

การสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติคอปเปอร์ออกไซด์โครงสร้างนาโนสำหรับ  
การประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์

NANOSCALE SYNTHESIS AND CHARACTERIZATIONS OF COPPER OXIDE  
FOR SENSOR APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NANOSCALE SYNTHESIS AND CHARACTERIZATIONS OF COPPER  
OXIDE FOR SENSOR APPLICATION



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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติคอปเปอร์ออกไซด์โครงสร้างนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์

Special Project Title Nanoscale Synthesis and Characterizations of Copper Oxide For Sensor Application

นักศึกษา นายฐิตวัฒน์ มาบุญช่วย

รหัสประจำตัว 55110016

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง	
ดร.กรกช อ่อนละออ	
ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์	

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



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่.....๕๖.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2559

โครงการพิเศษเรื่อง

นักศึกษา

รหัสประจำตัว

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษา

การสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์

โครงสร้างนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์

นายฐิติวัฒน์ มาบุญช่วย

55110016

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

วิศวกรรมวัสดุนาโน

2558

ผศ.ดร.ทศติยาภรณ์ ทิววงศ์

### บทคัดย่อ

ในงานด้านอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด วัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีสมบัติให้ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการตรวจสอบแก๊สที่มีอยู่ในอากาศ โดยมีความสามารถในการตอบสนองที่รวดเร็ว รวมไปถึงความเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจวัด ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพคือ ชนิดของวัสดุ ธรรมชาติของวัสดุและโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาโครงสร้างวัสดุ เนื่องจากเป็นสมบัติที่สามารถควบคุมได้และส่งผลต่อคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดโดยตรง อีกทั้งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์วัสดุในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุผลที่อุปกรณ์ตรวจวัดส่วนใหญ่ต้องการพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารเป้าหมายมาก วัสดุที่เลือกใช้ในการศึกษาคือ วัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นวัสดุหนึ่งที่น่าไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัด วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ วิธีการตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสังเคราะห์และควบคุมขนาดของวัสดุให้ได้ตามต้องการ งานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยในการศึกษาโครงสร้าง คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย และการเติมสารเพิ่มความเสถียรภาพทางโครงสร้างไทโอกลิเซอรอล (Thioglycerol)... ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผ่านเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของวัสดุผ่านเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้เมื่อได้โครงสร้างที่เหมาะสม นำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดและนำไปตรวจคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อไป

คำสำคัญ : คอปเปอร์ออกไซด์, วัสดุนาโน, กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยวิธีการตกตะกอน

Special Project Title	Nanoscale synthesis and characterization of copper oxides for sensor applications
Student	Mr.Thitawat Maboonchuay
StudentID	55110016
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Assistant Professor Dr.Thutiyaporn Thiwawong

### ABSTRACT

This work was study nano scale structure of copper oxide depend on concentration of copper acetate monohydrates, concentration of sodium hydroxide and among of thioglycerol. Copper oxides were synthesized by precipitation method. The morphology and size are characterized by scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). when we knew the best structure of copper oxide, will be used with sensor which high sensitivity due to structure conform to this application. Besides, copper oxide can be used with another work such as antibacteria , photovoltagic , photodector and photo catalytic degradation of methyl orange, etc. .

Keyword : copper oxides, nanomaterials, precipitation method,

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี และทางปฏิบัติ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่ให้ความสนับสนุนความรู้และคำแนะนำ ตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมสำหรับอุปกรณ์นาโน (Electronic and control system for nanodevice laboratory : ECSN lab ) ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีที่สุดแก่ข้าพเจ้า ในการทำงานวิจัยและในทุกสถานการณ์ที่เกิดขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนสนิท นายเผ่าภูมิ เกิดคง ที่คอยให้ความช่วยเหลือสำหรับการทำรายงานวิจัยและแนะนำวิธีต่างๆ ในการหาแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว มาบุญช่วย สำหรับกำลังใจและความอบอุ่นที่มีให้เสมอมา คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในด้านวิชาการและศีลธรรมแก่ข้าพเจ้าตลอดในช่วงชีวิตของข้าพเจ้า

ฐิติวัฒน์ มาบุญช่วย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 รายละเอียดงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุนาโน.....	4
2.2 วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	8
2.2.1 สมบัติของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	9
2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	11
2.2.2.1 อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	11
2.2.2.2 เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	12
2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของวัสดุนาโน.....	17
2.3.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	17
2.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	18
2.4 การประยุกต์ใช้งานวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	19
2.4.1 สารต่อต้านอนุมูลอิสระและต่อต้านแบคทีเรีย.....	19
2.4.2 การประยุกต์เป็นวัสดุที่ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์.....	22
2.4.3 การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส.....	22
2.4.4 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	30
2.4.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์.....	34
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	
3.1 จุดประสงค์และออกแบบการทดลองวิจัย.....	41
3.1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1.2 แผนผังการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้าง.....	43

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	44
3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	44
3.2.2 การเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	44
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์.....	45
3.3.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	45
3.3.2 การตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	46
3.4 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น.....	47
3.4.1 เตรียมอุปกรณ์ตรวจวัด.....	47
3.4.2 การตรวจวัดความชื้น.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	49
4.2 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต.....	50
4.3 ผลการทดลองการเติมสารให้ความเสถียรทางโครงสร้างไทโอกลีเซอรอล.....	52
4.3.1 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์.....	52
4.3.2 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์.....	53
4.3.3 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์.....	55
4.3.4 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์.....	56
4.4 ผลการทดลองประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	58
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	60

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุตามการประยุกต์ใช้งาน.....	6
2.2 ปริมาณอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิด.....	21
2.3 ปริมาณโลหะที่สังเคราะห์ได้.....	34
2.4 แสดงขนาดของคอปเปอร์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์.....	35
3.1 เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต.....	40
3.2 เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	41
3.3 เงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอรอลเพื่อเพิ่มความเสถียร.....	41
3.4 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	44
4.1 ค่าอัตราส่วนพีคที่มุม 35.5 องศา และ 38.6 องศา ในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต.....	54
4.2 ค่าความต้านทานที่วัดได้ในอุปกรณ์ในความชื้นต่างๆ.....	55

\

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ถ้วยไลโคเร็กซ์ (ก) แสงที่ส่องจากภายนอก , (ข) แสงที่ส่องจากภายใน.....	4
2.2 ศิลปะเซรามิกเตอรูทาของประเทศอิตาลี.....	5
2.3 การเพิ่มพื้นที่ผิวในวัสดุ.....	6
2.4 โครงสร้างพื้นผิวของใบบัว.....	7
2.5 ออแกนเนลล์แม่เหล็กของสัตว์.....	8
2.6 การเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน.....	9
2.7 การเกิดปฏิกิริยา (ก)ปฏิกิริยาช้า, (ข)ปฏิกิริยาเร็ว.....	9
2.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนโลหะ.....	10
2.9 การสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์คอปเปอร์ออกไซด์.....	10
2.10 ลำดับการเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธี thermal oxidation.....	12
2.11 วิธีการทางไฟฟ้าเคมี (electro deposition).....	13
2.12 กระบวนการเกิดแบบ VS (ก) , กระบวนการเกิดแบบ VSL (ข).....	15
2.13 (ก) การเกิดเส้นใยนาโนในกระบวนการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) (ข) กระบวนการการเกิดออกซิเดชันโดยตรง (direct plasma oxidation).....	16
2.14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	17
2.15 การทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	18
2.16 การกระเจิงของอิเล็กตรอนในชิ้นงาน.....	19
2.17 (ก) ภาพจากกล้อง FESEM , (ข) ภาพจากกล้อง FETEM.....	20
2.18 พฤติกรรมการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ.....	21
2.19 (ก) แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (ข) การตรวจวัดพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
2.20 การตอบสนองความชื้นของอุปกรณ์ตรวจวัด ทั้ง 3 ตัวอย่าง.....	24
2.21 อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรไลซิส.....	25
2.22 การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดในปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น.....	25
2.23 ความสามารถในการตอบสนองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง.....	26
2.24 การตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณ 500 ppm และการคลายแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอุปกรณ์ตรวจวัด.....	26
2.25 ความเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดภายใต้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ppm ในระยะเวลา 30 วัน.....	27
2.26 ภาพโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สและขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	28
2.27 ภาพจากการส่อง FE-SEM (ก) ภาพข้างบน (top – view) , (ข) ภาพกำลังขยายสูง.....	28
2.28 ผลการทดสอบอุปกรณ์ (ก) ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามความดันที่เพิ่มขึ้น (ข) ค่าการตอบสนองการวัดแก๊สออกซิเจนในความดันต่างๆ.....	29
2.29 ค่าการวัดสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ตรวจวัดสองชนิด.....	30

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.30 วิธีการเตรียมขั้วแอโนดในแบตเตอรี่รี ลิเทียมไอออน.....	31
2.31 (ก.)กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในวัสดุประกอบ (ข.)ภาพที่ได้จาก SEM (a-d) ภาพที่ได้จาก TEM (e-f).....	32
2.32 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องไซคลิกโวลแทมมิเตอร์ (Cyclicvoltammeter).....	33
2.33 ผลการวิเคราะห์จรรยาสมมูลด้วยเครื่อง EIS.....	33
2.34 กราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในทุกเงื่อนไข (a) CZZ25-25-50 (b) CZZ40-20-40 c) CZZ50-25-25 (d) CZZ40-30-30 and (e) CZZ40-40-20.....	35
2.35 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกเงื่อนไขภายใต้อุณหภูมิต่างๆ.....	36
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย.....	39
3.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction).....	42
3.3 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	43
3.4 ขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดีจิตตอล.....	43
3.5 เครื่อง LCR.....	44
4.1 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขความเข้มข้น สารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	45
4.2 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขความเข้มข้น.....	46
4.3 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขความเข้มข้น สารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต.....	47
4.4 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขความเข้มข้น สารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต.....	47
4.5 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอลที่ ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์.....	48
4.6 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสาร ไทโอกลีเซอรอลความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์.....	49
4.7 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอล ที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์.....	50
4.8 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอรอล ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์.....	50
4.9 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอล ที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์.....	51
4.10 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสาร ไทโอกลีเซอรอลความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์.....	52
4.11 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอล ที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์.....	53

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสาร ไทโอกลีเซอรอลความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์.....	53
4.11 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในความชื้นต่างกัน.....	55
4.12 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในการใช้ซ้ำ (repeativity).....	56
4.13 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในตอบสนองต่อความชื้น (responsivity).....	56



## บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในการผลิตวัสดุเริ่มมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุ การสังเคราะห์วัสดุให้มีขนาดเล็กสามารถเผยความสามารถบางอย่างที่ไม่ปรากฏอยู่ในวัสดุขนาดใหญ่ เช่น อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถแสดงคุณสมบัติการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalyst) ในอนุภาคนาโนทองคำ สามารถแสดงสีของอนุภาคได้ เป็นสีชมพูแดงซึ่งสีของอนุภาคทองในขนาดปกติจะเห็นเพียงสีเดียวคือ สีเหลืองทอง อนุภาคนาโนเงิน สามารถแสดงสีของอนุภาคเป็นสีเหลืองได้แต่หากขนาดอนุภาคเงินมีขนาดใหญ่ขึ้น จะแสดงได้เพียงสีเดียวเท่านั้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับ การสังเคราะห์วัสดุเล็กในระดับนาโน ซึ่งทำให้มีงานวิจัยทางด้านวัสดุนาโนมีความน่าสนใจมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน การสังเคราะห์วัสดุนาโน การศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอนุภาคนาโน การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโน คุณสมบัติที่เด่นชัดในวัสดุที่มีขนาดเล็ก คือ พื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุนาโนเริ่มเข้ามามีบทบาทในการพัฒนางานวิจัยในหลายแขนง เช่น ทางด้านชีววิทยา มีการพัฒนาการขนส่งยาในรูปแบบของแคปซูล ทางด้านเคมี มีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ทางด้านวิศวกรรม มีการพัฒนาทางด้านคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เป็นต้น ในการศึกษาและพัฒนาวัสดุนาโนสามารถแบ่งชนิดวัสดุ ออกได้เป็น 3 ประเภทคือ วัสดุ 0 มิติ หรือ อนุภาคนาโน วัสดุ 1 มิติ หรือ ลวดนาโนและวัสดุ 2 มิติ หรือ แผ่นฟิล์มบางนาโน วัสดุที่ค่อนข้างนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดเป็นวัสดุนาโน 0 มิติหรือ อนุภาคนาโน แต่อย่างไรก็ตาม ความน่าสนใจอีกสิ่งหนึ่งคือ รูปร่างของวัสดุที่เกิดขึ้น รูปร่างวัสดุที่เปลี่ยนไปทำให้การประยุกต์ใช้งานแตกต่างกัน และเกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัสดุนาโน ต่างกัน การสังเคราะห์วัสดุนาโนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำโดยผ่านกระบวนการทางเคมี การสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเผา การสังเคราะห์ผ่านกระบวนการบด เป็นต้น ในการสังเคราะห์ วัสดุนาโนแต่ละกระบวนการมีการใช้พลังงานที่ต่างกันและการลงทุนต่างกัน วิธีการที่ง่ายต่อการ ศึกษา ลดการสิ้นเปลืองพลังงาน และลดต้นทุนการผลิตได้ คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้การสังเคราะห์ในสารละลาย โดยวิธีที่ใช้กำหนดโครงสร้างของวัสดุนาโนมีปัจจัยดังนี้ ความร้อน ความเข้มข้นของสารละลาย ค่า pH ของสารละลาย ในงานวิจัยนี้จะใช้เงื่อนไขค่า pH ของสารละลายเป็น ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำหนดโครงสร้างของวัสดุ

วัสดุนาโนที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยความสามารถที่หลากหลายของวัสดุนาโนนี้ เช่น ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทางชีววิทยา ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้แสงในการเร่งปฏิกิริยาเหมือนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า (solar cells) เนื่องจากมีพลังงานต้องห้ามต่ำ สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดแก๊ส (gas sensor) สามารถนำมาใช้เป็น ขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่เป็นวัสดุผสมคอปเปอร์ออกไซด์กับแกร์ฟีน เป็นต้น จากความสามารถดังกล่าว คอปเปอร์ออกไซด์ จึงเป็นวัสดุที่ค่อนข้างได้รับความสนใจในการพัฒนาโครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาที่มี ในการประยุกต์ใช้งาน

