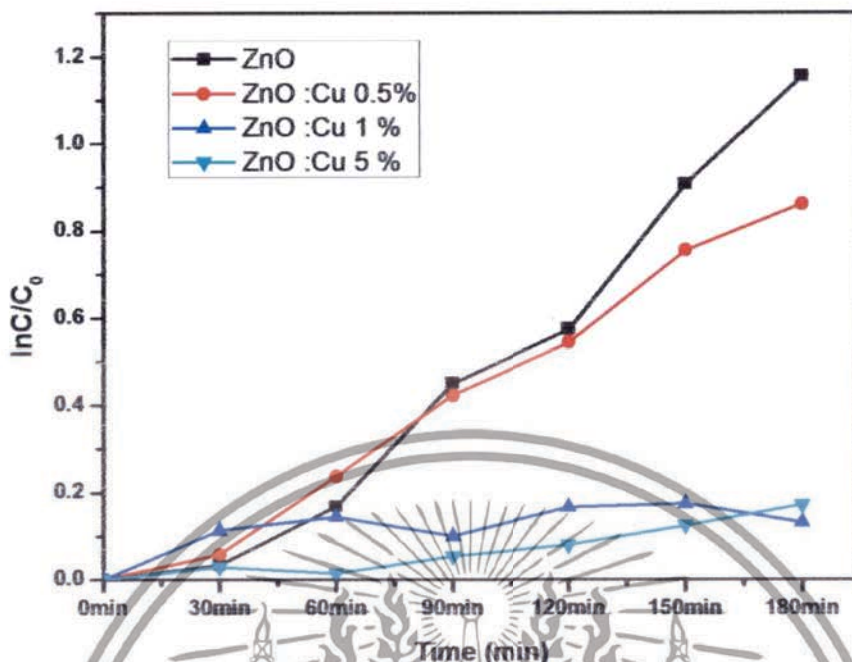
รูปที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดอัลตราไวโอเล็ต ที่เวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



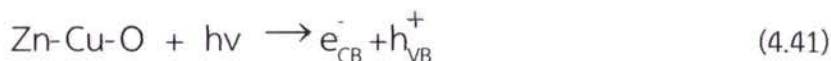
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ค่าการดูดกลืนของสีย้อม โรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยจิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน จิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ (ก.) 100 : 0, (ข.) 99.5 : 0.5, (ค.) 99 : 1 และ (ง.) 95 : 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสงจากหลอดอัลตราไวโอเลต ที่เวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

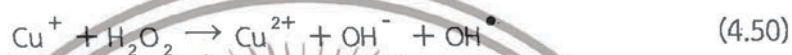
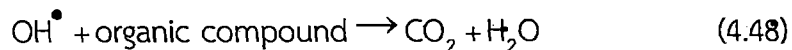


รูปที่ 4.20 อัตราการสลายตัวของสีย้อมโรดามาย บี (Rhodamine B) ที่ย่อยสลายด้วยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณอัตราส่วน ซิงค์: คอปเปอร์ ต่าง ๆ ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต

จากผลการวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงด้วยหลอดซินอนและหลอดอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเห็นว่าการลดลงของช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามมีผลต่อการตอบสนองต่อแสงของซิงค์ออกไซด์ที่ความยาวคลื่นมากขึ้น และการผสมคอปเปอร์ลงไปทำให้คอปเปอร์ไอออนมีส่วนช่วยในการย่อยสลายสีย้อมโดยที่คอปเปอร์ไอออนจะจับกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจากซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่เรดิคอลกับน้ำในระบบ ส่งผลให้ภายในระบบต้องการไอออนบวกเพื่อมาทำปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในลำดับสุดท้ายเมื่อกระบวนการสมบูรณ์ ซึ่งกลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยใช้ซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกแสดงได้ตามสมการดังนี้ [23,24]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กล่าวคือคอปเปอร์ไอออนจะช่วยเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\bullet}) ซึ่งมีส่วนในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกระตุ้นในการย่อยสลายโรดามาย บี เมื่อปริมาณคอปเปอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้วการลดลงของช่องว่างแถบพลังงานของ ซิงค์ออกไซด์เมื่อผสมด้วยคอปเปอร์ยังช่วยลดพลังงานกระตุ้นดังแสดงในสมการข้างต้นและยังสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การประยุกต์นำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาใช้เป็นวัสดุยับยั้งเชื้อรา *Trichoderma* spp.



รูปที่ 4.21 การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อรา *Trichoderma* spp. ด้วยสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ปริมาณดังนี้ (ก) น้ำปลอดประจุ (ข) ซิงค์ออกไซด์ (ค) คอปเปอร์ออกไซด์ (ง) ซิงค์ : คอปเปอร์ 99 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ ในอาหาร PDB และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 (ต่อ) การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อรา *Trichoderma* spp. ด้วยสารประกอบซิงค์ คอปเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วน ชิงค์ : คอปเปอร์ ปริมาณดังนี้ .(ก) น้ำปลอดประจุ (ข) ชิงค์ออกไซด์ (ค) คอปเปอร์ออกไซด์ (ง) ชิงค์ : คอปเปอร์ 99 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ ในอาหาร PDB และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

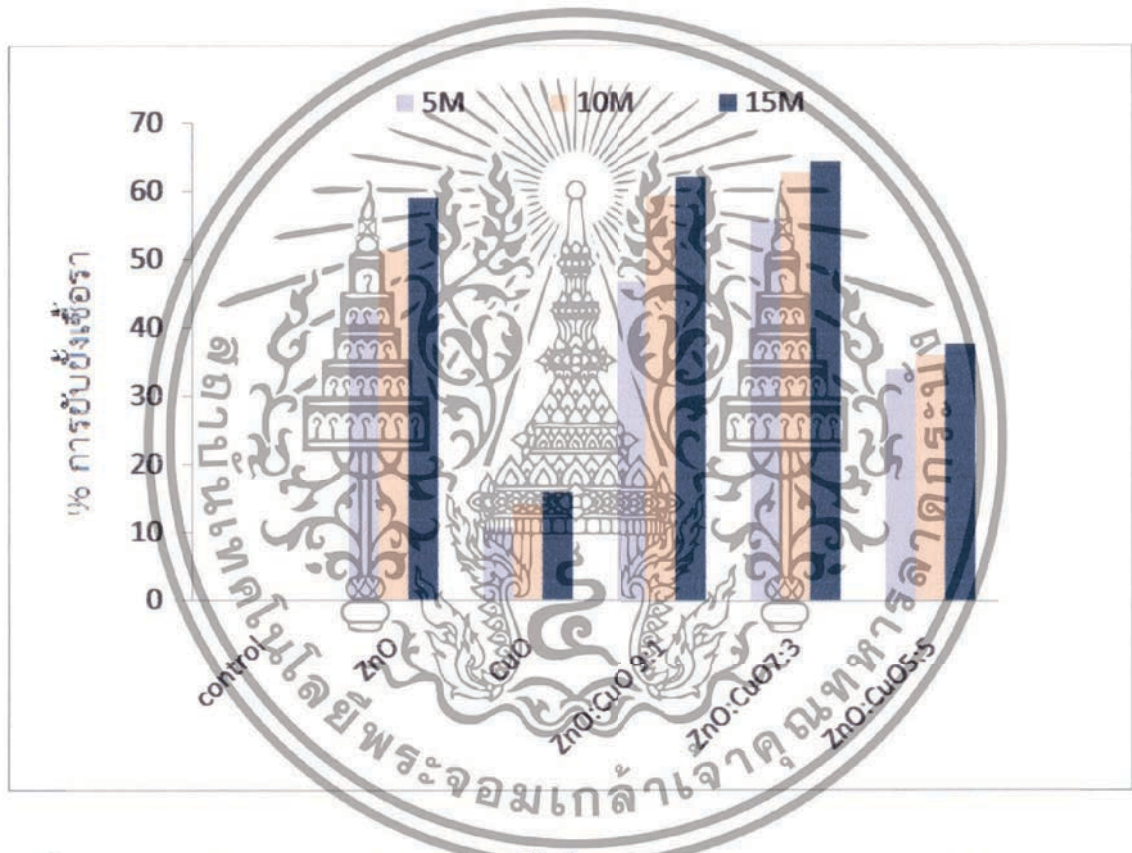


- รูปที่ 4. 21 (ต่อ) การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อรา *Trichoderma* spp. ด้วยสารประกอบ ชิงค์ คอปเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วน ชิงค์ : คอปเปอร์ ปริมาณดังนี้ (ก) น้ำปลอดประจุ (ข) ชิงค์ออกไซด์ (ค) คอปเปอร์ออกไซด์ (ง) ชิงค์ :คอปเปอร์ 99 : 10 (จ) 70 : 30 และ (ฉ) 50 : 50 ตามลำดับ ในอาหาร PDB และนำไปป่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Trichoderma* spp. ด้วยสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน

ความเข้มข้น (ไมลาร์)	การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา (%)					
	control	ZnO	CuO	ZnO:CuO 9:1	ZnO:CuO 7:3	ZnO:CuO 5:5
5	0	42.40	10.73	46.83	55.82	33.94
10	0	51.47	14.11	59.44	62.85	36.06
15	0	59.07	15.86	62.12	64.35	37.62