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ โครงสร้างของวัสดุนาโน ไม่สอดคล้องกับความต้องการประยุกต์ใช้งาน วัสดุชนิดเดียวกันที่มีโครงสร้างแบบเดียวไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยเลือกวิธีการทางเคมีแบบใช้สารละลาย ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัด เตรียมง่ายอีกทั้งยังสามารถเห็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ชัดเจน วิธีการสังเคราะห์นี้จะทำการวิเคราะห์ค่า pH ของสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อโครงสร้างอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการตรวจสอบสมบัติเฉพาะทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิวด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (scanning electron microscope : SEM)
- 1.2.3 ศึกษาแนวทางการนำวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์

## 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่เงื่อนไขต่างๆ
- 1.3.2 ศึกษาสมบัติของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้แก่ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางพื้นผิว ที่เงื่อนไขต่างๆ
- 1.3.3 ทำวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านเซนเซอร์และทดสอบคุณลักษณะเซนเซอร์ดังกล่าว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับโครงสร้างวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีการตกตะกอน
- 1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน
- 1.4.3 สามารถนำวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน ไปประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ด้านเซนเซอร์ให้เหมาะสม

## 1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

รายงานวิจัยเล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้  
 บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์งานวิจัย สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เข้าใจงานวิจัยมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะบอกถึงกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

บทที่ 4 เป็นผลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ การตรวจวัดโครงสร้างอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ



## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุนาโน

ในอดีตการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุเกิดจากภูมิปัญญาชาวบ้านที่นำวัสดุมาผ่านกระบวนการบางอย่างทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงและมีคุณสมบัติใหม่เกิดขึ้น วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจากฝีมือมนุษย์และเป็นความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในระดับนาโน คือ ถ้วยไลเคอร์กัส (Lycurgus cup) ถูกสร้างขึ้นโดยชาวโรมันในศตวรรษที่ 4 ถ้วยนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ เมื่อได้รับแสงสว่างจากภายนอกจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวแต่เมื่อให้แสงภายในถ้วย จะทำให้เห็นเป็นสีแดงและสีม่วง ปรากฏการณ์นี้ถูกคลายความฉงนโดย เดวิด บาร์เบอร์ (David Barber) และเียน ฟรีสโตน (Ian Freestone) ศึกษาถ้วยนี้ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope : TEM) พร้อมทั้งวิเคราะห์ห้องประกอบของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD) พบว่า ถ้วยนี้ประกอบด้วยอนุภาคอัลลอยด์ของธาตุเงินร้อยละ 66.2 อนุภาคทองแดงร้อยละ 31.2 และอนุภาคทองแดงร้อยละ 2.6 โดยอนุภาคเหล่านี้มีขนาดประมาณ 50-100 นาโนเมตร อีกทั้งยังพบอนุภาคโซเดียมคลอไรด์จำนวนมาก การเปลี่ยนสีของถ้วยเกิดจากการกระเจิงของแสงและการดูดกลืนแสง โดยอนุภาคทองดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ทำให้เห็นแสงสีแดง และสีม่วงเกิดจากการดูดกลืนแสงของอนุภาคทองแต่มีขนาดใหญ่กว่า ส่วนสีเขียวเกิดจากการกระเจิงแสงของอนุภาคเงินที่มีขนาดใหญ่กว่า 40 นาโนเมตร จะเห็นว่า ถ้วยไลเคอร์กัสประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีในระดับนาโน ทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากถ้วยอื่นๆ จึงถือว่าถ้วยไลเคอร์กัสเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางนาโนที่พบในยุคแรกๆ [1]



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.1 ถ้วยไลเคอร์กัส (ก) แสงที่ส่องจากภายนอก , (ข) แสงที่ส่องจากภายใน

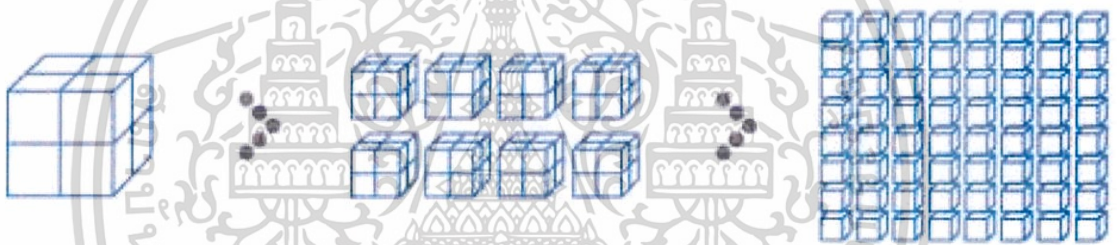
ในศิลปะสมัยโบราณของชาวโรมันมีการประดิษฐ์กระจกหลากสี หรือที่เรียกว่า กระจกโมเสค ที่ปรากฏอยู่ในโบสถ์ ซึ่งนักประติมากรรมนั้นไม่ทราบที่มาของปรากฏการณ์ของสีดังกล่าวรู้เพียงกระบวนการทำให้เกิดสีเพียงเท่านั้น ในกระบวนการมีการผสมอนุภาคนาโนทองระหว่างการสร้าง กระจกทำให้เห็นเป็นสีแดง และสีเหลืองเกิดจากสีของอนุภาคนาโนเงิน จะเห็นว่าขนาดอนุภาคระดับ นาโนทำให้กระจกโมเสคมีสีต่างกันออกไป รวมไปถึงงานศิลปะเครื่องปั้นดินเผา เช่น งานเซรามิก เดอรูทา (Deruta) เป็นเครื่องปั้นดินเผาที่มีลักษณะเป็นมันวาว จากรายงานพบว่าความมันวาวที่เป็นสีแดงและสีทองบนเนื้อเซรามิก เกิดจากอนุภาคนาโนทองแดงและเงินที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 5-100 นาโนเมตร อนุภาคนาโนส่งผลให้แสงที่มากกระทบมีการกระเจิงและทำให้แสงที่สะท้อนออกไปมี ช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน [1]



ภาพที่ 2.2 ศิลปะเซรามิกเดอรูทาของประเทศอิตาลี

เทคโนโลยีในปัจจุบันมีการพัฒนามากขึ้น เพื่ออำนวยความสะดวกต่างๆ ในการดำเนินชีวิต ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรม เครื่องนุ่มห่ม และอีกหลายอย่าง จนกระทั่งปัจจุบันการพกพาอุปกรณ์เพื่ออำนวยความสะดวก เห็นจะเป็นประเด็นที่สำคัญที่ส่งผลกับวงการอุตสาหกรรม การศึกษาค้นคว้าในงานวิจัยหลายด้าน จึงมุ่งเน้นไปที่การย่อส่วนของอุปกรณ์แต่ยังสามารถให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ใกล้เคียงกับ ขนาดเดิม ในระยะเวลาประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา ศาสตร์ทางด้านนาโนเทคโนโลยี เข้ามามีบทบาท สำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับวัสดุ ด้วยปรากฏการณ์ของวัสดุนาโนซึ่งมีขนาด 1 – 100 นาโนเมตรที่ทำให้วัสดุธรรมดาเปลี่ยนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติใหม่ เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ แสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการยับยั้งการ เจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย การเปลี่ยนสีของวัสดุเมื่อวัสดุนั้นมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโน อันได้แก่ สีของอนุภาคนาโนทองเมื่ออยู่ในระดับนาโนจะเปลี่ยนสีจากเหลืองทองเป็นชมพูแกมแดง สี ของอนุภาคนาโนเงินเปลี่ยนสีจากสีเทากลายเป็นสีเหลือง เป็นต้น คุณสมบัติหนึ่งที่ทำให้ได้รับความ น่าสนใจมาก คือ การเปลี่ยนประเภทของวัสดุ จาก วัสดุนำไฟฟ้าเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำได้ ด้วย

เหตุผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุจะส่งผลกระทบต่อระดับชั้นพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง ชั้นระดับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าสูงขึ้น เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ ปรากฏการณ์เชิงควอนตัมของวัสดุนาโน (Quantum phenomena) จากปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้วัสดุนาโนถูกใช้งานกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น เช่น ในการพัฒนาอุปกรณ์เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ วัสดุที่นำมาใช้ทำ คือ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่สามารถใช้พลังงานจากแสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้อยู่ในสถานะกระตุ้น นอกจากนี้ คุณสมบัติเด่นอีกประการของวัสดุนาโนได้แก่ พื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุมีขนาดเล็กลงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น งานที่ค่อนข้างใช้ประโยชน์จากคุณสมบัตินี้ได้แก่ งานทางด้านเคมี ใช้ประโยชน์ในเรื่องตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารซึ่งค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับวัสดุขนาดปกติ งานทางด้านวิศวกรรม ใช้ประโยชน์ในด้านการการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ นั่นคือ การพัฒนาวัสดุประกอบ (Composite materials) โดยใช้วัสดุนาโนอย่างน้อย 1 ชนิดในการผสมเข้ากับเนื้อวัสดุขนาดปกติ ทำให้วัสดุมีความคงทน มีความเหนียว หรือมีคุณสมบัติตามความต้องการ ซึ่งเรียกวัดประกอบที่มีส่วนผสมของวัสดุนาโนอย่างน้อย 1 ชนิด ว่า วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposite materials) [2]



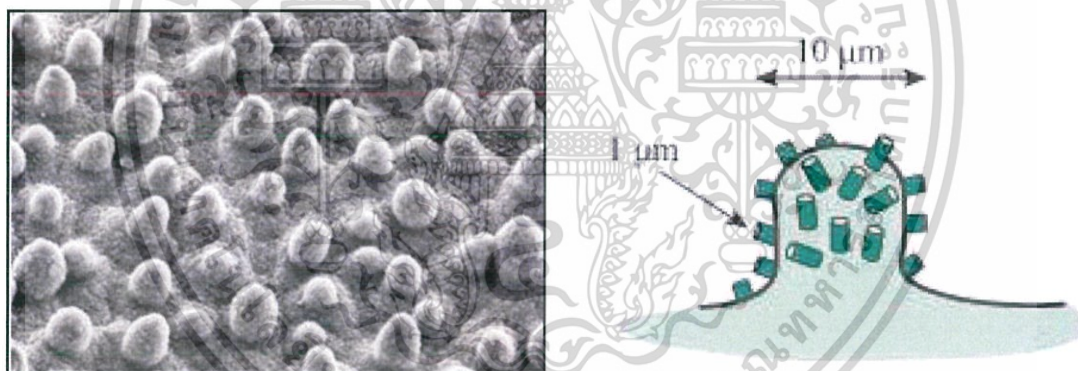
ภาพที่ 2.3 การเพิ่มพื้นที่ผิวในวัสดุ

ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายในวัสดุนาโน จึงทำให้สามารถแยกวัสดุนาโนแบ่งตามลักษณะรูปร่าง ได้ 3 ชนิด คือ วัสดุนาโนอนุภาคนาโน ( Nanoparticle materials) หรือวัสดุประเภทศูนย์มิติ(0-D) วัสดุเส้นใยนาโน ( Nanowire materials) หรือวัสดุประเภทหนึ่งมิติ (1-D) และวัสดุฟิล์มบางนาโน (Nano-thinfilms) หรือวัสดุประเภทสองมิติ (2-D) และทั้ง 3 ชนิด ยังสามารถแบ่งตามการประยุกต์ใช้งานเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รูปแบบดั้งเดิม (Original) รูปแบบบนพื้นผิว (Surface) และรูปแบบในเนื้อวัสดุ (Composite) ดังในตารางที่ 2.1 [2]

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุตามการประยุกต์ใช้งาน

มิติและประเภท	รูปแบบดั้งเดิม (Original)	รูปแบบบนพื้นผิว (Surface)	รูปแบบในเนื้อวัสดุ (Composite)
วัสดุนาโนอนุภาคนาโน (0-D)	อนุภาคนาโน	ผิวเคลือบอนุภาคนาโน	วัสดุผสมอนุภาคนาโน
วัสดุเส้นใยนาโน (1-D)	ท่อนาโนและเส้นใยนาโน	ผิวเคลือบร่างแหนาโน	วัสดุผสมเส้นใยนาโน
วัสดุฟิล์มบางนาโน (2-D)	ฟิล์มบางนาโน(เยื่อ)	ผิวเคลือบฟิล์มบางนาโน	โครงสร้างฟิล์มบางหลายชั้น

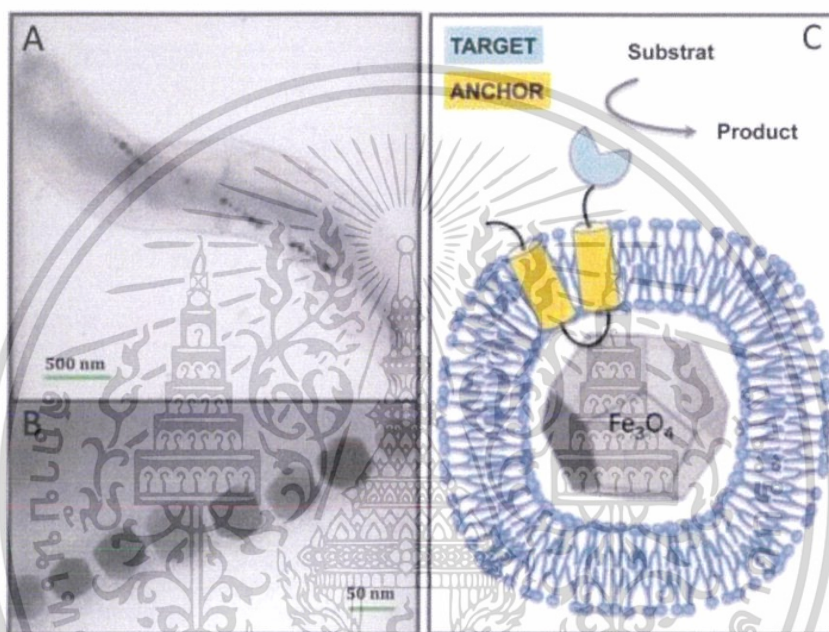
นอกจากวัสดุนาโนจะได้มาจากการสังเคราะห์ทางวัสดุศาสตร์แล้ว ในธรรมชาติสามารถพบวัสดุนาโนได้เช่นกัน ได้แก่ พื้นที่ผิวของใบบัวและพืชอีกหลายชนิด มีโครงสร้างพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือไม่เปียกน้ำ เมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า มีลักษณะเป็นปุ่มขนาดเล็ก เรียกว่า พาพิลลา (papilla) วางเรียงทั่วใบระยะห่างกัน 20-40 นาโนเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร ที่บริเวณปุ่มเล็กๆ มีขนเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ขนเหล่านี้เป็นสารประกอบคาร์บอนที่เป็นไข (Epicuticular wax crystals) เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ โครงสร้างในระดับนาโนที่อยู่บนโครงสร้างระดับไมโคร เรียกว่า โครงสร้างแบบลำดับชั้น (Hierarchical structure) จากโครงสร้างดังกล่าวที่อยู่บนใบบัว จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสัมผัส (effective contact area) กับหยดน้ำและสิ่งสกปรกน้อยกว่าพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระระดับเดียวกัน เมื่อหยดน้ำลงใบบัว หยดน้ำจะวางตัวเป็นทรงกลมอยู่บนยอดที่ขรุขระ ทำให้เกิดช่องว่างที่มาก ด้วยเหตุนี้ใบบัวจึงไม่เปียกน้ำ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect) อีกทั้งปรากฏการณ์นี้ยังสามารถทำให้ใบบัวปราศจากเชื้อโรคหรือแบคทีเรีย เนื่องจาก ไม่สามารถจับกับใบบัวได้และเมื่อมีน้ำไหลผ่านใบบัว น้ำจะชะล้างเชื้อโรคให้ออกไปจากใบบัวได้ นักวิทยาศาสตร์จึงนำความรู้นี้ไปใช้กับวัสดุที่สามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง (Self-cleaning surface) โดยทำให้วัสดุมีพื้นที่ผิวเลียนแบบใบบัว [1]



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างพื้นผิวของใบบัว

ตัวอย่างนาโนในธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งคือ อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่พบในแบคทีเรีย ในปี ค.ศ. 1975 ริชาร์ด เบลคมอร์ (Richard Blakemore) รายงานการสังเคราะห์สารแม่เหล็กกลุ่มแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในระดับนาโนของแบคทีเรียชนิดหนึ่ง เรียกแบคทีเรียกลุ่มนี้ว่า แมกนีโตแทกติกแบคทีเรีย (magnetotactic bacteria) โดยสารแม่เหล็กแมกนีไทต์ในแบคทีเรีย ทำหน้าที่เป็นเข็มทิศนาโน (Nano-compass) ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ตามทิศแม่เหล็กของโลก สารแม่เหล็กถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของอวัยวะที่เรียกว่า แมกนีโตโซม (magnetosome) นอกจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กจะพบในแบคทีเรียแล้ว ยังมีรายงานในสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เช่นกัน ได้แก่ นก ผึ้ง ปลาแซลมอน และเต่า เป็นต้น ซึ่งอนุภาคแม่เหล็กที่พบในสัตว์เหล่านี้มีผลต่อการนำทางของสัตว์

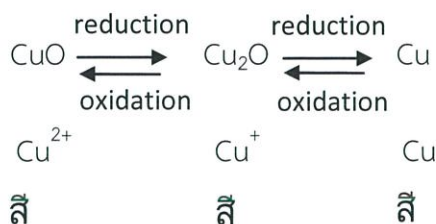
จากเรื่องราวที่กล่าวไปข้างต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุนาโนมีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรา มากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้การศึกษาวัดุนาโนเริ่มกว้างขวางมากขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน วัสดุนาโนที่มีความแตกต่างจากวัสดุธรรมดาเรียกความสนใจจากนักวิจัยได้เป็นอย่างดี นั่น คือ ความต้องการที่จะพัฒนาวัสดุจากที่มีอยู่ให้กลายเป็นวัสดุใหม่แต่คุณสมบัติเพิ่มขึ้นมา เพื่อการ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานจากวัสดุที่มีราคาแพง ใช้เพียงวัสดุที่มีราคาถูกแต่สามารถให้ คุณสมบัติเหมือนวัสดุราคาแพงได้ ดังนั้นวัสดุนาโนจึงมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาสมบัติของวัสดุ เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด แต่ทรัพยากรมีอยู่อย่างจำกัด



ภาพที่ 2.5 ออแกนเนลล์แม่เหล็กของสัตว์

## 2.2 วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

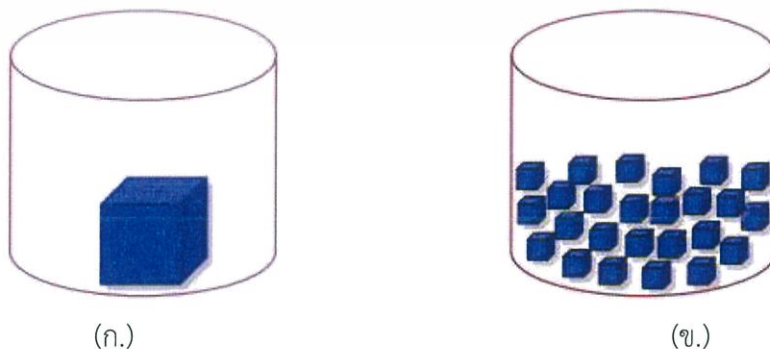
ในปัจจุบันการพัฒนาวัสดุนาโนมีอยู่หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การประยุกต์ใช้ งานหรือการแก้ปัญหาบางอย่าง วัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติหลากหลายและสังเคราะห์ได้ง่าย คือ คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในด้านอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (humidity sensor) อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (photo detector) อุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส (gas sensor) วัสดุต่อต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) วัสดุถ่ายเทความร้อน (heat transfer material) วัสดุในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cells) และตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นต้น สีของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ คือ สีน้ำตาลค่อนข้างดำ เกิดจากการออกซิไดซ์ (oxidize) ของคอปเปอร์ ดังสมการเคมี [3]



ภาพที่ 2.6 การเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน

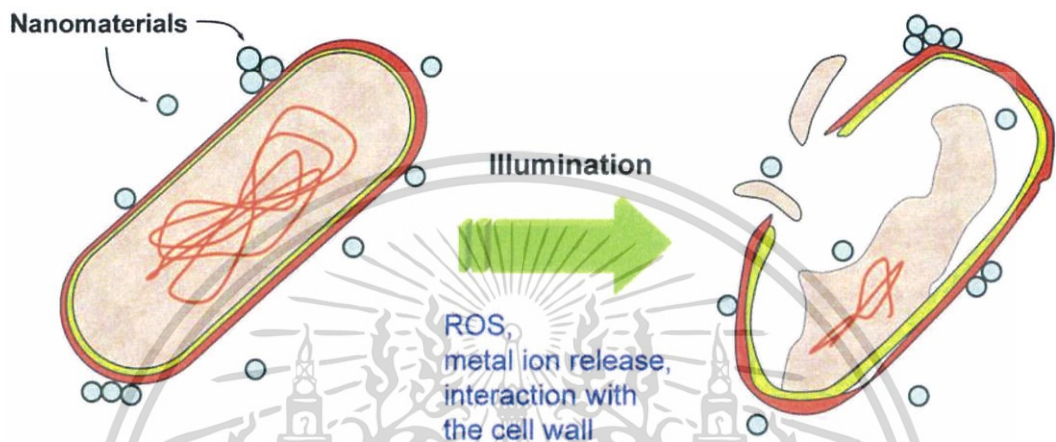
## 2.2.1 สมบัติของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

2.2.1.1 พื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้นเป็นพื้นฐานทั่วไปของวัสดุนาโนที่เมื่อมีขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในทุกๆ ปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจะต้องทำให้สารตั้งต้นมีขนาดเล็กมาก อาจะนำไปผ่านกระบวนการบด หรือทุบ เพื่อให้มีขนาดเล็กลง เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับสาร ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากปฏิกิริยานั้นต้องการให้เกิดปฏิกิริยาช้า การทำให้ วัสดุมีขนาดเล็กลงอาจจะไม่จำเป็น ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นกระบวนการผลิตเมทานอลโดย ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ คอปเปอร์ออกไซด์ พื้นที่ผิวที่เพิ่ม มากขึ้นส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว อีกตัวอย่างหนึ่งคือตัวช่วยในการแยกพาหะอิเล็กตรอน และโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นบริเวณรอยต่อของสารชนิดพีและชนิดเอ็น(p-n junction) ที่เรียกว่า แอคทีฟ เลเยอร์ (active layers) ถ้าบริเวณนี้มีมากในตัวอุปกรณ์ จะทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น จากแสงอาทิตย์แยกออกเป็นอิเล็กตรอนและโฮลวิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าได้ทันเวลา(life time) ก่อนที่จะ รวมตัวกันอีกครั้ง ในด้านของอุปกรณ์ตรวจวัด(sensors) เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงมาก ทำให้พื้นที่ สัมผัสกับอากาศก็มีมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการจับแก๊สได้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส(gas sensors) อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น ( humidity sensors ) และ ในทางกลับกันการที่มีความสามารถในการจับแก๊สดีขึ้น การคลายแก๊สของตัวอุปกรณ์ก็มี ประสิทธิภาพสูงเช่นกัน เรียกการจับตัวของแก๊ส และ คลายตัวของแก๊สว่า การตอบสนอง (responding) ยิ่งพื้นที่ผิวมากการตอบสนองก็จะเกิดเร็วขึ้น



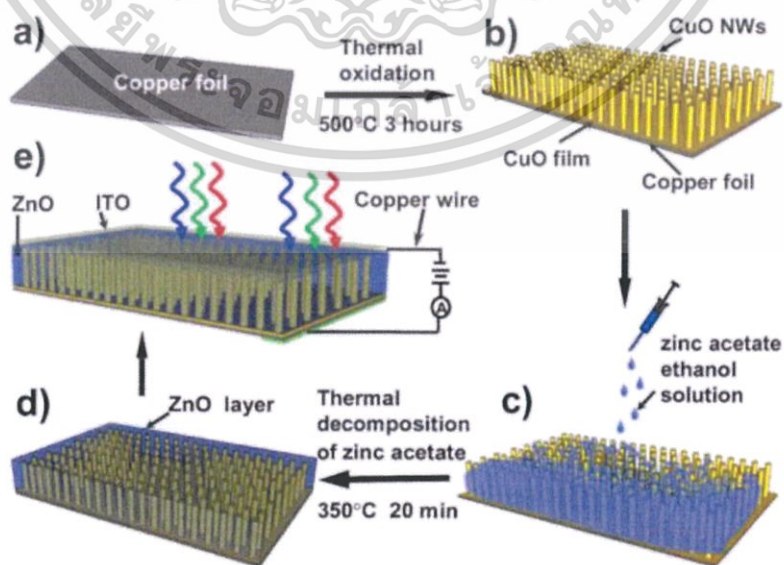
ภาพที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยา (ก)ปฏิกิริยาช้า, (ข)ปฏิกิริยาเร็ว

2.2.1.2 เป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ด้วยคุณสมบัติของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีค่าพลังงานต้องห้าม (energy gap) น้อย ส่งผลให้มีคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงกระตุ้นและคุณสมบัติเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวอย่างแบคทีเรียที่อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์สามารถยับยั้งได้ ได้แก่ อีโคไรต์ (E.coli) ซูโดโมนาส เออร์จิวโนซา (pseudomonas aeruginosa) ชิเจลลา เฟล็กซ์เนไรต์ (shigella flexneri) เป็นต้น [4,6]



ภาพที่ 2.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนโลหะ

2.2.1.3 เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เมื่อคอปเปอร์ออกไซด์ถูกทำให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลต่อแถบพลังงานต้องห้าม (energy gap) มีค่าน้อยลง อยู่ระหว่าง 1.6 eV – 2.3 eV หรือช่วงความยาวคลื่น 539 – 775 นาโนเมตร ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) [5,6]



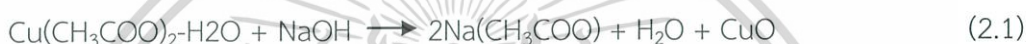
ภาพที่ 2.9 การสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์คอปเปอร์ออกไซด์

## 2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

### 2.2.2.1 อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide nanoparticles)

#### (1) กระบวนการทางเคมี (chemical process)

กระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการตกตะกอน (precipitation method) เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการสังเคราะห์วัสดุให้อยู่ในรูปของอนุภาค ส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้ในการเตรียมวัสดุนาโน โดยจะใช้สารประกอบคอปเปอร์ เช่น คอปเปอร์อะซิเตตโมโนไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) คอปเปอร์คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2$ ) คอปเปอร์ไนเตรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นต้น เป็นสารตั้งต้นในการการสังเคราะห์วัสดุนาโน นำมาผสมกับสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นเบส ดังตัวอย่างสมการเคมี โดยใช้คอปเปอร์อะซิเตตเป็นสารตั้งต้น [7]



ในงานวิจัยนี้จะใช้สารตั้งต้น คือ คอปเปอร์อะซิเตต มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) นำมาผสมกันด้วยอัตราการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ ลงไปในคอปเปอร์อะซิเตต กระบวนการจะเป็นไปตามสมการเคมี (1) เป็นปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เมื่อเสร็จกระบวนการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุ (De-ionized water) จนกระทั่งสารละลายมีความเป็นกลาง ต่อมานำเข้าในเตาอบเพื่อทำการไล่น้ำออกจนแห้งสนิท เก็บผงที่ได้ไปทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

การประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยนี้จะเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส โดยการเคลือบอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ลงไปที่ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยเทคนิคการปั่นเคลือบ (spin coating)

#### (2) กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel method)

เป็นการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ เช่น คอปเปอร์ไนเตรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นต้น ลงในสารละลายที่เป็นแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล (ethanol :  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) พร้อมทั้งใส่กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) เป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) หลังจากนั้นนำสารที่ได้ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ (calcinations) ทำให้เกิดอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ วิธีการนี้ทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากแต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูงและมีการสิ้นเปลืองพลังงานที่สูงเช่นกัน[8]

#### (3) กระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical method)

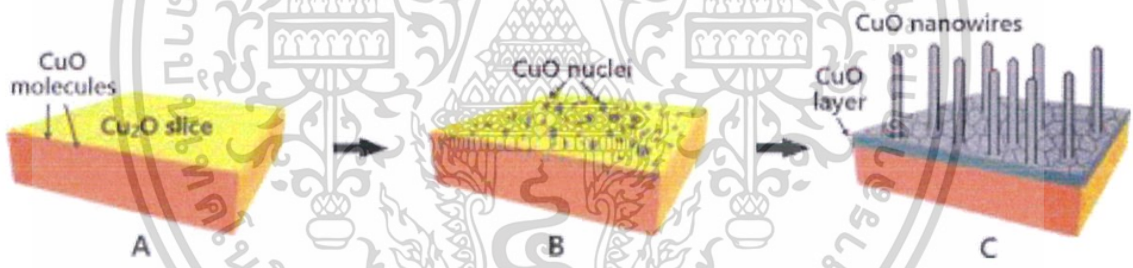
เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ได้จากวัสดุนาโนที่มีลักษณะคล้ายเม่น เช่น กระบวนการทางเคมี ใช้การควบคุมความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่งผลต่อลักษณะอนุภาคที่เกิดขึ้น หรือการควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลาย ส่งผลต่อรูปร่างวัสดุนาโน เป็นต้น ผ่านกระบวนการเผา