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรากับความเข้มข้นของสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 ไมลาร์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายจากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ด้วยซิงค์ออกไซด์ , คอปเปอร์ออกไซด์ และสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณ 90 : 10, 70 : 30, 50 : 50 ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นที่ผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ 5 , 10 และ 15 ไมลาร์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ กับวัสดุคอมโพสิต ที่ปริมาณอัตราส่วนดังที่กล่าวต่าง ๆ กัน ซึ่งลักษณะการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ที่เปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารตัวอย่างกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

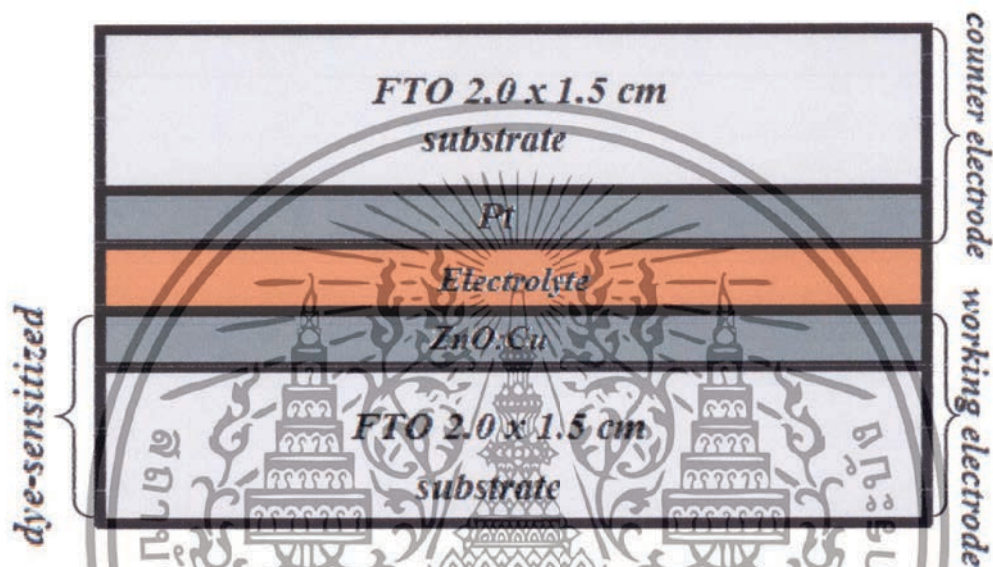
เปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยใช้วัสดุต่างๆกัน โดยเชื้อราที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ *Trichoderma* spp. เป็นเชื้อราที่ย่อยสลายเนื้อไม้ทำให้ผุพังและทำให้เนื้อไม้เกิดการเปลี่ยนสีไป ทดลองโดยใช้วัสดุที่เตรียมได้ ผสมเข้าไปใน PDB เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา จากผลการ ทดลองเมื่อวัดบริเวณการเจริญเติบโตของเชื้อราจากจานเพาะเชื้อหลังจากบ่มในตู้เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน แล้วนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ตาม สมการที่ 4.52 พบว่าที่ความเข้มข้น 5-15 โมลาร์ สารตัวอย่างมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ เชื้อราตามปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ซึ่งจึงคือออกไซด์บริสุทธิ์ที่มีการยับยั้งการเจริญเติบโต ของเชื้อราเกิดขึ้น สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราอยู่ระหว่าง 42-59 เปอร์เซ็นต์ และคอปเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ เพียงเล็กน้อย แต่สูงกว่าตัวควบคุมที่ใช้ น้ำปัสสาวะ สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการ เจริญเติบโตของเชื้อราอยู่ระหว่าง 10-15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ ออกไซด์มาใช้เป็นสารตัวอย่างสำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราพบว่าแนวโน้มการเจริญเติบโต ของเชื้อราลดลง หรือมีค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ โลหะออกไซด์ที่บริสุทธิ์ และในอัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 70 : 30 มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราที่ สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกอัตราส่วน แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีการผสมคอปเปอร์ออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากผลกระทบของไอออนทั้ง Zn^{2+} และ Cu^{2+} ที่เข้าไปในเมทาบออลิซึมของเซลล์ ราที่มากกว่าปกติโดย เคลื่อนที่ผ่านไปยังบริเวณผนังเซลล์ แล้วส่งผลกระทบต่อกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับ ภายในเซลล์ ซึ่งไอออนทั้งสองจะเข้าไปสร้างสารอนุมูลอิสระ (free radical) เกิดขึ้นภายในเซลล์ เช่น ในไมโทคอนเดรีย เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อเซลล์ในระบบการหายใจ หรือสารอนุมูล อิสระจะส่งผลทำให้เกิดการหยุดยั้งหรือทำลายกระบวนการสร้างโปรตีน, ดีเอ็นเอ หรือ การขนส่ง เอนไซม์ต่างๆออกสู่ภายนอกเซลล์ ทำให้ภายในเซลล์ของเชื้อราเกิดความผิดปกติและเกิดความไม่ สมดุล เป็นสาเหตุทำให้เซลล์ราเกิดการยุบตัวหรือแตกจนตายได้ในที่สุด [54,55]

$$\% \text{ การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100 \quad (4.52)$$

เมื่อ R_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการเจริญเติบโตของเชื้อราในชุดควบคุม
 R_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางการเจริญเติบโตของเชื้อราในชุดทดสอบ

4.5.3 การประยุกต์นำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงชั่วคราวทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ในรูปที่ 4.23 แสดงส่วนประกอบของเซลล์ที่ใช้สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงชั่วคราวทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ภายใต้เงื่อนไขอัตราการผสมระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ปริมาณ 0:100, 0.5 : 99.5 ; 1 : 99, 5 : 95 และ 10 : 90 ตามลำดับ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

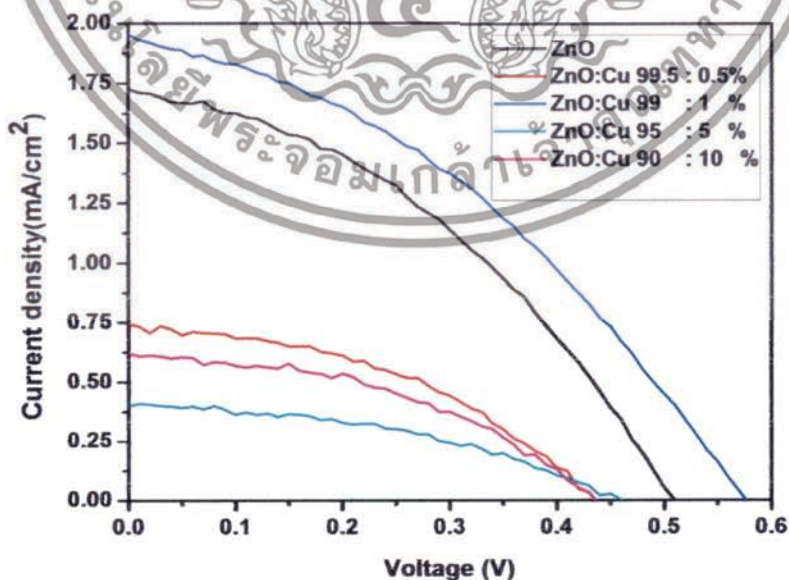


รูปที่ 4.23 แสดงส่วนประกอบของเซลล์โดยใช้สารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาเป็นวัสดุปรับปรุงชั่วคราวทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชั่วคราวทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผสมคอปเปอร์ในอัตราส่วนซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 0 : 100, 0.5 : 99.5 , 1 : 99, 5 : 95 และ 10 : 90 ตามลำดับ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กระแสจกนำไฟฟ้าเป็นฐานรองรับ จากกราฟที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าซิงค์ออกไซด์เมื่อทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ แล้วนำไปประกอบเป็นชั่วคราวทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีขึ้น ที่อัตราส่วนผสมคอปเปอร์ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ที่ยังไม่มีการผสมด้วยคอปเปอร์สาเหตุที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ผสมด้วยคอปเปอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากว่าคอปเปอร์มีส่วนช่วยในการลดข้อจำกัดของซิงค์ออกไซด์ในการนำมาเป็นชั่วคราวทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือซิงค์ออกไซด์มักเกิดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน (recombination process) กับสีย้อมหรืออิเล็กโตรไลต์ในวงจรไฟฟ้าภายในเซลล์ และซิงค์ออกไซด์มีการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ได้ปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นการผสมด้วยคอปเปอร์แล้วทำให้ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น เพราะคอปเปอร์มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามที่ค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคบเพียง 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นเมื่อทำการผสมด้วยคอปเปอร์เข้าไปใน ซิงค์ออกไซด์ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามที่กว้างถึง 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงส่งผลให้คอปเปอร์ เกิดการสร้างชั้นพลังงานตรงกลางของแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์ลดลง ทำให้การตอบสนองต่อแสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าซิงค์ออกไซด์มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางด้านแสงสีแดง (red shift) จึงส่งผลทำให้ซิงค์ออกไซด์ที่ผสมด้วยคอปเปอร์ตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ได้สูงขึ้น [56] จากตารางที่ 4.6 สังเกตได้ว่าเมื่อทำการผสมในสัดส่วนของ ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ปริมาณ 99 : 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงค่าความหนาแน่นของกระแสสูงสุดอยู่ที่ 1.96 mA/cm^2 และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion Efficiency) สูงสุดมีค่า 0.42 เปอร์เซ็นต์ และบ่งชี้ว่ามีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของอัตราส่วนดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบแท่งนาโน (nanorods) ซึ่งประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในโครงสร้างดังกล่าวที่เป็นแบบ 1 มิติ จะส่งผลให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี ทำให้มีการกระจายแสงภายในเซลล์ไฟฟ้าทำงานได้มากขึ้นด้วย ทำให้มีการกักเก็บอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างได้เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนรวดเร็วกว่าโครงสร้างแบบอนุภาคนาโน (nanoparticles) [48] ซึ่งแบบจำลองการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของโครงสร้างแบบแท่งนาโนและอนุภาคนาโนแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของวัสดุผสมมากขึ้น จะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพต่ำลง อาจเกิดมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระบบมีความล่าช้าจึงให้ประสิทธิภาพพลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยในการใช้ออนุภาคแท่งนาโน และอนุภาคนาโนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งพบว่าอนุภาคแท่งนาโนให้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าสาเหตุเกิดจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์ไฟฟ้าทำงานที่สูงกว่า [57]