เป็นเวลานาน ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากการลดพลังงานพื้นผิว ทำให้อนุภาคที่มีหนามคล้ายเม่นเปลี่ยนเป็นวัสดุอนุภาคนาโนทรงกลมไม่มีหนาม กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองพลังงานพอสมควร จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคนาโนมากนัก[8]

### 2.2.2.2 เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ( copper oxide nanowires )

#### (1) กระบวนการออกซิไดซ์ (Oxidized process)

กระบวนการออกซิไดซ์ หรือวิธีการเทอร์โมออกซิเดชัน (Thermal oxidation) [8] เป็นกระบวนการที่ส่วนใหญ่จะใช้สังเคราะห์วัสดุเส้นใยนาโน วิธีการคือ นำสารคอปเปอร์ (Cu-bulk) ทำการหลอมละลาย ผ่านกระบวนการระเหย (physical vapor deposition) คอปเปอร์ที่หลอมละลายจะระเหยขึ้นไปติดยังฐานรองรับ (substrate) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองรับ จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง ประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิมีผลต่อการขึ้นรูปของวัสดุเส้นใยนาโน) คอปเปอร์ที่อยู่บนซิลิกอนจะเกิดการออกซิไดซ์ (oxidized) เป็น คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆพุ่งขึ้นมาจากฐานรองรับ เรียกว่า วัสดุเส้นใยคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanowires)



ภาพที่ 2.10 ลำดับการเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธี thermal oxidation

#### (2) กระบวนการการยัดติดด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) [8]

เป็นหลักการคล้ายกับการเกิดออกซิไดซ์ แต่ที่ต่างกันคือ กระบวนการขึ้นรูปของทองแดงบนฐานรองรับ ในกระบวนการยัดติดด้วยไฟฟ้า จะมีขั้วไฟฟ้าอยู่ 2 ขั้ว คือ แคโทด (cathode) และแอโนด (anode) ถูกวางอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการขนส่งพาหะไอออนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) (เป็นขั้วที่สูญเสียอิเล็กตรอน) ทั้งสองขั้วนี้จะถูกบังคับการไหลของอิเล็กตรอนด้วยขั้วไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟ (power supply) ขั้วลบถูกต่อเข้ากับขั้วแอโนด ขั้วบวกถูกต่อเข้ากับขั้วแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดถูกต่อกับวัสดุทองแดงบริสุทธิ์ ที่ขั้วแอโนดต่อกับวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ใช้เป็นฐานรองรับ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะต้องเป็นสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ 100

เปอร์เซ็นต์ เช่น สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) เป็นต้น เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดจะสูญเสียอิเล็กตรอน ทำให้ทองแดงบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็ง ไม่สามารถคงความเสถียรภาพไว้ได้ จะแตกตัวเป็นทองแดงไอออน ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทางด้านขั้วแคโทดจะเป็นขั้วที่รับอิเล็กตรอนจากแอโนด และเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่บริเวณผิวโลหะที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทองแดงไอออนในสารอิเล็กโทรไลต์มีความเป็นประจุบวก จะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนดซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของโลหะ ไอออนทองแดงเมื่อได้รับอิเล็กตรอนจะเกิดเป็นโลหะทองแดงบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็งอีกครั้ง เคลือบโลหะของขั้วแคโทดไว้ เกิดเป็นฟิล์มทองแดงหลังจากที่ได้ทองแดงซึ่งอยู่บนฐานรองรับเรียบร้อยแล้ว นำมาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อทำให้สารเกิดออกไซด์ เป็น เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (อุณหภูมิการเผามีผลต่อรูปร่างที่เกิดขึ้น)



ภาพที่ 2.11 วิธีการทางไฟฟ้าเคมี (electro deposition)

### (3) เตรียมโดยสารละลายเคมี (Wet- chemical process)

- วิธีการเตรียมจากสารละลายบริสุทธิ์ (pure solution based method) สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่เกิดเป็นสารประกอบเส้นใยนาโน 2. ส่วนที่เป็นวัสดุเส้นใยนาโนบริสุทธิ์ ทั้ง 2 แบบเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นและมีสารที่ช่วยในการเกิดเป็นวัสดุเส้นใยนาโนเพิ่มความเสถียรภาพแก่โครงสร้าง คือ สารพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol : PEG) หรือสารโซเดียม โดดซิลเบนซีนซัลฟونات (sodium dodecylbenzenesulfonate : SDS) สารตั้งต้นที่ใช้คือ คอปเปอร์คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2$ ) ในสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเผาด้วยแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เส้นใยนาโน สองชนิด คือ คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) และ คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) [8]

- วิธีการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical method) [8] เป็นวิธีที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เส้นใยนาโนอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพลังงานศักย์ของไฟฟ้าเคมี สามารถอธิบายการเกิดด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าอยู่ 2 ขั้ว หรือ 3 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเป็นขั้วที่ใช้โลหะทองแดง ขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะเป็นขั้วที่มีลักษณะรูพรุน ส่วนใหญ่จะใช้อลูมิเนียม (aluminum) รูพรุนที่ขั้วนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดและการเกิดของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้อุณหภูมิระหว่างการดำเนินกระบวนการ ก็มีผลต่อขนาดและการเกิดของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ รวมไปถึงค่าความเป็นกรด - เบส ของสารละลาย มีผลต่อโครงสร้างของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากดำเนินการทางไฟฟ้าเคมี จะได้เป็นคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการเผาเพื่อกำจัดน้ำ จะผลิตภัณฑ์เส้นใยนาโนคอปเปอร์(II) ออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )

ข้อดีของวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical method) เมื่อเทียบกับวิธีการเตรียมสารละลายบริสุทธิ์ (pure solution based method) คือวิธีการทางไฟฟ้าเคมีสามารถควบคุมขนาดความกว้างและความยาวของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ดีกว่า แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ถ้าต้องการให้เส้นใยนาโนมีลักษณะเป็นผลึกที่ดี (crystalline) ใช้เวลานานการดำเนินการมาก อีกทั้งมีปัญหาในการแยกเส้นใยนาโนออกจากขั้วไฟฟ้า ซึ่งแยกได้ยาก [8]

- วิธีการใช้ความร้อน (hydrothermal process) เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการขึ้นรูปของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ง่ายที่สุด เพราะเป็นการให้ความร้อนอย่างเดียวกับสาร เช่น นำเส้นใยนาโนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) มาผ่านกระบวนการเผา (annealing) ในออกซิเจนที่บรรยากาศ จะทำให้เกิดเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) หรือเส้นใยนาโนคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) ที่เป็นผลึก ด้วยการขึ้นรูปที่ง่ายและเป็นผลึก ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่มักจะใช้บ่อยมากที่สุดในการผลิตเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ [8]

#### (4) การเตรียมด้วยกระบวนการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation process)

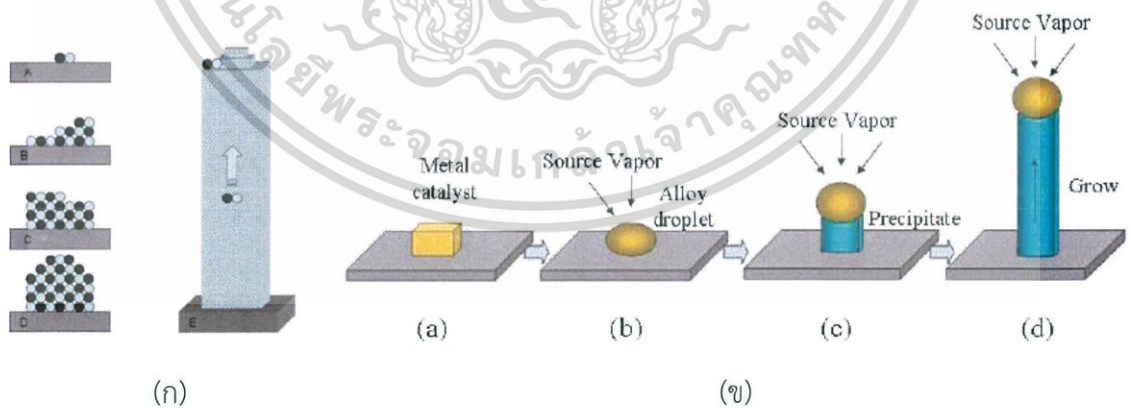
เป็นวิธีการขึ้นรูปเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์โดยตรงจากพื้นผิวของวัสดุที่เป็นทองแดง เช่น กระจกฟอสฟอรัสแดงหรือฟิล์มบางทองแดง เป็นต้น นำมาผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน หลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อนที่สูงมากในออกซิเจน โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิที่ 400 – 600 องศาเซลเซียส [8]

- แนวโน้มของพื้นผิวฐานรอง (influence of substrate morphology) เนื่องจากการขึ้นรูปของเส้นใยนาโน เกิดบนฐานรอง สิ่งที่จะส่งผลกระทบต่อรูปร่างของเส้นใยนาโนคือพื้นผิวของฐานรอง ไม่ว่าจะเป็นฐานรองที่มีรูพรุน มีความหนา หรือมีความขรุขระ ล้วนแต่ส่งผลทั้งหมด ฐานรองที่มีความเป็นรูพรุนทำให้เกิดการขึ้นรูปของเส้นใยนาโนได้ดีกว่า ฐานรองที่มีความหนามาก จะไปควบคุมขนาดความกว้างของเส้นใยนาโน เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของวัสดุ เมื่อฐานรองมีขนาดใหญ่จะทำให้มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่เกินกว่าระดับนาโนเมตร [8]

- แนวโน้มขององค์ประกอบของการเกิดออกซิไดซิงในบรรยากาศ (influence of composition of oxidizing atmosphere) แบ่งเป็นสองส่วน คือ ความดันออกซิเจนที่ให้ไปมีผลต่อโครงสร้างเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้น และ อัตราการจ่ายแก๊สออกซิเจนให้กับระบบมีผลต่อความกว้างและความยาวของเส้นใยนาโน นอกจากนี้ ไอน้ำที่อยู่ในระบบมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสของเส้นใยนาโน (nucleation) และอัตราการเกิด (growth rate) [8]

- ระบบความร้อนทางเลือกของการเกิดออกซิเดชัน (alternative heating system for oxidation) วิธีการแรกคือให้ความร้อนแก่ฐานรองโดยให้อัตราความร้อนที่สูงมาก เช่น 100 องศาเซียสต่อวินาที วิธีการที่สองคือไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในระบบ จะทำให้เกิดการผสมของแก๊สออกซิเจนในอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม การผสมของแก๊สนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อ การพื้นผิวและคุณภาพโครงสร้างของเส้นใยนาโน เนื่องจากเป็นการรวมตัวของออกซิเจนที่เหลือจากการเกิดเส้นใยนาโนแล้ว วิธีการนี้ใช้เวลาเพียงเล็กน้อยภายใต้ความร้อนสูงก็ทำได้เส้นใยนาโนที่มีความเป็นผลึกสูงได้ วิธีที่สามคือการให้กระแสไฟฟ้าแก่ฐานรองทำให้ฐานรองทองแดงเกิดความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อโครงสร้างของเส้นใยนาโนทำให้มีความตั้งฉากกับฐานรอง [8]

- ทฤษฎีการเกิดเส้นใยนาโน (the growth theories) ในการเกิดเส้นใยนาโนจะอธิบายด้วยกระบวนการ VSL (vapour + solid – liquid mechanism) หรือกระบวนการ VS (vapour- solid mechanism) ในกระบวนการ VSL เส้นใยนาโนเกิดจากการหลอมสารที่ต้องการกับตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนำไปหยดบนฐานรอง หลังจากนั้นทำการให้ความร้อน (hydrothermal) จะเกิดเป็นเส้นใยนาโนขึ้นแต่บนเส้นใยจะมีสารจากตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ จะต้องทำการแยกตัวเร่งกับเส้นใยนาโนออกจากกัน ในกระบวนการ VS เส้นใยนาโนเกิดจากการระเหยของสารตั้งต้น (precursor) ที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำเกิดเป็นเส้นใยนาโน แต่ในกระบวนการ VS ไม่สามารถอธิบายการเกิดเส้นใยนาโนได้อย่างเหมาะสมเท่าไรนัก [8]



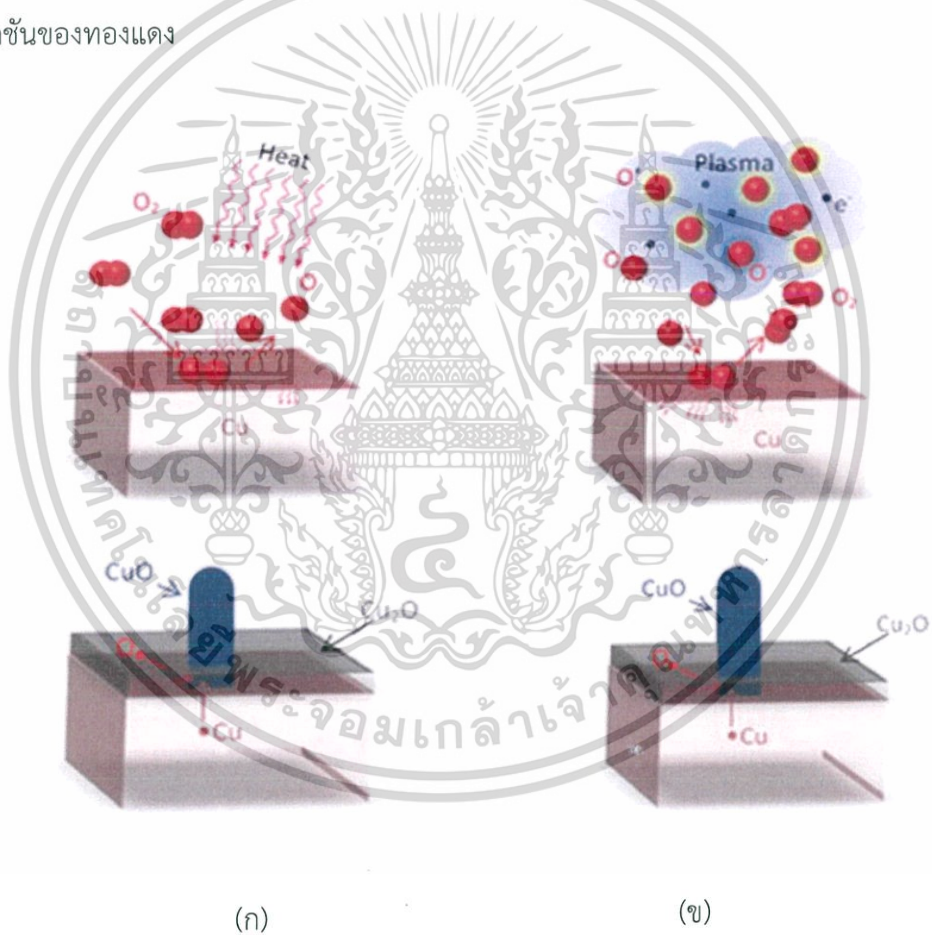
ภาพที่ 2.12 กระบวนการเกิดแบบ VS (ก) , กระบวนการเกิดแบบ VSL (ข)