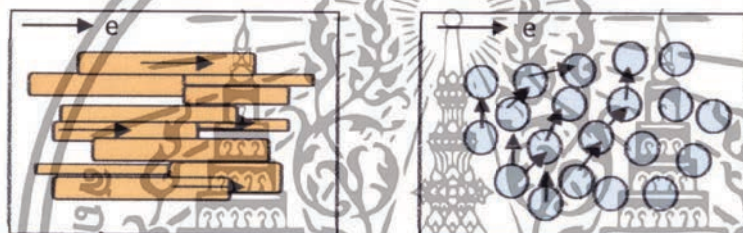
รูปที่ 4.24 กราฟการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์ทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของ

ซิงค์ออกไซด์ และสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าทางไฟฟ้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ เปรียบเทียบกับสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

Sample Zn : Cu (%)	Open circuit voltage, V_{oc} (V)	Short circuit current, J_{sc} (mA/cm^2)	Fill factor (FF)	Energy conversion efficiency (η)
Pure ZnO	0.51	1.73	0.39	0.34
99.5 : 0.5%	0.43	0.74	0.43	0.14
99 : 1 %	0.57	1.96	0.37	0.42
95 : 5 %	0.50	0.41	0.46	0.09
90 : 10 %	0.37	0.62	0.50	0.12



รูปที่ 4.25 ภาพจำลองแสดงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของแท่งนาโน (Nanorods) และอนุภาคนาโน (Nanoparticles)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อสังเคราะห์สารประกอบหลายหน้าที่ของซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ในระดับนาโนด้วยวิธีตกตะกอนร่วม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในหลากหลายหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ให้มากยิ่งขึ้น ภายใต้ 3 เงื่อนไข คือการเปลี่ยนสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ เงื่อนไขการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น และเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณอัตราส่วนผสมคอปเปอร์ต่อซิงค์ โดยมีปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ในอัตราส่วนต่างกัน สำหรับในเงื่อนไขการเปลี่ยนสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ทำการศึกษาสารตั้งต้น 3 ชนิด ได้แก่ ซิงค์อะเซเตต ไดไฮเดรต, ซิงค์ไนเตรท เฮกซะไฮเดรต และซิงค์คลอไรด์ เพื่อศึกษาผลกระทบของสารตั้งต้นต่อสมบัติทางโครงสร้าง ลักษณะทางพื้นผิว เพื่อหาสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการเตรียมซิงค์ออกไซด์ เงื่อนไขเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทำการศึกษามีดังนี้ 0.1 โมลาร์ , 0.4 โมลาร์ , 0.7 โมลาร์ และ 1.0 โมลาร์ และศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารตั้งต้นต่อสมบัติทางโครงสร้าง ลักษณะทางพื้นผิว เพื่อหาความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการเตรียมซิงค์ออกไซด์ และเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณอัตราส่วนผสมคอปเปอร์ต่อซิงค์ โดยมีปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ ดังนี้ 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 และ 50 : 50 และศึกษาผลกระทบปริมาณอัตราส่วนต่อสมบัติทางโครงสร้าง ลักษณะทางพื้นผิว สมบัติทางแสง และการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย

การวิเคราะห์โครงสร้างของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ซิงค์อะเซเตต ไดไฮเดรต, ซิงค์ไนเตรท เฮกซะไฮเดรต และซิงค์คลอไรด์ สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเหมือนกันที่ตำแหน่ง $2\theta = 31.73^\circ, 34.40^\circ, 36.21^\circ, 47.49^\circ, 56.52^\circ, 62.89^\circ, 67.99^\circ$ และ 69.10° สัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ตามลำดับ สอดคล้องกับเฟสของซิงค์ออกไซด์ JCPDS Card No. 36-1451) ตามลำดับ ซึ่งเป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ ที่มีลักษณะแบบ เฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ ขนาดผลึกระหว่าง 38-77 นาโนเมตร เมื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จาก ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต มีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งติดกัน ส่วนผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากซิงค์ไนเตรท เฮกซะไฮเดรต มีลักษณะที่ของพื้นผิวที่ไม่ชัดเจน ลักษณะเป็นแฉกรวมตัวกัน และในส่วนของซิงค์คลอไรด์ลักษณะที่สังเกตได้ พบว่ามีรูปร่างเป็นแบบอนุภาคกิ่งทรงกลม นอกจากนี้พบว่าผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์มีการก่อตัวในโครงสร้างที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นต้น 3 ชนิด ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลสำคัญในการเลือกสารตั้งต้นดังกล่าวมาใช้ในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ต่อไป

ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ที่ 0.1 , 0.4 , 0.7 , 1.0 โมลาร์ จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีลักษณะของความเข้มข้น 0.1 และ 0.4 โมลาร์ มีตำแหน่งของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ยืนยันว่าเป็นโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตซ์เช่นเดียวกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นไป 0.7 และ 1.0 โมลาร์พบว่าสามารถสังเกตเห็นเฟสเจือปนเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากเกินไปภายในระบบการตกตะกอน จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาการตกตะกอนไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงตรวจพบเฟสเจือปนดังกล่าว ซึ่งขนาดผลึกของความเข้มข้นทั้ง 4 มีขนาดระหว่าง 33-54 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากความเข้มข้นต่างกันนั้นให้ลักษณะรูปร่างที่เป็นกึ่งทรงกลมเช่นเดียวกัน แต่มีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งในส่วนของความเข้มข้น 0.1 ให้ขนาดที่เล็กที่สุด แต่การสังเคราะห์แต่ละครั้งให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่น้อยมาก ดังนั้นที่ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ จึงเป็นความเข้มข้นที่ถูกนำมาใช้

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอัตราส่วนของคอปเปอร์ในซิงค์ออกไซด์ โดยมีปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างซิงค์ : คอปเปอร์ดังนี้ 99.5 : 0.5, 99 : 1, 95 : 5, 90 : 10, 70 : 30 และ 50 : 50 วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อผสมคอปเปอร์ที่อัตราส่วน 0, 0.5, และ 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวอย่างสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตซ์ และไม่ปรากฏเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้น เนื่องจากการเข้าไปแทรกตัวหรือแทนที่ของ ซิงค์ไอออน ด้วย คอปเปอร์ไอออน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคอปเปอร์ ที่อัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ พบเฟสเจือปนเข้ามา ซึ่งตรงกับคุณสมบัติของเฟสของคอปเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเมื่อผสมคอปเปอร์เข้าไปในปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการก่อตัวของคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น โดยมีการแยกออกจากเฟสของซิงค์ออกไซด์ จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะของรูปร่างของซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ มีการก่อตัวเป็นรูปร่างแบบแท่ง (rod like structure) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ระนาบ 002 ในอัตราส่วนดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงสุด เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมคอปเปอร์มากขึ้นพบว่าขนาดและรูปร่างของผงนาโนซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงกลับมาก่อตัวเป็นแบบอนุภาคกึ่งทรงกลมเช่นเดิม เพียงแค่ขนาดเปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของผงนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ทำเป็นวัสดุผสมกับคอปเปอร์ออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผสมคอปเปอร์ พบว่าปริมาณธาตุทั้งสองที่ผสมกันนั้นมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณการผสมเข้าไปตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ จากการวิเคราะห์พลังงานการสั่นของพันธะของผงซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี พบพลังงานการสั่นของซิงค์ออกไซด์เมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์ที่อัตราส่วน 0-10 เปอร์เซ็นต์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

แต่เมื่อปริมาณการผสมคอปเปอร์เพิ่มขึ้น พบว่าสเปกตรัมในแต่ละพลังงานการสั่นของซิงค์ออกไซด์จะ

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่อนแอลงไป เนื่องจากการผสมคอปเปอร์เป็นจำนวนมากส่งผลต่อพื้นผิวของสารตัวอย่างที่หยาบขึ้น อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การกระเจิงของแสงเปลี่ยนไป จึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบสเปกตรัมของรามาน ได้ที่อัตราส่วนการผสมคอปเปอร์ 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาศสมบัติทางแสงด้วยการวัดการสะท้อนของแสงด้วยเทคนิคยูวีวิชันนิสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในโหมดการสะท้อน พบว่าซิงค์ออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนสูงสุดถึง 80 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อมีการผสมด้วยคอปเปอร์พบว่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนลดลงตามปริมาณการผสมคอปเปอร์ เนื่องจากการที่ผสมคอปเปอร์ลงไปมีผลทำให้ตัวอย่างมีลักษณะของสีที่เปลี่ยนเข้มมากขึ้น เนื่องจากคอปเปอร์มีสีดำดังนั้นเมื่อผสมคอปเปอร์ปริมาณมากจึงทำให้เกิดการดูดกลืนแสงมากกว่าสะท้อนแสง และจากค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนดังกล่าว สามารถนำขอบของการสะท้อนไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) ได้ โดยใช้สมการของ Kubelka-Munk ซึ่งพบว่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์ที่ผสมด้วยคอปเปอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการสร้างระดับชั้นพลังงาน 3d ของ คอปเปอร์ไอออนอยู่ด้านล่างของแถบความนำของซิงค์ออกไซด์ จึงส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามลดลง

จากการนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาประยุกต์ใช้งาน โดยในครั้งแรกได้มีการนำซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายสีย้อม โรดามาย บี ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดอัลตราไวโอเลต และกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดซินนอนที่มีช่วงความยาวคลื่นในย่านอัลตราไวโอเลต และตามองเห็น พบว่า ซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือด้วยคอปเปอร์ มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมโรดามาย บีสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเลตได้ดี และภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดซินนอนพบว่าซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มีการย่อยสลายสีย้อมที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ที่ไม่มีการผสมด้วยคอปเปอร์ สาเหตุที่เมื่อผสมคอปเปอร์เข้าไปแล้วทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงย่านตามองเห็นดีขึ้นเนื่องจากแถบพลังงานที่ลดลง จึงส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์มีการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น ผลการทดลองต่อมาได้นำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาใช้เป็นวัสดุยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Trichoderma* spp. ภายใต้เงื่อนไขที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ในปริมาณ 90 : 10, 70 : 30, 50 : 50 เพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของซิงค์ออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ ที่ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง 5, 10 และ 15 โมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าที่ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสูงสุดและอัตราส่วนระหว่างซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วน ซิงค์ : คอปเปอร์ ที่ 70 : 30 มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสูงสุดถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว บ่งชี้ได้ว่า เมื่อมีการผสมคอปเปอร์ออกไซด์เข้าไปในซิงค์ออกไซด์ในรูปของวัสดุผสม หรือวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารตัวอย่างทั้งสองมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อราทั้งคู่ และเมื่ออยู่รวมกันคาดว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และในสถานการณ์ประยุกต์ใช้งานในการนำสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์มาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงชั่วคราวในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ มาประกอบเป็นชั้นอิเล็กโทรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง สาเหตุที่เลือกใช้ซิงค์ออกไซด์เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งนำที่มี

แถบพลังงานกว้าง ดังนั้นคาดว่าเมื่อนำมาใช้เป็นขั้วทำงานจะทำให้มีการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ดีและสามารถที่จะสังเคราะห์ได้โครงสร้างที่หลากหลาย และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้งานจากการทดสอบ พบว่าซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์สามารถให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซิงค์ออกไซด์ที่บริสุทธิ์ และในอัตราส่วนซิงค์ : คอปเปอร์ที่ 99 : 1 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีที่สุดถึง 0.42 เปอร์เซ็นต์ แต่สาเหตุที่ในอัตราส่วนดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงสุดเพราะลักษณะโครงสร้างของอัตราส่วนดังกล่าวเป็นแบบอนุภาคแท่งนาโน (nanorods) แต่ขณะที่อัตราส่วนอื่นๆ มีลักษณะทางโครงสร้างแบบอนุภาคคานาโน ซึ่งในอนุภาคแท่งนาโนให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอนุภาคทรงกลมและอนุภาคแท่งนาโนยังมีประสิทธิภาพในการกักเก็บอิเล็กตรอนในขั้นตอนที่เกิดจากการกระเจิงของแสง ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว บ่งชี้ว่าซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์สามารถที่จะนำไปศึกษาเพิ่มเติมในของการประยุกต์ใช้งานหรือการศึกษาสมบัติที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีอยู่ในรูปของสารประกอบซิงค์คอปเปอร์ออกไซด์ เช่นสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนไป

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- 5.2.1. ก่อนเริ่มทำงานวิจัยควรศึกษาให้เข้าใจก่อนทำการทดลองเพื่อช่วยลดขั้นตอนและความผิดพลาดในการทดลอง
- 5.2.2. กระบวนการบดสารหากมีตะแกรงร่อนผงในขั้นตอนสุดท้าย จะช่วยส่งผลทำให้ได้อนุภาคที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น
- 5.2.3. การเก็บสารที่สังเคราะห์ได้ควรเก็บใส่ขวดที่แห้งสนิทและสะอาด เพื่อป้องกันความชื้นในอากาศ
- 5.2.4. การทดลองอาจเกิดความผิดพลาดหรือเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ซึ่งอาจจากเครื่องมือหรือผู้ทำการทดลอง ดังนั้นจึงควรที่จะทำการทดลองซ้ำ เพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าว

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในเตรียมสารต้องมีความสะอาด และไม่ใช้อุปกรณ์ร่วมกับสารอื่นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารอื่น
- 5.2.2. ขณะทำการทดลองควรป้องกันตัวเองทุกครั้ง ด้วยการสวมถุงมือ ใส่หน้ากาก เพื่อป้องกันสารเคมี
- 5.3.3 ควรเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการสังเคราะห์ตามปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนเพิ่มเติม เพราะอาจมีปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. A. Luck, M. J. Moravan, J. E. Garland, B. S. Sonji, D. Roy, "Chemisorptions of bacterial receptors for hydrophobic amino acids and sugars on gold for biosensor applications: a surface Plasmon resonance study of genetically engineered proteins", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 19 (2003), pp. 249-259.
- [2] M. Losurdo, M. M. Giangregorio, G. V. Bianco, A. Sacchetti, P. Capezzuto, G. Bruno, "Enhanced absorption in Au nanoparticles/a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells exploiting Au surface Plasmon resonance", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 93 (2009), pp.1749-1754.
- [3] L. A. Lyon, M. D. Musick, P. C. Smith, B. D. Reiss, D. J. Peña, M. J. Natan, "Surface Plasmon resonance of colloidal Au-modified gold films", *Sensor and Actuators B*, vol. 54 (1999), pp. 118-124.
- [4] W.G. Xu, S.F. Liu, S.X. Lu, S.Y. Kang, Y. Zhou, H.F. Zhang, "Photocatalytic degradation in aqueous solution using quantum-sized ZnO particles supported on sepiolite", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 351 (2010), pp. 210-216.
- [5] I. Fatimah, S. Wang, D. Wulandari, "ZnO/montmorillonite for photocatalytic and photochemical degradation of methylene blue", *Applied Clay Science*, vol.53 (2011), pp. 553-560.
- [6] T. Ganesh, J. H. Kim, S. J. Yoon, B-H Kl, N.N. Maldar, J. W. Han, S-H Han, "Photoactive curcumin-derived dyes with surface anchoring moieties used in ZnO nanoparticle-based dye-sensitized solar cells", *Materials Chemistry and Physics*, vol.123 (2010), pp. 62-66.
- [7] A. E. Suliman, Y. Tang, L. Xu, "Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol.91, 1658-1662 (2007).
- [8] S. R. Ferreira, R. J. Davis, Y-J Lee, P. Lu, J. W.P. Hsu, "Effect of device architecture on hybrid zinc oxide nanoparticle:poly (3-hexylthiophene) blend solar cell performance and stability", *Organic Electronics*, vol 12 (2011), pp. 1258-1263.
- [9] I. M. Joni, A. Purwanto, F. Iskandar, M. Hazataa, K. Okuyama, "Intense UV-light absorption of ZnO nanoparticles prepared using a pulse combustion-spray pyrolysis method", *Chemical Engineering Journal*, vol 155 (2009), pp. 433-441.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] N. Han, X. Wu, L. Chai, H. Liu, Y. Chen, “Counterintuitive sensing mechanism of ZnO nanoparticle based gas sensors”, *Sensors and Actuators B*, vol.150 (2010), pp. 230–238
- [11] J. H. Jun, J. Yun, K. Cho, I-S Hwang, J-H Lee, S. Kim, “Necked ZnO nanoparticle-based NO₂ sensors with high and fast response”, *Sensors and Actuators B* , vol. 140 (2009) , pp. 412–417
- [12] J. H. Jun, H. Seong, K. Cho, B-M Moon, S. Kim, “Ultraviolet photodetectors based on ZnO nanoparticles”, *Ceramics International* , vol. 35 (2009), pp. 2797–2801
- [13] Y. Li, X. Dong, C. Cheng, X. Zhou, P. Zhang, J. Gao, H. Zhang, “Fabrication of ZnO nanorod array-based photodetector with high sensitivity to ultraviolet”, *Physica B*, vol. 404 (2009), pp. 4282–4285
- [14] Rmutphysics, นาโนเทคโนโลยี (online) , 2014 , Available: www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm
- [15] Stkc, วิศวกรรมและเทคโนโลยี (online), 2007, Available: web2.stkc.go.th/?q=taxonomy/term/17/all&page=130
- [16] Trueplookpanya, นาโนเทคโนโลยี (online), 2012, Available: www.trueplookpanya.com/new/cms_detail/knowledge/13232-00/
- [17] Chemtrack, นาโนซิงค์ออกไซด์(online), 2008, Available: www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=5&ID=6
- [18] Blogger, ซิงค์ออกไซด์ (online), 2012, Available: nanozincoxide.blogspot.com/2012/08/1.html
- [19] Webelements, copper oxide (online), 2012, Available: www.webelements.com/compounds/copper/copper_oxide.html
- [20] Elecnet.chandrakasem, substitution, (online), 2013, Available: www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/chaptor_4/substitution.html
- [21] Wikipedia ,วัสดุผสม, (online), 2014, Available: th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%AA%E0%B8%94%E0%B8%B8%E0%B8%9C%E0%B8%AA%E0%B8%A1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[22] Kku, electrospin, (online), 2013, Available: [gsmis.gs.kku.ac.th/publish/get_file?name =Pacharaporn_28Dec09.doc&path =public/publish _files/file/original/9/2013-01-07 _ GsPublishArticle_10359. doc& content_type= application/ msword](http://gsmis.gs.kku.ac.th/publish/get_file?name=Pacharaporn_28Dec09.doc&path=public/publish_files/file/original/9/2013-01-07_GsPublishArticle_10359.doc&content_type=application/msword)