- เส้นใยนาโนคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (copper (I) oxide nanowires) วิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) เห็นจะเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดเส้นใยนาโนได้ง่ายที่สุด แต่น่าเสียดายที่ไม่ได้เป็นวิธีที่ทำให้เกิด คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (CuO) โดยตรงเพราะจะเกิดผลิตภัณฑ์คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ก่อนเป็นอันดับแรก (Cu<sub>2</sub>O) แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถผลิตเส้นใยนาโนคอป

เปอร์ (I) ออกไซด์ได้โดยผ่านกระบวนการรีดักชัน (reduction) เช่น การให้แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ )/อาร์กอน(Ar) เข้าไปในระบบแทนออกซิเจน จะทำให้เกิดการรีดิวซ์ (reduce) ของคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ ( $Cu_2O$ ) ให้เป็น คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ ( $CuO$ ) [8]

(5) วิธีการการเกิดออกซิเดชันของพลาสมาโดยตรง (direct plasma oxidation)

เป็นวิธีการที่ใช้การแตกตัวของแก๊สในการเกิดเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ แก๊สที่ใช้ในที่นี้คือออกซิเจน ออกซิเจนจะเกิดการแตกตัวกลายเป็นออกซิเจนไอออนแล้วไปทำปฏิกิริยากับแผ่นทองแดงที่เป็นฐานรอง เมื่อออกซิเจนรวมตัวกับทองแดงจะเกิดเป็น คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ ( $Cu_2O$ ) เป็นลักษณะแผ่นฟิล์มและคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ ( $CuO$ ) มีลักษณะเป็นเส้นใยนาโน ซึ่งแตกต่างจากวิธีการเกิดในกระบวนการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) จะใช้ความร้อนทำให้เกิดการออกซิเดชันของทองแดง

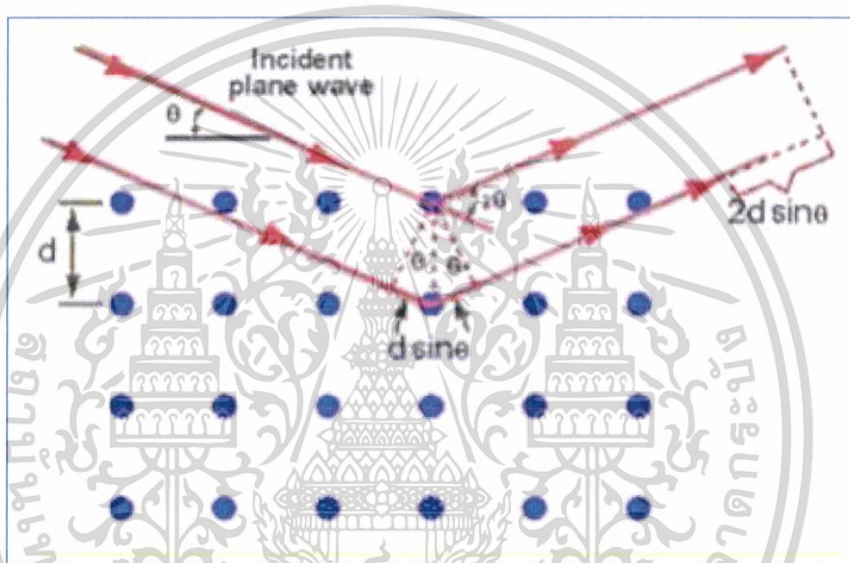


ภาพที่ 2.13 (ก) การเกิดเส้นใยนาโนในกระบวนการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) , (ข) กระบวนการการเกิดออกซิเดชันโดยตรง (direct plasma oxidation)

## 2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของวัสดุนาโน

### 2.3.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชั้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากภาพที่ 2.14 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law คือ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

โดยที่  $\lambda$  แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$n$  แทน ลำดับการสะท้อน

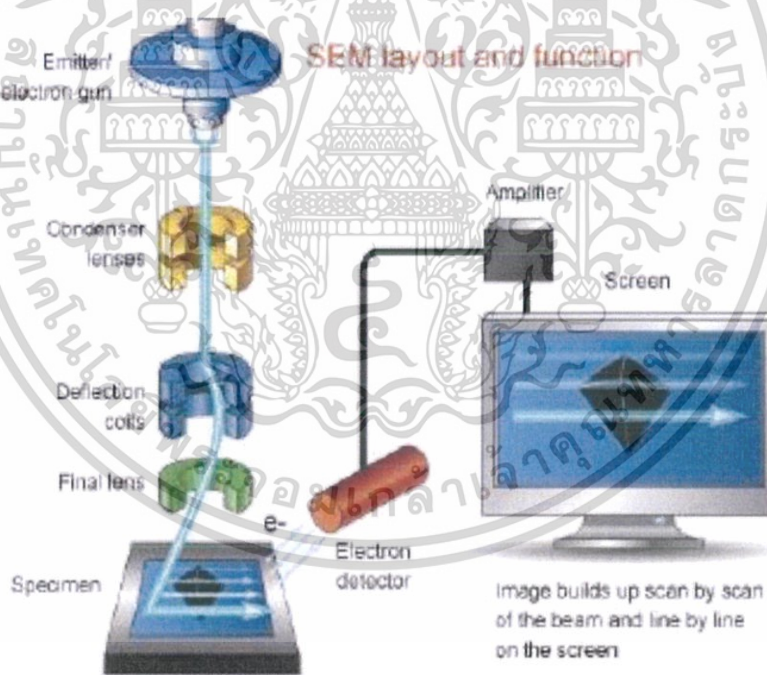
$d_{hkl}$  แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด โดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบ

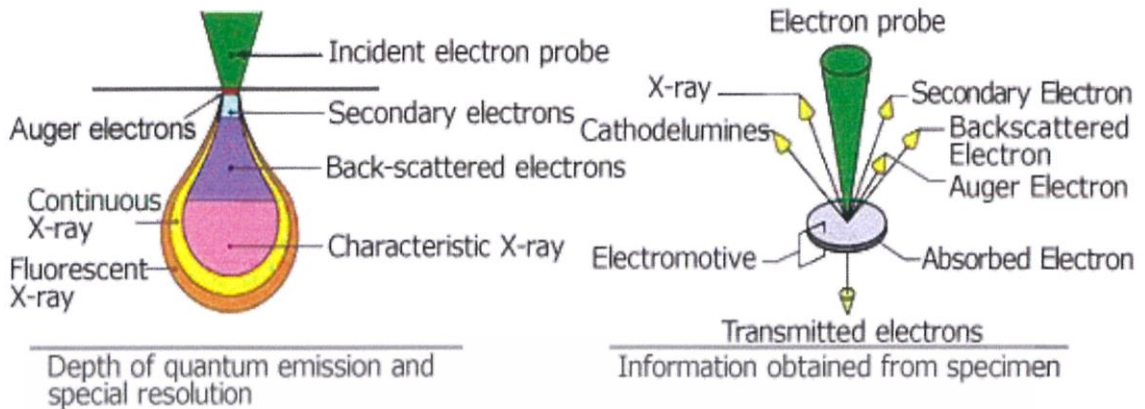
ของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกันจากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

### 2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ ตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น[2]



ภาพที่ 2.15 การทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 2.16 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการยิงลำอิเล็กตรอนเข้าสู่ตัวอย่าง

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

## 2.4 การประยุกต์ใช้งานของคอปเปอร์ออกไซด์

### 2.4.1 สารต่อต้านอนุมูลอิสระและต่อต้านแบคทีเรีย (antioxidant and antibacterial activity)

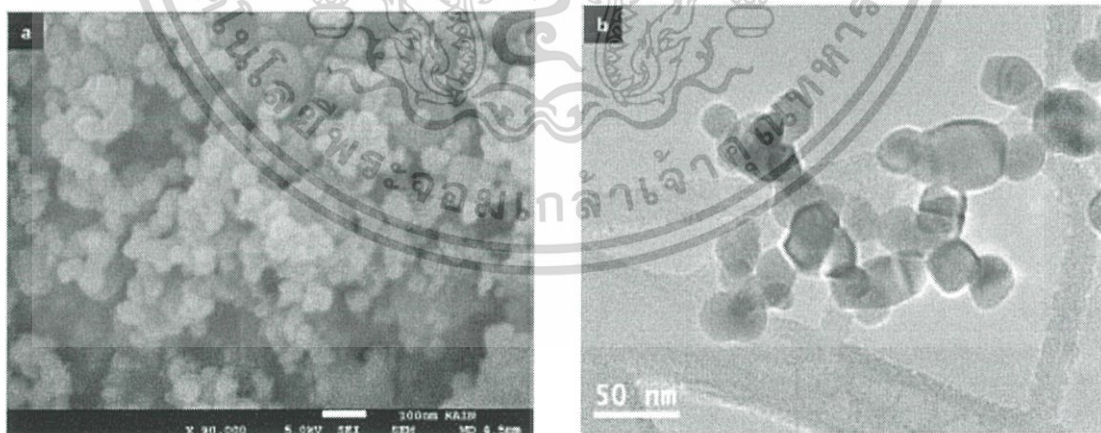
การต่อต้านอนุมูลอิสระสามารถทดสอบโดยวิธีการ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl DPPH ซึ่งวิธีการนี้ DPPH เป็นแหล่งอนุมูลอิสระ การต่อต้านแบคทีเรียจะนำนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มาผ่านกระบวนการทดสอบกับแบคทีเรียชนิด *P. aeruginosa* BS3, *Bacillus circulens* BP2, *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระที่สามารถทำความสะอาดได้ถึงร้อยละ 85 อีกทั้งยังเป็นสารต้านแบคทีเรีย *E. coli* and *P. aeruginosa* ได้เป็นอย่างดี [4]

- งานวิจัยจากมหาวิทยาลัยคิงซาอุด์ เมืองริยาดห์ ประเทศซาอุดีอาราเบีย (King suad University, Riyadh 11451, Saudi Arabia) ทำการวิจัยในหัวข้อ “ Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Activity of Copper Oxide Nanoparticles “ ทำการสังเคราะห์ วิเคราะห์ และสังเกตพฤติกรรมการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ [4]

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน ใช้คอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 0.2 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร และใส่กรดอะซิติกแข็ง (glacial acetic acid :  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ภายใต้การปั่นด้วยแม่เหล็กและทำให้ร้อน หลังจากนั้นผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) 0.6 โมลาร์ ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ทำการปั่นด้วยแม่เหล็กใช้เวลา 2 ชั่วโมง สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงิน เป็นดำ สีดำคือตะกอนที่เกิดขึ้น ปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงเทเข้าที่บดอนุภาคน้ำแล้วทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (de-ionize water) ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

การตรวจสอบสารที่ได้ ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction ) พบว่าเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์จริง ทำการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคผ่านเครื่อง FE-SEM ได้รูปภาพอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ดังภาพที่ 2.17

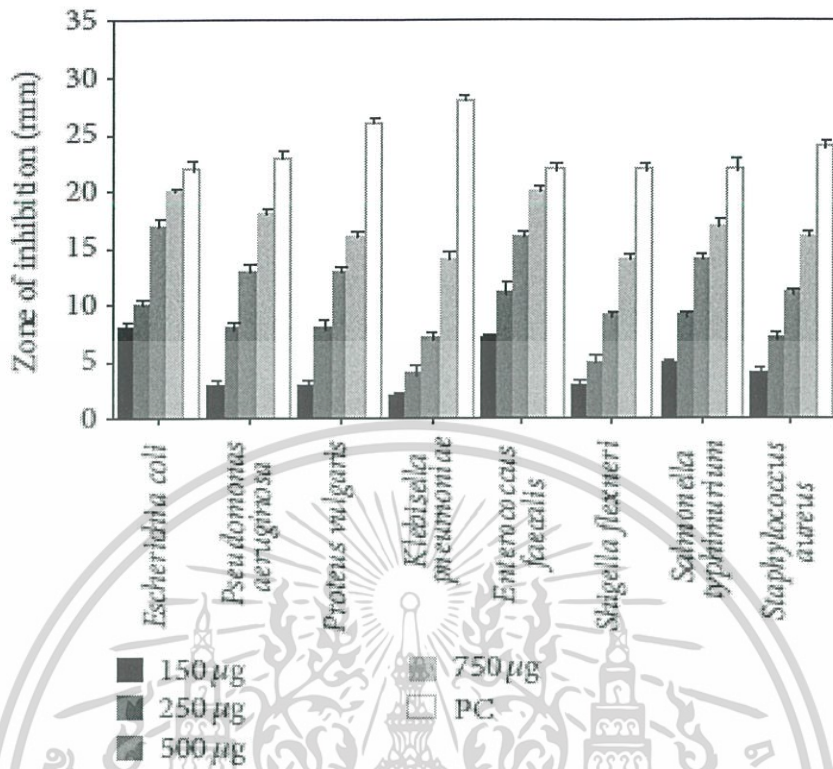
ทำการสังเกตพฤติกรรมการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ สารจุลินทรีย์ที่ทำในการทดลอง ได้แก่ Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumonia, Enterococcus faecalis, Shigella flexneri, Salmonella typhimurium, Proteus vulgaris และ Staphylococcus aureus นำมาทดสอบกับอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกันๆ ดังนี้ 150 250 500 และ 750 ไมโครกรัม (PC : positive control (streptomycin 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ได้ผลตาม ภาพที่ 2.18



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.17 (ก) ภาพจากกล้อง FESEM , (ข) ภาพจากกล้อง FETEM



ภาพที่ 2.18 พฤติกรรมการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มากขึ้น พื้นที่ปลอดเชื้อจุลินทรีย์มีมากขึ้น โดยสามารถต่อต้านเชื้อได้ดีที่สุดคือ *E.coli* และ *E.faecalis* สามารถต้านได้น้อยที่สุดคือ *K. pneumoniae* แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิด

Organisms	MIC (ไมโครกรัม / มิลลิลิตร)
<i>Escherichia coli</i>	31.25
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	125
<i>Proteus vulgaris</i>	125
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	250
<i>Enterococcus faecalis</i>	31.25
<i>Shigella flexneri</i>	125
<i>Salmonella typhimurium</i>	62.5
<i>Staphylococcus aureus</i>	62.5

จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่า อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี และมีวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ค่อนข้างจะประหยัดอาศัยวิธีการตกตะกอนเกิดเป็น อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