[23] nanoyo, Photocatalyst กับ TiO2 (online), 2013, Available: www.nanoyothai.com/1301931/photocatalyst-%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A-tio2

[24] Vcharkarn, Photocatalytic Oxidation (online), 2010, Available: www.vcharkarn.com/vcafe/179138

[25] Foodnetworksolution, mold / รา (online), 2014, Available: www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0831/mold-%E0%B8%A3%E0%B8%B2

[26] Student.chula, Kingdom fungi(online), 2014, Available: www.student.chula.ac.th/~53370153/

[27] FungalBiology ,Trichoderma, (online), 2014, Available: www.archive.bio.ed.ac.uk/jdeacon/FungalBiology/sapstain.htm

[28] HyNAE ,เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (online), 2014, Available: www.kmutt.ac.th/hy-nae/สีย้อมไวแสง

[29] Nanotec, Thermogravimetric Analysis (TGA) (online), 2014, Available: www.nanotec.or.th/th/?page_id=569

[30] Kmitl, เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน(online), 2014, Available: www.kmitl.ac.th/sisc/TGA/Tgamodel.htm

[31] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ทฤษฎีและหลักการทํางานเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 1. 2543. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[32] Purdue, Scanning Electron Microscope(online), 2014, Available: www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm

[33] Wikipedia , Raman_spectroscopy, (online), 2014, Available: www.en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy

[34] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, พิมพ์ครั้งที่ 2. 2554. กรุงเทพฯ : บริษัทชวนพิมพ์ 50 จำกัด, 2554.

[35] Ch.K.Srikanth,P.Jeevanandam “Effect of anion on the homogeneous precipitation of precursors and their thermal decomposition to zinc oxide”, **Journal of Alloys and Compounds** , vol.486 (2009), pp. 677–684.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[36] N. Samaele, P. Amornpitoksuk, S. Suwanboon "Effect of pH on the morphology and optical properties of modified ZnO particles by SDS via a precipitation method", *Powder Technology*, vol.203 (2010), pp.243–247

[37] V. Etacheri, R. Roshan, and V. Kumar "Mg-Doped ZnO Nanoparticles for Efficient Sunlight-Driven Photocatalysis", *Applied materials & interfaces*.

[38] J. Zhang Li, J. B. Zhong, W. Hu, Y. Lu, J. Zeng, Y. Ch. Shen "Fabrication of tin-doped zinc oxide by parallel flow co-precipitation with enhanced photocatalytic performance", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol.16 (2013), pp. 143-148

[39] R. Saravanan, S. Karthikeyan, V.K. Gupta, G. Sekaran, V. Narayanan, A. Stephen "Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination", *Materials Science and Engineering C*, vol. 33 (2013), pp. 91–98

[40] K. Jayanthi, Santa Chawla, K.N. Sood, Manisha Chhibara, Sukvir Singh "Dopant induced morphology changes in ZnO nanocrystals", *Applied Surface Science*, vol. 255 (2009), pp.5869–5875

[41] S. Singhal, J. Kaur, T. Namgyal, R. Sharma "Cu-doped ZnO nanoparticles : Synthesis, structural and electrical properties", *Physica B*, vol. 407 (2012), pp.1223–1226

[42] B. Li, Y. Wang, "Facile synthesis and photocatalytic activity of ZnO-CuO nanocomposite", *Superlattices and Microstructures*, vol. 47 (2010), pp.615-623

[43] R. Saravanan, S. Karthikeyan, V.K. Gupta, G. Sekaran, V. Narayanan, A. Stephen, "Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination", *Materials Science and Engineering C* (2012)

[44] M. Karimi, M. Ezzati, S. Akbari, M. Behtaj Lejbini "ZnO microparticles, ZnO nanoparticles and Zn_{0.9}Cu_{0.1}O nanoparticles, toward ethanol vapor sensing: A comparative study" *Current Applied Physics*, vol.13 (2013), pp.1758-1764

[45] C. Jayaseelan, A. Abdul Rahuman, A. Vishnu Kirthi, S. Marimuthu, T. Santhoshkumar, A. Bagavan, K. Gaurav, L. Karthik, K.V. Bhaskara Rao "Novel microbial route to synthesize ZnO nanoparticles using *Aeromonas hydrophila* and their activity against pathogenic bacteria and fungi", *Spectrochimica Acta Part A*, vol.90 (2012), pp. 78–84

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [46] K. Mageshwari, R. Sathyamoorthy “Flower-shaped CuO Nanostructures: Synthesis, Characterization and Antimicrobial Activity”, **J. Mater. Sci. Technol.**, (2013)
- [47] M. Gusattia, G. Sérgio Barroso, C. Eduardo, D. Souzaa, J. Rosárioa, R. Limaa, C. Miliolia, L. Silvaa, H. Riellaa, N. Kuhnena “Effect of Different Precursors in the Chemical Synthesis of ZnO Nanocrystals”, **Materials Research** ,vol. 14(2) 2011, pp. 264-267
- [48] M. H. Lai, M. W. Lee, Gou-Jen Wang and M. F. Tai. “Photovoltaic Performance of New-Structure ZnO–nanorod Dye Sensitized Solar Cells” , **Int J Electrochem Sc**, vol. 6(2011) , pp.2122–2130
- [49] M. Mukhtar, L. Munisa, R.I Saleh, “Co-Precipitation Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Zinc Oxide Particles Doped with Cu^{2+} Ions”, **Materials Sciences and Applications**, vol. 3 (2012), pp.543-551
- [50] J. Yang, X. Liu, L. Yang, Y. Wang, Y. Zhang, J. Lang, M. Gao and M. Wei, “Effect of different annealing atmospheres on the structure and optical properties of ZnO nanoparticles” , **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 485 (2009), pp. 743–746.
- [51] A. Escobedo Morales, E. Sanchez Mora, and U. Pal, “Use of diffuse reflectance spectroscopy for optical characterization of un-supported nanostructures” , **REVISTA MEXICANA DE FÍSICA S**, vol.53(5) (2006), pp.18–22
- [52] K.G. Kanade, B.B. Kale, Jin-Ook Baeg, Sang Mi Lee, Chul Wee Lee, Sang-Jin Moon, Hyunju Chang, “Self-assembled aligned Cu doped ZnO nanoparticles for photocatalytic hydrogen production under visible light irradiation”, **Materials Chemistry and Physics**, vol. 102 (2007), pp.98–104
- [53] M. Wang, F. Ren, G. Cai, Y. Liu, Sh. Shen and L Guo, “Activating ZnO nanorod photoanodes in visible light by Cu ion implantation” , **Nano Research** DOI 10.1007/s12274-013-0401-7.
- [54] W. Raza, W. Hongsheng, Sh. Qirong, “Use of response surface methodology to evaluate the effect of metal ions (Ca^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+}) on production of antifungal compounds by *Paenibacillus polymyxa*”, **Bioresource Technology**, vol. 101 (2010), pp.1904–1912

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[55] Y.N. Chang , M. Zhang , L. Xia, J. Zhang, and G. Xing, “The Toxic Effects and Mechanisms of CuO and ZnO Nanoparticles” *Materials*. 2012;(5)2850-2871; doi:10.3390/ma5122850.