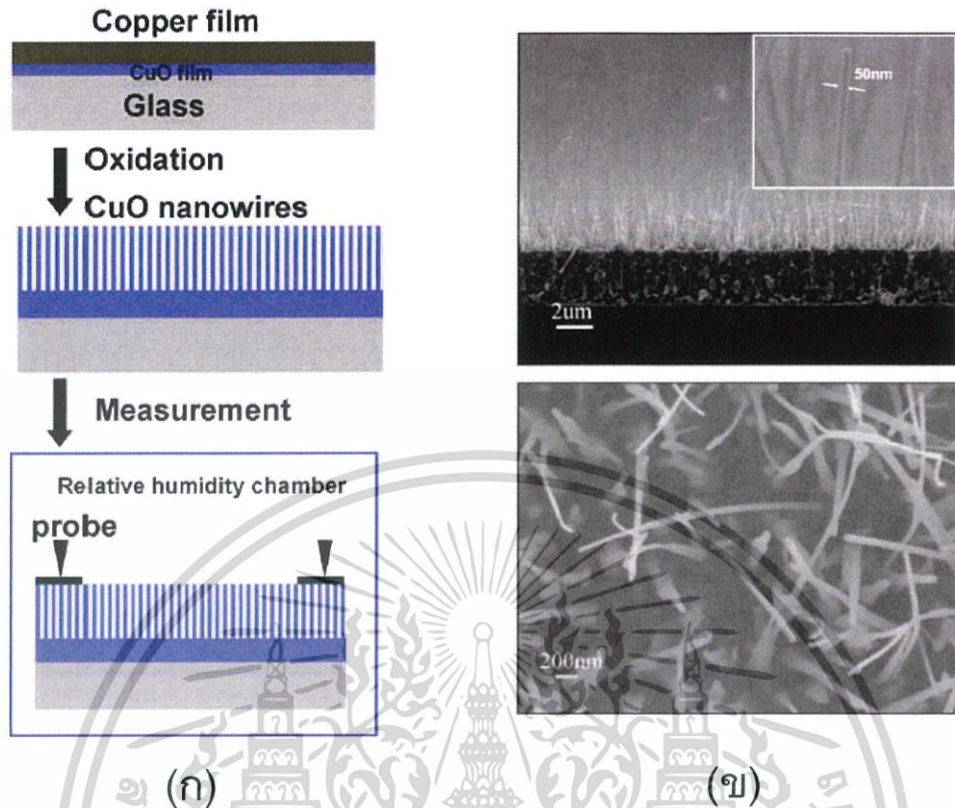
#### 2.4.2 การประยุกต์เป็นวัสดุที่ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มีค่าพลังงานต้องห้าม 1.2 eV จึงถูกนำมาเป็นวัสดุที่ใช้ทำเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ถูกเตรียมโดยวิธีการโซลวอเทอร์มอล (solvothermal method) ใช้สารตั้งต้นคือ คอปเปอร์คลอไรด์ ไดไฮเดรต ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และกรดโอเลอิก (oleic acid) หลังจากผสมกันแล้วนำไปผ่านการเผาแบบแคลไซน์ (calcinations) ภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส ในการตรวจสอบด้วยเครื่องมือเพื่อวัดขนาดอนุภาค ผลลัพธ์คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องการสารช่วยลดแรงตึงผิว (surfactance) และสารเชิงซ้อนในการทำให้เกิดปฏิกิริยา (Complex capping agent) ในการทดสอบสร้างชิ้นงานเป็นเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cells) วัดประสิทธิภาพการทำงานได้ 0.863 % ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ในการเผา 300 องศาเซลเซียส[6]

#### 2.4.3 การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส

อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ หรือรูปร่างต่างๆ ที่เป็นคอปเปอร์ออกไซด์มีความสามารถที่แยกแก๊สได้อย่างดีเยี่ยม โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในรูปร่างของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีการตอบสนองสูงมากกับแก๊สเอทานอล (ethanol) และเอทิล-อะซิเตต (ethyl-acetate) รวมถึงแก๊สฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) ด้วย

งานวิจัยมหาวิทยาลัยนานาชาติเจงกุง ประเทศไต้หวัน ( National Cheng Kung university, Taiwan) ทำการวิจัยในหัวข้อ “ CuO nanowire – based humidity sensors prepared on glass substrate” ทำการสร้างตัวตรวจวัดความชื้นจากสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยใช้กระจกเป็นฐานรองรับ [9] ขั้นตอนแรกทำการล้างกระจกด้วยน้ำปลอดประจุ (De-ionize water) และอะซิโตน (acetone) หลังจากนั้นนำไปเคลือบคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยวิธีการสปัตเตอร์ริงประเภทไฟฟ้ากระแสตรง (DC-sputtering) เมื่อทำการเคลือบเสร็จแล้วนำไปเคลือบด้วยคอปเปอร์อีกหนึ่งชั้น ต่อมานำไปเข้าเตาเผาที่บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที จะเกิดกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดเป็นเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ นำคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นำไปตรวจพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ดังแสดงในภาพที่ 2.19

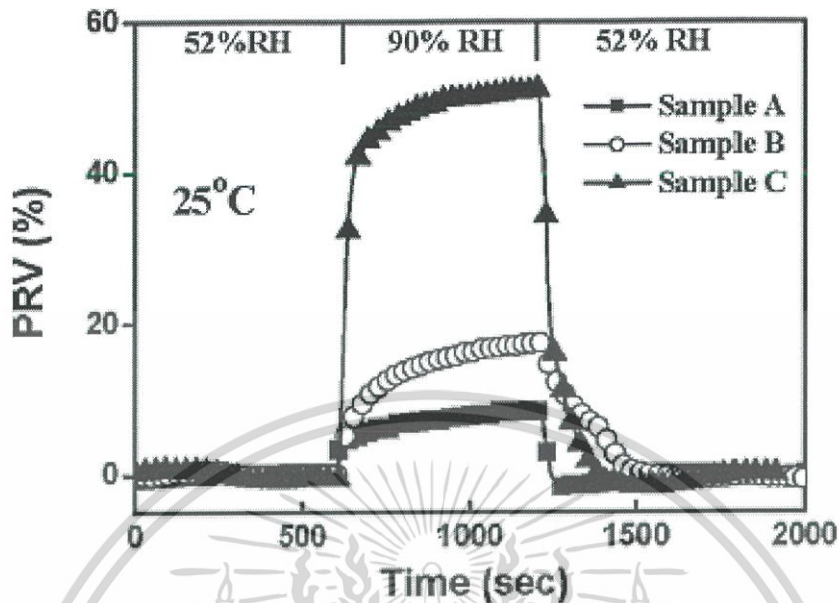


ภาพที่ 2.19 (ก) แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

(ข) การตรวจวัดพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปการตรวจสอบพื้นผิว ขนาดของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีความกว้างประมาณ 50 นาโนเมตร นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นซึ่งมี 3 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างมีความหนาของฟิล์มเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน และความยาวของเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน มาทดสอบความชื้นที่ 52%RH และ 95%RH ได้ผลตามภาพที่ 2.20 จะเห็นว่าที่ตัวอย่าง C มีการตอบสนองได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่าง B และ A ตามลำดับ เนื่องจากตัวอย่าง C มีความยาวของเส้นใยนาโนมากที่สุด และมีความหนาขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์หนาที่สุด เป็นการขนส่งสัญญาณที่ง่าย และเส้นใยนาโนที่ยาวเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ ในทางตรงกันข้าม ที่ตัวอย่าง A มีความยาวของเส้นใยนาโนที่น้อยกว่าตัวอย่าง C ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย อีกทั้งขั้วไฟฟ้าทองแดงมีความบางมากกว่าตัวอย่าง C การส่งสัญญาณไฟฟ้าอาจทำได้ลำบาก แต่อย่างไรก็ตาม การวัดความชื้นของอุปกรณ์ทั้งสามตัวอย่าง ก็สามารถเป็นอุปกรณ์วัดได้ แต่ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ ตัวอย่าง C

งานวิจัยของมหาวิทยาลัย แชนท์ เกดจ์ บาบา แอมลาวาติ ของประเทศอินเดีย (Sant Gadge Baba Amravati University, India) ทำการวิจัยเรื่อง “ Optical and Gas sensing properties of CuO Nanoparticles grown by spray pyrolysis of cupric nitrate solution” ทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงและความสามารถในการตอบสนองแก๊สของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (copper oxide nanoparticles) ทำการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จากกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส ในสารละลายคอปริก ไนเตรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) [11]



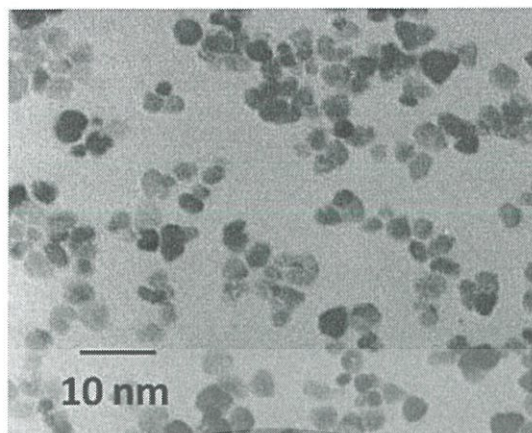
ภาพที่ 2.20 การตอบสนองความชื้นของอุปกรณ์ตรวจวัด ทั้ง 3 ตัวอย่าง

เริ่มต้นโดยการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จากวิธีการตกตะกอนอย่างรวดเร็วของการผสม สารละลายคอปริกไนเตรต 1 โมลลิตรา กับน้ำ พร้อมทั้งคนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก (magnetic stirring) เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นใส่สารละลายที่ได้ ลงไปในเครื่องสเปกโทรโฟโตเมตริกซึ่งมีลักษณะเป็นท่อแคปิลลารี (Capillary tube) ให้อุณหภูมิกับเครื่อง 473 เคลวิน สารละลายที่อยู่ในท่อแคปิลลารีจะระเหยออกเป็นสเปรย์ลอยขึ้นไปติดที่ฐานรองรับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ได้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส อนุภาคที่สังเคราะห์ได้แสดงในภาพที่ 2.21 ผ่านการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope : TEM )

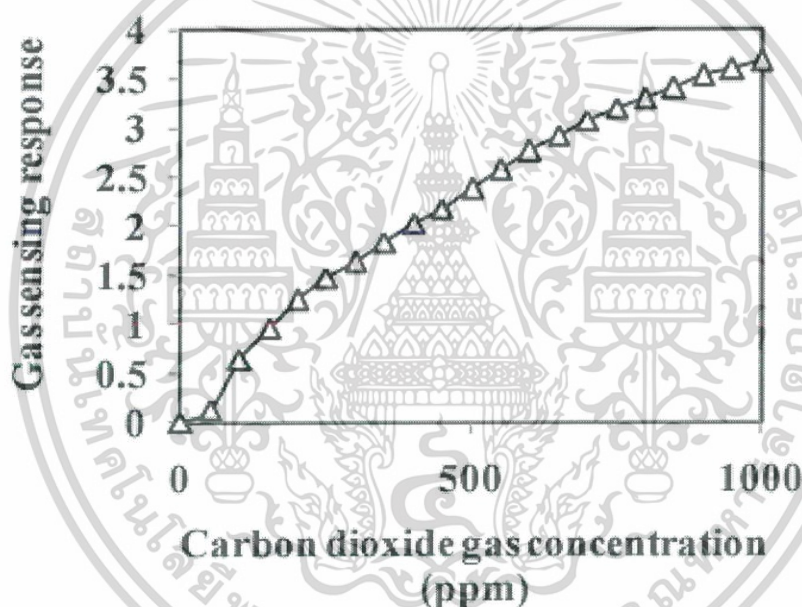
แก๊สที่ใช้ในการตรวจสอบคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ผลการตรวจวัดเป็นดังภาพที่ 2.22 เป็นการตรวจวัดการตอบสนองในปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อแก๊สเพิ่มมากขึ้น การตอบสนองก็มีมากขึ้นเช่นกัน มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง

ภาพที่ 2.23 เป็นการแสดงการตอบสนองในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าอุณหภูมิ 323–423 เคลวิน มีการตอบสนองที่ความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง แต่หลังจากเพิ่มอุณหภูมิเกินกว่า 423 เคลวิน ความสามารถในการตอบสนองมีค่าลดลง มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน

จากการทดลองความสามารถในการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณ 500 ppm และการคลายแก๊สของตัวอุปกรณ์พบว่า ใช้เวลาในการตอบสนองเร็วมากเพียง 16 วินาที หลังจากนั้นทำการหยุดให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้อุปกรณ์มีการคลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ใช้เวลาคลายแก๊ส 20 วินาที ดังภาพที่ 2.24



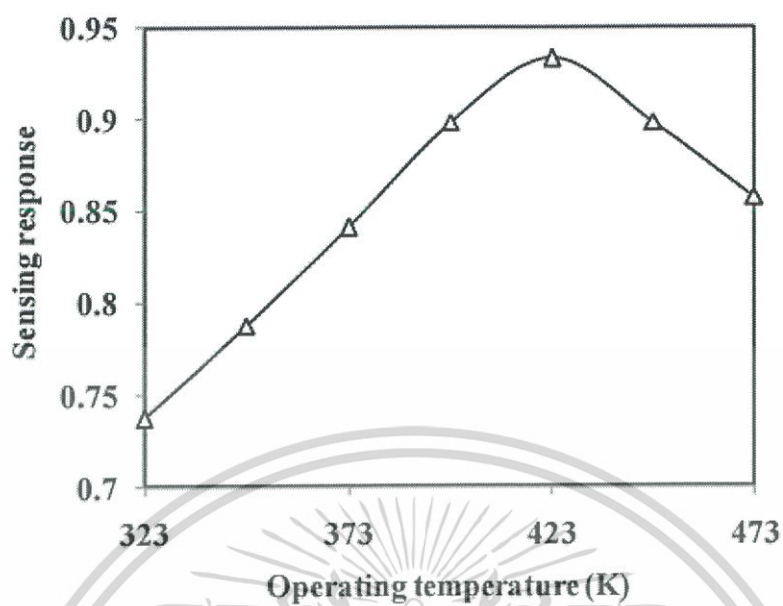
ภาพที่ 2.21 อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส



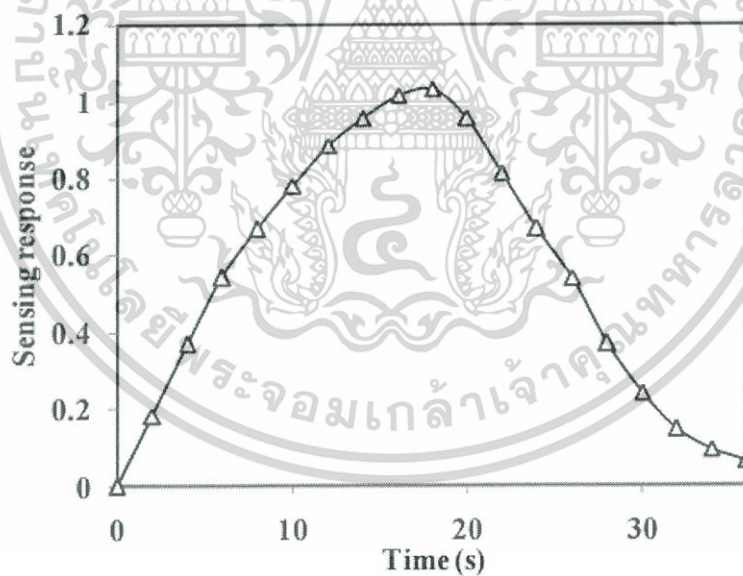
ภาพที่ 2.22 การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดในปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ทำการวัดความเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจวัด (stability measurements) โดยการตรวจสอบการตอบสนองเป็นรายวันภายใต้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ppm. ผลการทดสอบพบว่า สามารถใช้งานได้ 30 วัน โดยที่ค่าตอบสนองยังคงให้ค่าใกล้เคียงกัน หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงในภาพที่ 2.24

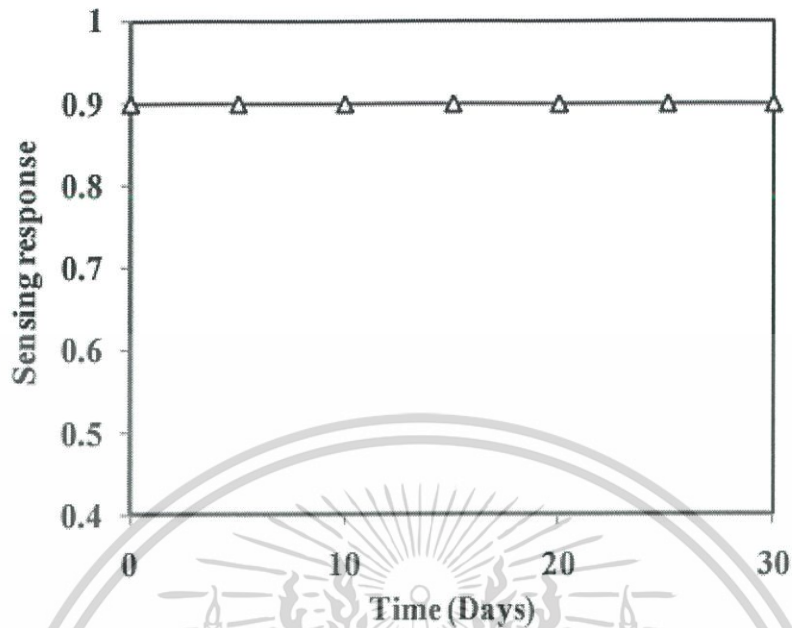
จากงานวิจัยนี้ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยกระบวนการเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis technique) สามารถสังเคราะห์ได้ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 6 นาโนเมตร และสามารถตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่เกิด 423 เคลวิน เพราะอุณหภูมิมากกว่านี้ ความสามารถในการตอบสนองจะลดลง ดังที่กล่าวไป



ภาพที่ 2.23 ความสามารถในการตอบสนองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง



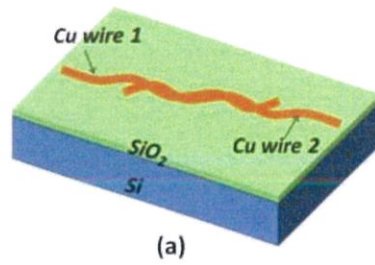
ภาพที่ 2.24 การตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณ 500 ppm และการคลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอุปกรณ์ตรวจวัด



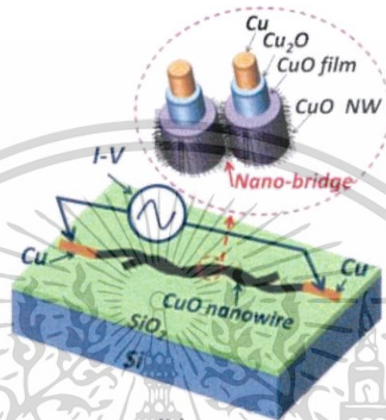
ภาพที่ 2.25 ความเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดภายใต้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 500 ppm ในระยะเวลา 30 วัน

งานวิจัยจากมหาวิทยาลัยแห่งชาติเจิ้งคุง ประเทศไต้หวัน (National Cheng Kung University, Taiwan) ทำการวิจัยอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สในหัวข้อ “One step fabrication of low noise CuO nanowire-bridge gas sensor” การทำอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่มีสัญญาณรบกวนน้อยจากเส้นใยคอปเปอร์ออกไซด์ [10] ขั้นตอนการทำคือสร้างเส้นใยทองแดงที่มีความเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ความยาว 3 เซนติเมตร โดยทำการล้างในกรดไฮโดรคลอริก สั้นด้วยเครื่องโซนิคเคชั่น (Sonication machine) เป็นเวลา 60 วินาที ต่อมาล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (de-ionize water) และทำให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน หลังจากกระบวนการนี้เสร็จสิ้น ทำการใส่ในหลอดแก้วสำหรับเข้าเครื่องเตาเผาเพื่อทำการสร้างเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ทำการเผาที่บรรยากาศ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.25

สำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดจากเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ วางเส้นใยทองแดงที่ได้จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์บนฐานรองซิลิกา ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) ซึ่งมีความหนา 300 นาโนเมตร และทำการทดสอบอุปกรณ์โดยเครื่อง เคอร์เรนท-โวลต์เทจ (Current-voltage characterization) ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดพื้นผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ดังภาพที่ 2.26

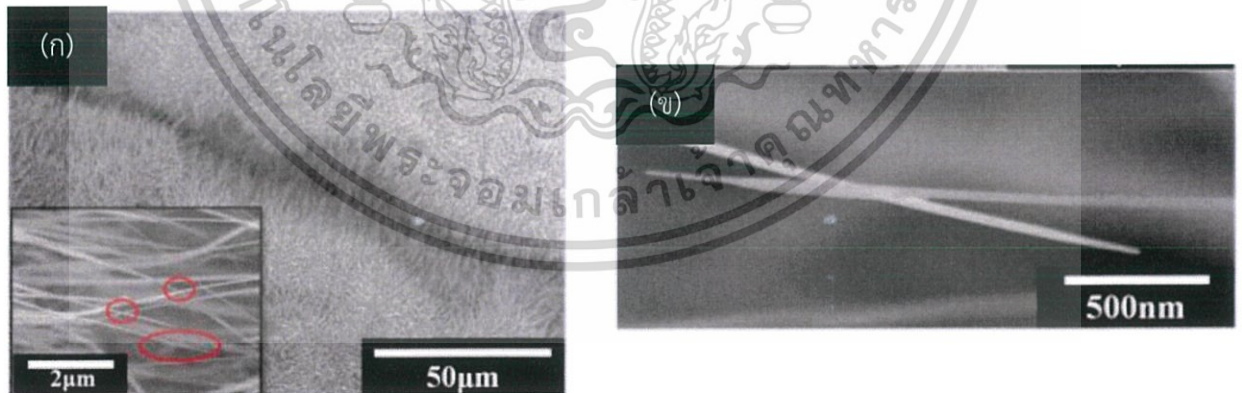


(a)



(b)

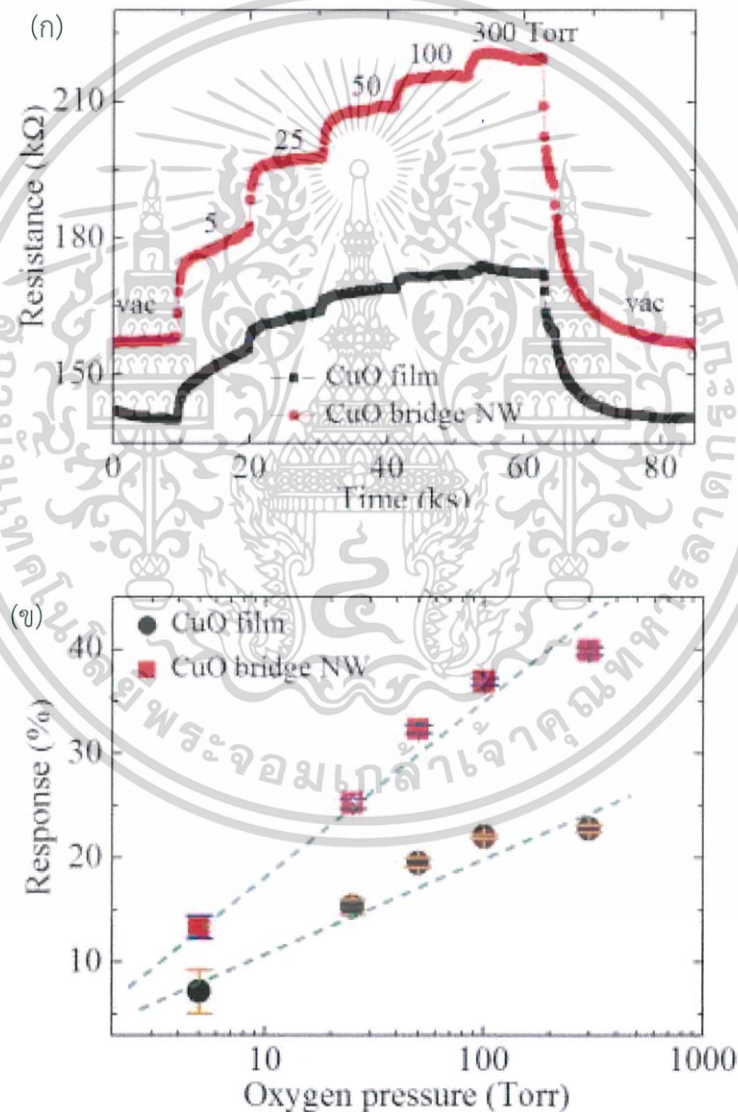
ภาพที่ 2.26 ภาพโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สและตัวไฟฟ้าทองแดง



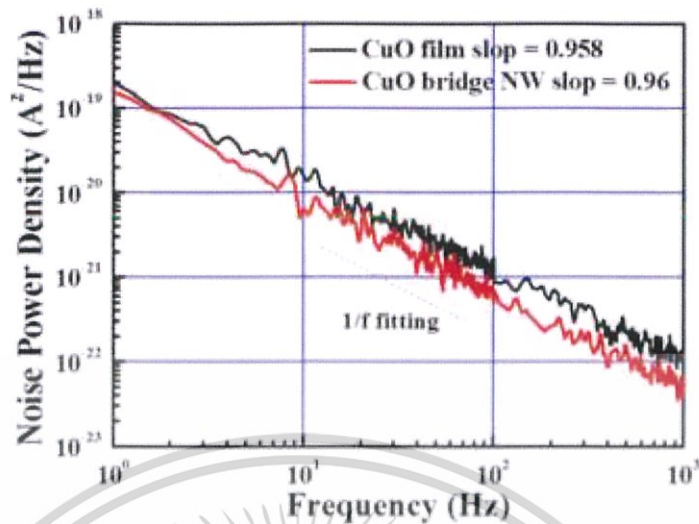
ภาพที่ 2.27 เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ จากเครื่อง FE-SEM

(ก) ภาพข้างบน (top - view) , (ข) ภาพกำลังขยายสูง

จากภาพ FE-SEM ที่วัดได้ เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีขนาดเล็กมาก ซึ่งทำให้ตัวอุปกรณ์มีความสามารถในการจับแก๊สได้เร็วและส่งสัญญาณไฟฟ้าได้รวดเร็วเนื่องจากเส้นใยนาโนเป็นส่วนหนึ่งที่ครอบหุ้มแก๊สออกซิเจนของตัวอุปกรณ์เทียบอุปกรณ์สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นฟิล์มคอปเปอร์ออกไซด์ กับ ชนิดที่เป็นสะพานเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ชนิดที่เป็นสะพานเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าการตอบสนองที่ดีกว่า มีประสิทธิภาพในการตอบสนองแก๊สออกซิเจนได้มากกว่าชนิดที่เป็นฟิล์ม นอกจากนี้การวัดค่าสัญญาณรบกวน อุปกรณ์ชนิด เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่นำมาทำเป็นสะพาน สามารถสัญญาณรบกวนได้ ดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ผลการทดสอบอุปกรณ์ (ก) ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามความดันที่เพิ่มขึ้น  
(ข) ค่าการตอบสนองการวัดแก๊สออกซิเจนในความดันต่างๆ



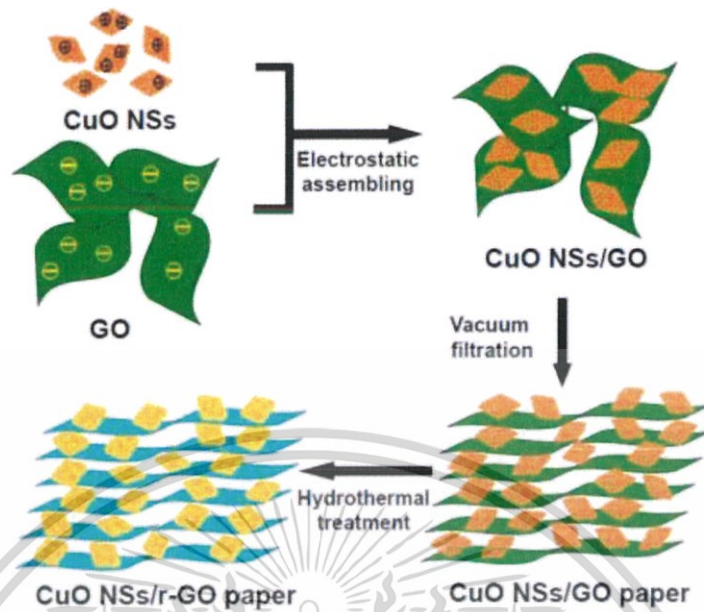
ภาพที่ 2.29 ค่าการวัดสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ตรวจวัดสองชนิด

ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่เตรียมมาจากเส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เป็นสะพานทางชีวไฟฟ้า สามารถตรวจวัดแก๊สออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากการใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สออกซิเจน ยังสามารถทำอุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมี และชีววิทยาได้ เป็นอุปกรณ์ไร้เซนเซอร์ในระดับนาโน และเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง เป็นต้น