[56] Ch. Liu, Z. Liu, J. Li, Y. Li, J. Han, Y. Wang, Z. Liu, J. Ya, “Cu-doping ZnO/ZnS nanorods serve as the photoanode to enhance photocurrent and conversion efficiency”, *Microelectronic Engineering*, vol. 103 (2013), pp.12–16

[57] S. Yodyingyong, Q. Zhang, K. Park, C. S. Dandeneau, X. Zhou, D. Triampo and G. Cao. “ZnO nanoparticles and nanowire array hybrid photoanodes for dye-sensitized solar cells”, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, vol. 96 (2010), pp.073115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกัญต์กนิษฐ์ ผิวแดง เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2532 ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี ในปีการศึกษา 2551 ได้เข้าศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ที่คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และในปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ

การเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุม

1. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการในงาน วทท. ครั้งที่ 38 จัดขึ้นวันที่ 17-19 ตุลาคม 2555
2. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการ 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium ในระหว่างวันที่ 5-8 ธันวาคม 2555
3. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการ Siam Physics Congress 2013 (SPC 2013) ในระหว่างวันที่ 21-23 มีนาคม 2556
4. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการ International Conference on Engineering, Applied Science, and Technology (ICEAST 2013) ในระหว่างวันที่ 21-24 สิงหาคม 2556
5. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการ 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium ในระหว่างวันที่ 18-21 ธันวาคม 2556

การตีพิมพ์ผลงานวิจัย

1. K. Phiwadang, Sininart Suphankij, Wanichaya Mekprasart and Wisanu Pecharapa, "Synthesis of CuO nanoparticles by precipitation method using different precursors", *Energy Procedia*, Volume 34, 2013, Pages 740-745.
2. K. Phiwadang, M. Phensajjai and W. Pecharapa, "Study of antifungal activities of CuO/ZnO nanocomposites synthesized by co-precipitation method", *Advanced Materials Research*, 802 (2013) pp. 89-93.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering
(EMSES2012)

Synthesis of CuO Nanoparticles by Precipitation Method Using Different Precursors

Kankanit Phiwdang^{a*}, Sineenart Suphankij^a, Wanichaya Mekprasart^{a,b} and
Wisanu Pecharapa^{a,b}

^aCollege of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang Bangkok 10520, Thailand
^bThEP Center, CHE, 328 Siayuthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

Abstract

CuO nanoparticles were synthesized by precipitation method using different precursors as copper nitrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) and copper chloride (CuCl_2) with post-heating comparing between as-synthesized and after calcinations. Relevant properties of as-synthesized nanoparticles were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Overall results suggest that the formation of CuO nanostructures with different shape, size and morphology can be achieved using different precursors via this process. The improvement in their crystallinity and purification can be further attained by post calcinations process.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.
Selection and peer-review under responsibility of COE of Sustainable Energy System, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

Keywords: copper oxide, precipitation methods, nanoparticles

* Corresponding author. Tel.: +66-23298000 ext 3117; fax: +66-23298265
E-mail address: kpewisan@gmail.com

1. Introduction

Copper oxide (CuO) is one of potential p-type semiconductors and gains considerable attentions due to its excellent optical, electrical, physical, and magnetic properties. CuO with narrow band gap of 1.2 eV is extensively used in various applications such as catalysis [1], solar energy conversion [2], gas sensor [3] and field emission [4]. However, these novel properties can be improved by synthesis in CuO nanostructures that shown excellent performance comparing to bulk counterpart. Different nanostructures of CuO are synthesized in form of nanowire, nanorod, nanoneedle, nano-flower and nanoparticle. In the past decades, various methods have been proposed to produce CuO nanoparticles with different sizes and shapes such as thermal oxidation [5], sonochemical [6], combustion [7] and quick-precipitation [8-9]. Among these processes, precipitation method is a facile way which attracts considerable interest in industries because of low energy and temperature, inexpensive and cost-effective approach for large scale production and good yield.

In the present work, the main objective is to investigate the effect of starting precursors on structural properties of CuO nanostructures synthesized via precipitation method and annealing process. Copper nitrate and copper chloride was chosen as starting precursors. The as-prepared precipitates were analyzed by scanning electron microscopy, X-ray diffractometer and Fourier Transform Infrared Spectroscopy.

2. Experimental

CuO nanostructures were synthesized by precipitation method using copper chloride (CuCl_2) and copper nitrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). First, each precursor was dissolved in 100 ml deionized water to form 0.1 M concentration. NaOH solution (0.1 M) was slowly dropped under vigorous stirring until pH reached to 14. Black precipitates were obtained and repeatedly washed by deionized water and absolute ethanol for several times till pH reached 7. Subsequently, the washed precipitates were dried at 80 °C for 16 h. Finally, the precursors were calcined at 500 °C for 4 h, investigated by X-Ray Diffractometry (XRD). The morphology was monitored by scanning electron microscope (SEM). Chemical properties were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy.

3. Results and Discussion

The XRD patterns of as-synthesized and calcined CuO nanoparticles using different precursors are shown in Figure 1. XRD peaks confirm that the formation of CuO from each precursor was in monoclinic phase. The characteristic peaks located at $2\theta = 32.58^\circ$, 35.47° , 38.97° and 48.74° are assigned to (110), (002), (200) and ($\bar{2}02$) plane orientation of CuO (JCPDS 80-1268). For $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ material, the basic crystals with 4 main peaks of CuO in as-synthesized sample were obviously occurred. After calcination, the increase of intensity peak was obtained and XRD pattern is still identical to as-prepared precipitate pattern. This result indicates that the crystallinity of CuO was enhanced by sufficient nucleation energy from thermal treatment. For CuCl_2 material, the basic crystal of as-synthesized CuO was indistinctly appeared but the presence of CuO peaks was stronger occurred after calcinations process. XRD results suggest that the formation of CuO can be obtained by co-precipitation method. Good crystallinity of CuO is received by $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, comparing to CuCl_2 precursor and the increase of crystallinity and its size can be effectively achieved after annealing treatment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

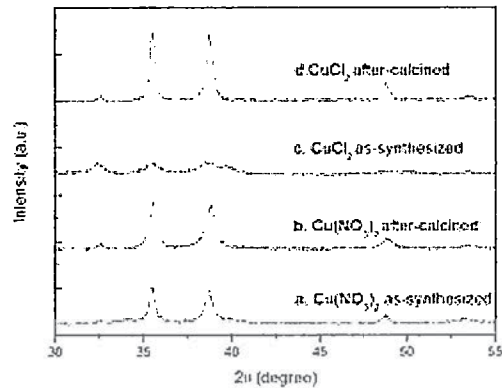


Fig. 1. XRD patterns of CuO nanoparticles prepared from (a) Cu(NO₃)₂ as-synthesized, (b) Cu(NO₃)₂ after calcinations, (c) CuCl₂ as-synthesized and (d) CuCl₂ after calcinations.

Meanwhile after-calcined sample started from CuCl₂ has a noticeable peak at 525 and 584 cm⁻¹ which are attributable to Cu–O stretching modes. All of samples have the absorption peaks in range of 1380-1640 cm⁻¹ that may be assigned to O–H bending vibrations combined with copper atoms [11]. Thus, FTIR result suggests that the formation of copper oxide compound is obtained after annealing process in this method accompanying the presence of Cu–O bonds corresponding to Cu–O stretching modes.

Figure 3(a-d) are SEM images illustrating the morphologies of CuO-nanoparticles prepared with different precursors via the precipitation method. As-prepared CuO precipitations using either Cu(NO₃)₂ or CuCl₂ are in good dispersion and found to be short nanorod-like structure. After calcinations at 500 °C, product of Cu(NO₃)₂ tends to agglomerate with increasing rod size meanwhile spherical particles and clustered form were clearly occurred in the product prepared from CuCl₂ precursor.

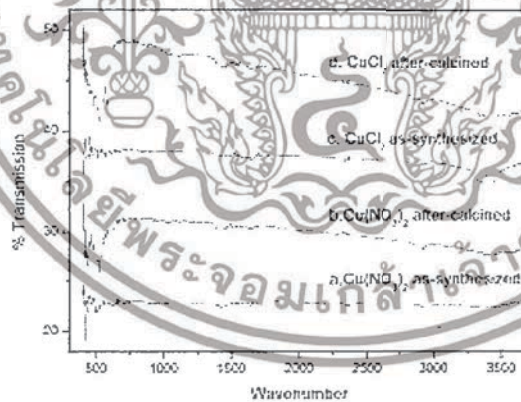
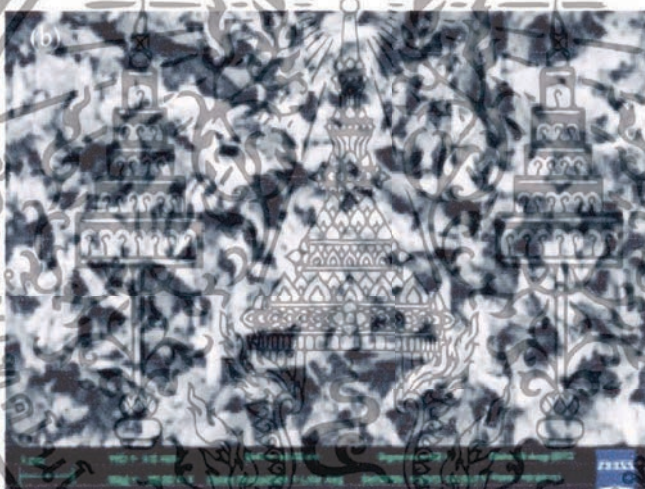


Fig. 2. FTIR spectra for the (a). Cu(NO₃)₂ as-synthesized, (b). Cu(NO₃)₂ after calcinations, (c). CuCl₂ as-synthesized and (d). CuCl₂ after calcinations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acknowledgements

This work has been financially supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology Thailand, through its program of Center of Excellence Network. This work has been also partially supported by Nation Research Council of Thailand (NRCT).

References

- [1] Jianliang C Yan, W Tianyi, Ma Yuping Liu, Zhongyong Yuan. Synthesis of porous hematite nanorods loaded with CuO nanocrystals as catalysts for CO oxidation. *J Nat Gas Chem* 2011;20: 669-676.
- [2] Jess K, Nicolas G, Richard R, Eric Miller. Advances in copper-chalcopyrite thin films for solar energy conversion. *Sol Energy Mat Sol C* 2009; 94:12-16.
- [3] Yang Z, Xiuli He, Jianping L, Huigang Z, Xiaoguang G. Gas-sensing properties of hollow and hierarchical copper oxide microspheres. *Sensor* 2007;128:293–298.
- [4] Bohr R H, Chun S Y, Dau C W, Tan J T, Sung J. Field emission studies of amorphous carbon deposited on copper nanowires grown by cathodic arc plasma deposition. *New Carbon Mater* 2009; 24:97-101.
- [5] Manmeet K, Muthea K P, Deshpande S K, Shipra Ch, Singh J B, Neetika V, Gupta S K, Yakhmi J V. Growth and branching of CuO nanowires by thermal oxidation of copper. *J Cryst Growth* 2011;289:670-675.
- [6] Narongdet W, Piyanut C, Naratip V, Wisanu P. Sonochemical Synthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles. *Energy Procedia* 2011;29:404-409.
- [7] Yamukyan M H, Manukyan K V, Kharatyan S L. Copper oxide reduction by combined reducers under the combustion mode. *Chem* 2008;137:636–642.
- [8] J Zhu, D Li, H Chen, X Yang, L Lu, X Wang. Highly dispersed CuO nanoparticles prepared by a novel quick-precipitation method. *Mater Lett* 2004;58:3324-3327.
- [9] Rujun W, Zhenye M, Zhenggui G, Yan Y. Preparation and characterization of CuO nanoparticles with different morphology through a simple quick-precipitation method in DMAC-water mixed solvent. *J Alloy Compd* 2010;504:45–49.
- [10] Banjong B, Rattanai B, Zongporn J, Naratip V. Grass blade-like microparticle MnPO₄·H₂O prepared by a simple precipitation at room temperature. *Power Techno* 2010;203:310–314.
- [11] Dubal D P, Dhawale D S, Salunkhe R R, Jamdade V S, Lokhande C D. Fabrication of copper oxide multilayer nanosheets for supercapacitor application. *J Alloy Compd* 2010;492:26–30.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Antifungal Activities of CuO/ZnO Nanocomposites Synthesized by Co-precipitation Method

Kankanit Phiwdang^{1,a}, Mongkol Phensaijai^{2,b} and Wisanu Pecharapa^{1,c}

¹College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

²Department of biology, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

^apd.kankanit@gmail.com, ^bkpmongko@kmitl.ac.th, ^ckpewisan@gmail.com

Keywords: CuO/ZnO, nanocomposites, co-precipitation method, antifungal activities

Abstract. In this work, series of CuO/ZnO functional nanocomposites were synthesized through co-precipitation method using $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and ZnCl_2 as starting materials with various molar ratio of copper:zinc, followed by annealing process at 600 °C for 2 hours to obtain CuO/ZnO nanocomposites. The structures of the composites were analyzed using X-ray diffraction and field emission scanning electron microscopy. For XRD result, diffraction peaks of the composites reveal the well-crystalline characteristic indicating the mixture phase of CuO and ZnO. SEM results show different morphologies of CuO, ZnO and Cu-Zn oxide nanocomposites appearing in quasi spherical structure. The composites were used for antifungal activity via agar disk diffusion method. It is found that the composite with certain ratio of Cu:Zn exhibits superiority in partial inhibition of strain *Aspergillus flavus* *Trichoderma* comparing to either pure CuO or ZnO.

Introduction

At the present time, nanoparticles inward to the size range of 100 nm have attracted great interest due to their rather high surface to volume ratio with unique morphologies, leading to practical utilizations in various potential applications of science and technology. Among them, metal oxide nanoparticles such as CuO, ZnO, TiO_2 and MgO are well recognized because of their good physical properties suitable for widespread applications including optoelectronic, semiconductor technology and fungal inhibition [1-4]. Copper oxide has been extensively utilized as antifungal agent accompanying low cost, abundant resource, simple preparation [5]. However, some fungi strain cannot be inhibited by CuO. Therefore, composite form with compatible elements or compounds is one of effective method for improving CuO functionality. It is known that ZnO has been comprehensively advertent owing to its fascinating properties such as high exciton binding energy of 60 meV, strong chemical-thermal stability and most of all, its ability for resisting microbial activity [6]. In consequence, the advantage of CuO coupled with ZnO is easy incorporation, improvement of antifungi properties and similar physical-chemical properties comparing to other metal oxide materials [7]. Moreover, both material are rather cheap and environmental friendly. CuO/ZnO composites with different sizes and shapes can be synthesized various methods such as electrodeposition [8], hydrothermal process [9], electrospinning [10] and co-precipitation [11]. Among these mentioned processes, precipitation method is a facile way which attracts considerable interest because of low temperature process, inexpensive and cost-effective approach for large scale production. The practical applications of CuO-ZnO composite in solar energy conversion applications, photocatalysis and gas-sensing have been recently reported [12-14]. Nevertheless, few literature has been so far focused on the study of antifungal properties of CuO-ZnO nanocomposite. In this study, we reports antifungal property (*Aspergillus flavus* *Trichoderma agents*) of CuO-ZnO nanocomposite synthesized by co-precipitation method with various molar ratio.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental procedure

Synthesis of CuO/ZnO nanocomposite

In typical procedure to synthesize a series of the composites, copper chloride dehydrate ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and zinc chloride ($\text{ZnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) were used as starting precursors of Cu and Zn source, respectively. The composites were prepared with various molar ratio of Cu:Zn as followed; 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 and 9:1. First, mixed precursors were dissolved in 100 ml deionized water by magnetic stirring. NaOH solution was slowly dropped under vigorous stirring until pH reached to 12 and kept at room temperature for 2 h. The precipitated products were filtered and washed several times by water until pH reached to 7 and washed twice by absolute ethanol, then dried in an oven at 80 °C for 24 h. After that, the as-prepared precipitated powders were calcined at 600 °C for 4 h to obtain powders of CuO/ZnO nanocomposite.

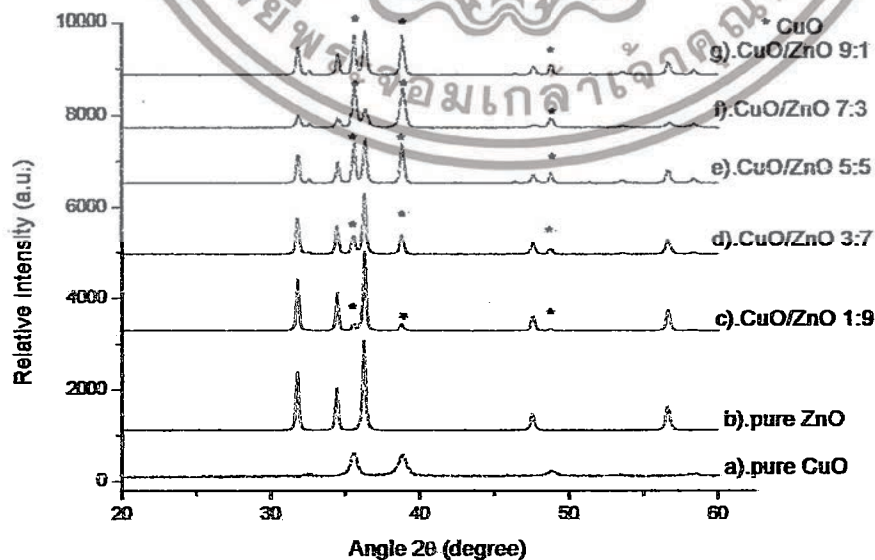
Material characterization

The crystallinity and phase composition of the material were investigated using X-ray diffractometer (X' Pert PRO) with monochromatic source of Cu K_α ($\lambda=0.15405$ nm) operating at 40 kV with a scan speed of 2s/step and recorded in the 2θ range from 20° to 60°. Surface morphologies of the composites were monitored by scanning electron microscope (ZEISSEVO-MA10) operated at 15 kV.

Antifungal activity

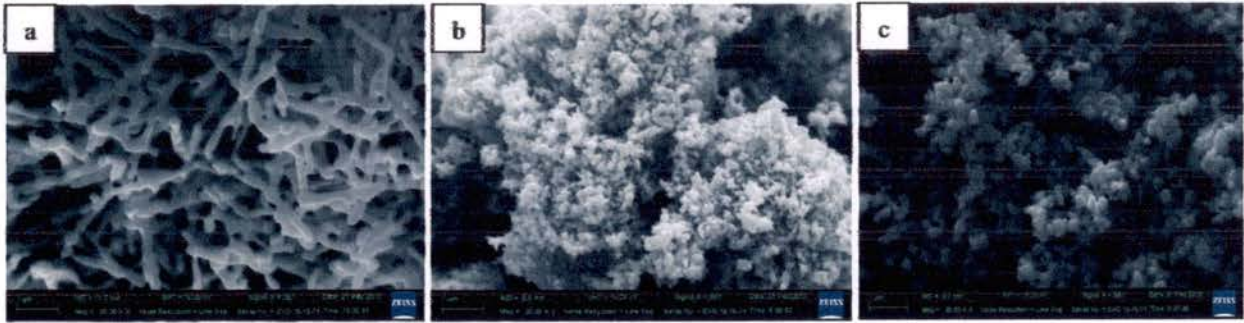
The fungi use in experiment in was *Trichoderma* sp. were obtained from the Department of Biology, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The antifungi activities of CuO/ZnO composites were estimated by agar disc diffusion method. Inhibition has been measured after 3 days of incubation at 37 °C. All experiments were repeated three times and found the arithmetic mean by measuring the diameter of fungal that showed the value in centimeters. Nutrient agar slants that contain 24 g of potato dextrose broth dissolved in 800 ml distilled water under heating and adding agar dissolved in 200 ml distilled water, then poured into petri-dish. All glassware and nutrient used were sterilized in an autoclave 120 °C for 15 min.

Results and Discussion



Figures. 1 X-Ray diffraction patterns of a) pure CuO, b) pure ZnO, c-g) Cu-Zn oxide compounds with various molar ratio of 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 and 9:1 respectively.

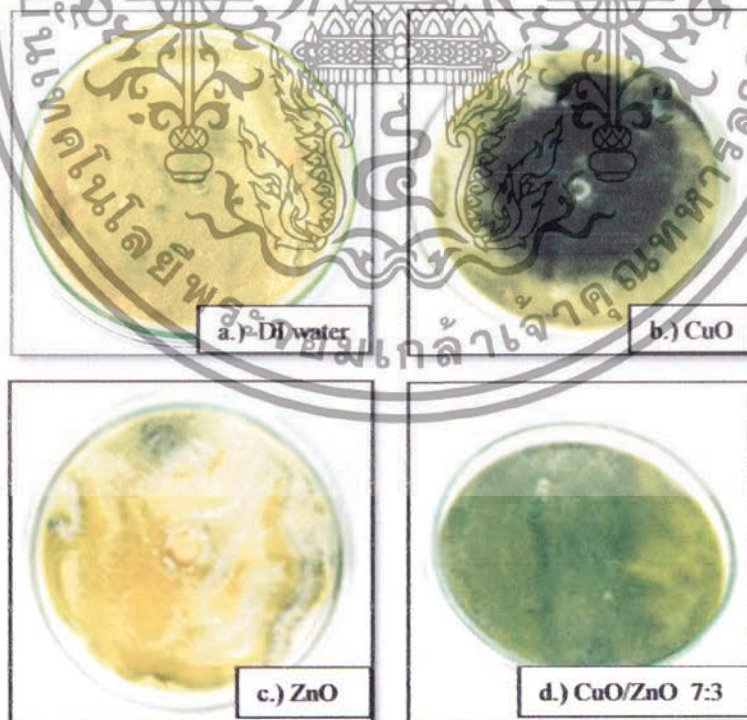
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figures. 2 SEM images of a) CuO, b) ZnO, c) CuO/ZnO composite with Cu:Zn ratio of 5:5.

Fig.1 shows the X-Ray diffraction patterns of the samples after calcined at 600 °C for 2 h. All diffraction peaks of the composites are prominent indicating the formation of monoclinic phase of copper oxide and hexagonal wurtzite of zinc oxide phases in the composite. The XRD peaks of mixed phases of copper oxide and zinc oxide for all samples are similar but intensity of CuO is sharp and intense with increasing of CuO content but conversely decreasing intensity of ZnO.

The morphologies of CuO, ZnO and CuO/ZnO nanocomposite at ratio 5:5 are illustrated in Fig.2. Formation of CuO is in form of nanorod-like structure as seen in Fig.2a. Meanwhile, as observed in Fig. 2b, pure ZnO sample shows the shape and size of uniform tiny particles with high agglomeration to be in big clusters. Fig. 2c illustrates the morphology of CuO/ZnO nanocomposite with molar ratio 5:5 indicating less agglomeration of CuO and ZnO and significant change to be small clusters of uniform quasi-spherical nanoparticles.



Figures. 3 Agar plate diffusion picture of antifungi after incubation for 3 day by a) DI water b) CuO c) ZnO d) CuO/ZnO nanocomposite with molar ratio of 7:3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Zone of partial repression of fungus growth using CuO, ZnO and CuO/ZnO with different molar ratio.

No.	Material	CuO/ZnO with various molar ratio	Average diameter of partial inhibition zone
1	CuO	pure	3.35
2	ZnO	pure	small
3	composite	1:9	2.67
4	composite	3:7	2.70
5	composite	5:5	3.03
6	composite	7:3	4.35
7	composite	9:1	3.67

Fig. 3 shows the photograph of agar plate diffusion results after 3 days of incubation. As shown in Fig. 3a, controlled condition using DI water indicated the absolute growth of fungi. Fig. 3b presents partial-inhibited zone of pure CuO, designating the diameter of inhibited fungus growth as 3.35 cm² that is able to damage the partial area of fungal cell membrane. On contrary, as seen in Fig. 3c, it is noticed that ZnO nanoparticles insignificantly inhibit the fungal growth. In the case of CuO/ZnO nanocomposite with various molar ratios, it is found that they partially inhibit fungus because of the high reproduction of spore. The regenerated spores result to the partial repression of *Trichoderma* sp. growth. High efficiency of fungi inhibition using CuO/ZnO composite was obtained from the composite with the ratio of Cu/Zn at 7:3 as shown in Fig. 3d. It is implied that the existence of ZnO in CuO matrix can enhance antifungal properties of CuO. This feature may be due to the greater and better in charge transfer between CuO and ZnO that can assist the fungi inhibition functionality of CuO. Transition of electrons within CuO still occurs, while pure ZnO itself cannot be activated due to its broad-band-gap that could be allude of the antifungal activity. It is conceived that electrons or correlated functional groups is responsible to initiate the cell membrane damage of the fungal. In such a case, the mechanism for antifungal activity charges transfer between the two semiconductor materials is different for the composites that could be more effective than either CuO or ZnO. The obtained results are summarized in Table. 1 and all the experiments were repeated three times with the average value were presented.

Summary

A series of Cu-Zn oxide compounds with various molar ratios of copper and zinc were successfully prepared via co-precipitation process. The obtained results were summarized as followed:

- Diffraction peaks of the composites are distinct, suggesting well-crystalline forming between CuO and ZnO in the composites.
- SEM results revealed the morphologies of rod-like CuO and particulate ZnO and quasi-spherical nanoparticles of Cu-Zn oxide composite.
- CuO/ZnO composite with Cu/Zn molar ratio of 7:3 repressed the optimum antifungal activities against of all samples.

Acknowledgments

This work has been financially supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology Thailand, through its program of Center of Excellence Network. This work has been also partially supported by Nation Research Council of Thailand (NRCT).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] J. Ramyadevi, K. Jeyasubramanian, A. Marikani, G. Rajakumar, A. A. Rahuman, Synthesis and antimicrobial activity of copper nanoparticles, *Mater.Lett.* 71 (2012) 114–116.
- [2] L. He1, Y. Liu1, A. Mustapha, M. Lin, Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*, *Microbiol.Res.* 166 (2011) 207–215.
- [3] K.J. Shieh, M. Li, Y. H. Lee, S.D. Sheu, Y.T. Liu, Y.Ch. Wang, Antibacterial performance of photocatalyst thin film fabricated by defection effect in visible light, *Nanomed –Nanotechnol.* 2 (2006) 121–126.
- [4] O. Yamamoto, J. Sawai, T.Sasamoto, Change in antibacterial characteristics with doping amount of ZnO in MgO–ZnO solid solution, *Inorg.Mater.* 2 (2000) 451–454
- [5] M. Sh. Hassan, T. Amna, O-B.Yang, M. H. El-Newehy, S. S. Al-Deyab, M.-S. Khil, Smart copper oxide nanocrystals: Synthesis, characterization, electrochemical and potent antibacterial activity, *Colloid Surface B.* 97 (2012) 201–206.
- [6] R.Chi. Wanga, H.Y. Lin, Cu doped ZnO nanoparticle sheets, *Mater.Chem.Phys.* 125 (2011) 263–266.
- [7] S. Singhal, J.Kaur, T. Namgyal, R. Sharma, Cu-doped ZnO nanoparticles: Synthesis, structural and electrical properties, *Physica B.* 407 (2012) 1223–1226.
- [8] Sh. Wei, Y. Chen, Y. Ma, Zh. Shao, Fabrication of CuO/ZnO composite films with cathodic co-electrodeposition and their photocatalytic performance, *J. Mol. Catal. A-Chem.* 331 (2010) 112–116.
- [9] S.J. Kim, Ch. W. Na, I.S. Hwang, J.H. Lee, One-pot hydrothermal synthesis of CuO–ZnO composite hollow spheres for selective H₂S detection, *Sensors Actuat. B chem.* 168 (2012) 83–89.
- [10] G. N. S. Vijayakumar, S. Devashankar, M. Rathnakumari, P. Sureshkumar, Synthesis of electrospun ZnO/CuO nanocomposite fibers and their dielectric and non-linear optic studies, *J. Alloy.Comp.* 507 (2010) 225–229.
- [11] Z. L. Liu, J.Ch. Deng, J.J. Deng, F.F. Li, Fabrication and photocatalysis of CuO/ZnO nano-composites via a new method, *Mater. Sci. Eng. B.* 150 (2008) 99–104.
- [12] R. Sahay, J.Sundaramurthy, P.SureshKumar, V.Thavasi, S.G.Mhaisalkar, S.Ramakrishna, Synthesis and characterization of CuO nanofibers, and investigation for its suitability as blocking layer in ZnO NPs based dyesensitized solar cell and as Photocatalyst inorganic dye degradation, *J. Solid State Chem.* 186 (2012) 261–267.
- [13] R. Saravanan, S. Karthikeyan, V.K. Gupta, G. Sekaran, V. Narayanan, A. Stephen, Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination, *Mat. Sci. Eng. C.* 33 (2013) 91–98.
- [14] D.H. Yoon, Ji. H. Yu, G. M. Choi, CO gas sensing properties of ZnO–CuO composite, *Sensor Actuat. B.* 46 (1998) 15–23.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advances in Material Science and Technology

10.4028/www.scientific.net/AMR.802

Study of Antifungal Activities of CuO/ZnO Nanocomposites Synthesized by Co-precipitation Method

10.4028/www.scientific.net/AMR.802.89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้