#### 2.4.4 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ในแล็บท็อปและโทรศัพท์ โดยจะนำคอปเปอร์ออกไซด์อยู่ในรูปวัสดุประกอบกับแกรไฟน์ มาเป็นชีวไฟฟ้าแอโนด มาใส่ในแบตเตอรี่ประเภทไอออนลิเทียม (Li-ion battery) ผลที่ได้คือมีพื้นที่ในการเก็บประจุมากขึ้น อีกทั้งเป็นการลงทุนต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีความปลอดภัย ข้อดีของวัสดุประกอบคอปเปอร์ออกไซด์กับ กราฟีนคือสามารถใช้งานได้หลายครั้ง มีอัตราการเก็บประจุสูง มีพื้นที่ในการเก็บประจุมาก เนื่องจากวัสดุอยู่ในระดับนาโนซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น [6]

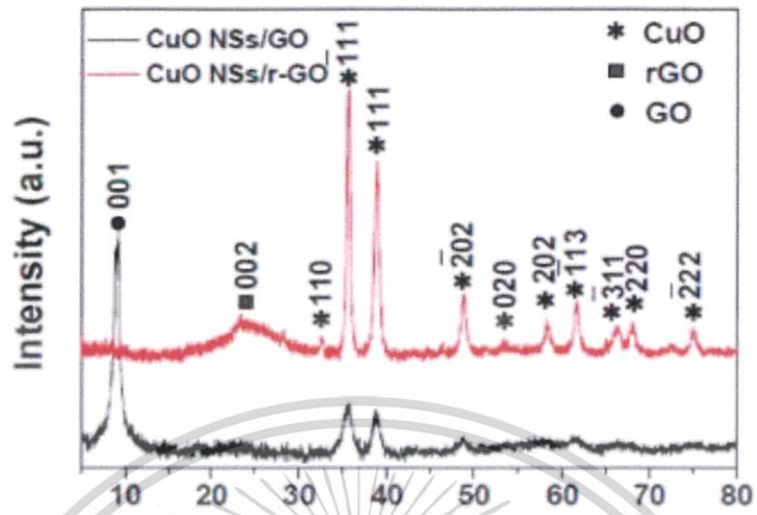
ตัวอย่างงานวิจัยที่นำวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์มาใช้งานด้านการกักเก็บพลังงาน ของคณะยู่วี่ (Yu Liu) มหาวิทยาลัยเซเจียง (Zhejiang University) ทำการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพชีวแอโนดในแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออน โดยสังเคราะห์วัสดุประกอบที่มีส่วนผสมนาโนซีทคอปเปอร์ออกไซด์และแกรไฟน์ออกไซด์ ดังภาพที่ 2.29 งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำชีวที่สามารถยืดหยุ่นได้ นำไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นวัสดุที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์เนื่องจาก เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และสังเคราะห์ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอปเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำ ดังนั้น จึงจะต้องใส่วัสดุที่ช่วยให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น นั่นคือ กราฟีน เพราะกราฟีนมีคุณสมบัติความแข็งแรงสูง นำไฟฟ้าได้ดีและมีความยืดหยุ่นสูง นำมาทำเป็นวัสดุประกอบ โดยใช้โครงสร้างที่เป็นแซนวิชเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุ



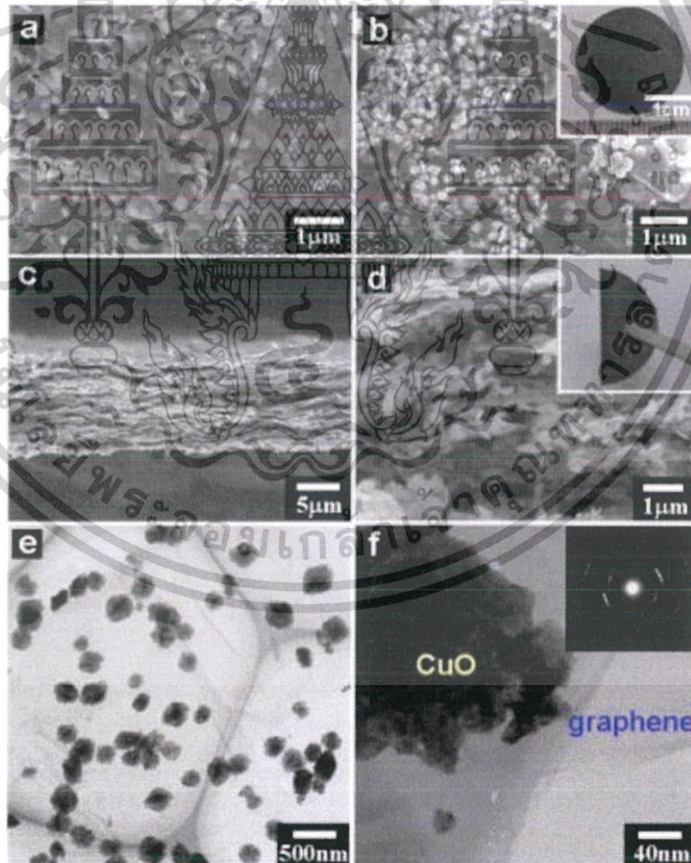
ภาพที่ 2.30 วิธีการเตรียมขั้วแอโนดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  
NS:nanosheet ; GO : Graphene Oxide , r-GO : reduce Graphene Oxide

วิธีการเตรียม เริ่มจากการสังเคราะห์นาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอน และสังเคราะห์กราฟีน ด้วยวิธีการโหมตีฟายด์ฮัมเมอร์ (The modified Hummer's method) วิธีการนี้จะทำให้กราฟีนออกไซด์เปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ หรือ กราฟีน หลังจากนั้นนำมาผ่านผสมผ่านสารละลายคลอไรด์ นาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์มีสภาพไฟฟ้าเป็นบวก และกราฟีนมีความเป็นลบ จะทำให้เกิดการจับรวมตัวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต ดังภาพที่ 2.30 เมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ กราฟที่ได้มีพีคของคอปเปอร์ออกไซด์และกราฟีน แสดงในรูป 2.31(ก.) เป็นข้อมูลยืนยันว่าวัสดุนี้ประกอบไปด้วยนาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์และกราฟีนจริง เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, ตรวจผ่าด้านข้างและภาพด้านบน ได้ภาพดังรูป 2.31 (ข.)

ผลจากการวัดความสามารถในการเก็บประจุด้วยเครื่องไซคลิกโวลแทมมิเตอร์ (Cyclic voltammeter) ในภาพที่ 2.32 จะเห็นว่า ในเงื่อนไขของนาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือกราฟีน ประสิทธิภาพการทำงานต่ำเมื่อมีการเก็บประจุหลายครั้ง ในขณะที่กราฟีนที่ไม่มีมีการเจือนาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์ประสิทธิภาพการทำงานต่ำกว่าทุกเงื่อนไข แต่มีค่าคงที่ จากผลการทดลอง เงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ นาโนชีทคอปเปอร์ออกไซด์ผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

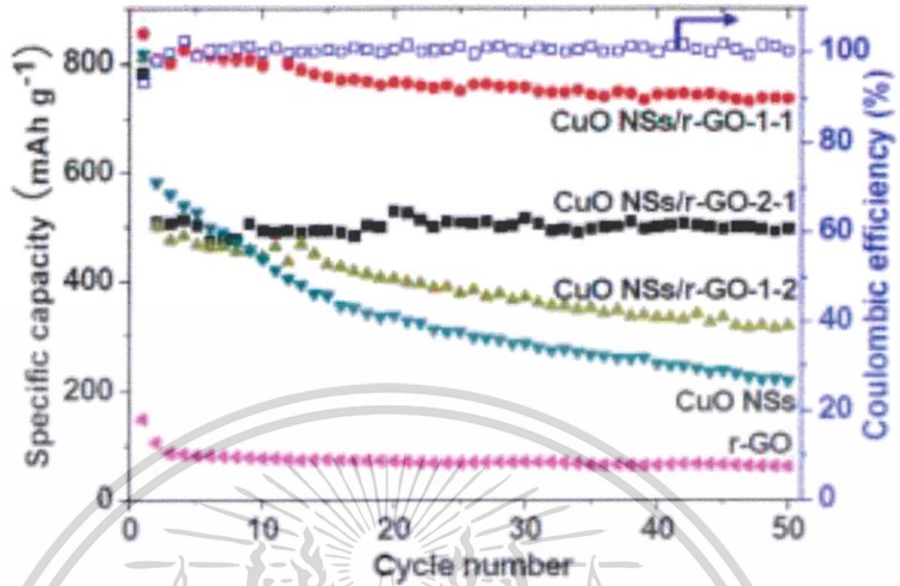


(ก.)



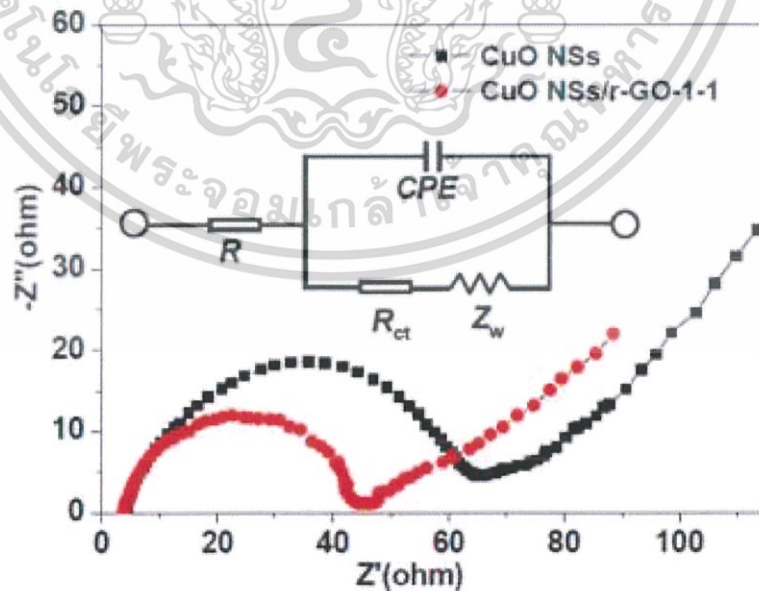
(ข.)

ภาพที่ 2.31 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในวัสดุประกอบ (ก.)  
ภาพที่ได้จาก SEM (a-d) ภาพที่ได้จาก TEM (e-f) (ข.)



ภาพที่ 2.32 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องไซคลิกโวลแทมมิเตอร์ (Cyclic voltammeter)

นอกจากนี้ทำการวัดตรวจสอบวงจรสมมูลของอุปกรณ์ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกราฟไนควิสต์ (Nyquist plot) ด้วยเครื่อง อิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์ สเปกโตรสโคปี (electrochemical impedance spectroscopy: EIS) ได้วงจรมูลดังภาพที่ 2.33



ภาพที่ 2.33 ผลการวิเคราะห์วงจรสมมูลด้วยเครื่อง EIS

จากงานวิจัยดังกล่าว นาโนซีทคอปเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บประจุไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากอาศัยคุณสมบัติตัวเก็บประจุและมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นประสิทธิภาพการเก็บประจุในตัวอุปกรณ์จะมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การออกแบบโครงสร้างเป็นเรื่องที่สำคัญ โครงสร้างที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพได้

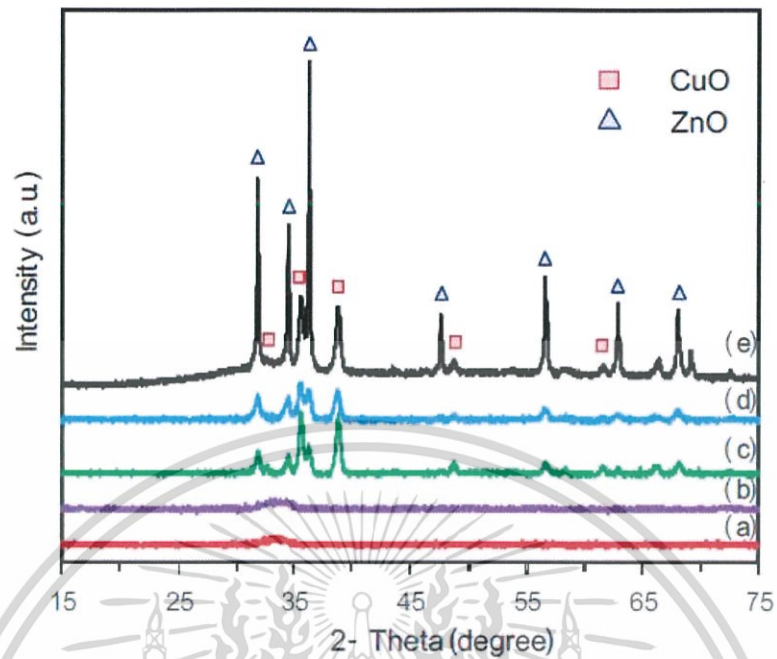
#### 2.4.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์

ในที่นี้ยกตัวอย่างงานวิจัยของนายันทนา คชาบาลพร้อมคณะวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [14] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้ในการผลิตเมทานอลจากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งสามตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวัสดุประกอบซึ่งในงานวิจัยนี้ มีความน่าสนใจที่การสร้างวัสดุประกอบที่มีการกระจายตัวของอนุภาคต่างกันและทำให้ได้ขนาดที่อยู่ในระดับนาโน กระบวนการสังเคราะห์ที่อ่านต่อได้จากแหล่งอ้างอิงข้างต้น ผลการสังเคราะห์ได้ผลดังตารางที่ 2.3 พบว่าในแต่ละตัวมีอัตราส่วนปริมาตรคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ภาพที่ 2.33 พบว่า ในส่วนที่เป็นคอปเปอร์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ มีระนาบที่เป็นผลึก แต่เซอร์โคเนียมไม่แสดงพีค นั่นคือเซอร์โคเนียมมีความเป็นอสัณฐาน ทางคณะวิจัยมีการคำนวณขนาดของอนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านสมการเชอเรอร์ (Scherrer) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2.4 จากการคำนวณแสดงให้เห็นถึงคอปเปอร์ออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าซิงค์ออกไซด์ ในกรณีที่มีเซอร์โคเนียมออกไซด์อยู่มาก ไม่สามารถคำนวณหาผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ได้ แสดงให้เห็นว่า คอปเปอร์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์มีการกระจายตัวมากในวัสดุ

ตารางที่ 2.3 ปริมาณโลหะที่สังเคราะห์ได้

Samples <sup>a</sup>	Metal content (wt.%)			Zn/Cu
	Cu	Zn	Zr	
CZZ 40-40-20	26.03	31.60	42.37	1.21
CZZ 40-30-30	24.96	24.39	50.65	0.97
CZZ 50-25-25	38.51	26.36	35.13	0.68
CZZ 40-20-40	23.49	12.86	63.65	0.54
CZZ 25-25-50	15.42	16.78	67.80	1.09

<sup>a</sup> The samples are denoted as CZZ x-y-z where x, y and z are the percentage of CuO, ZnO and ZrO<sub>2</sub>, respectively.

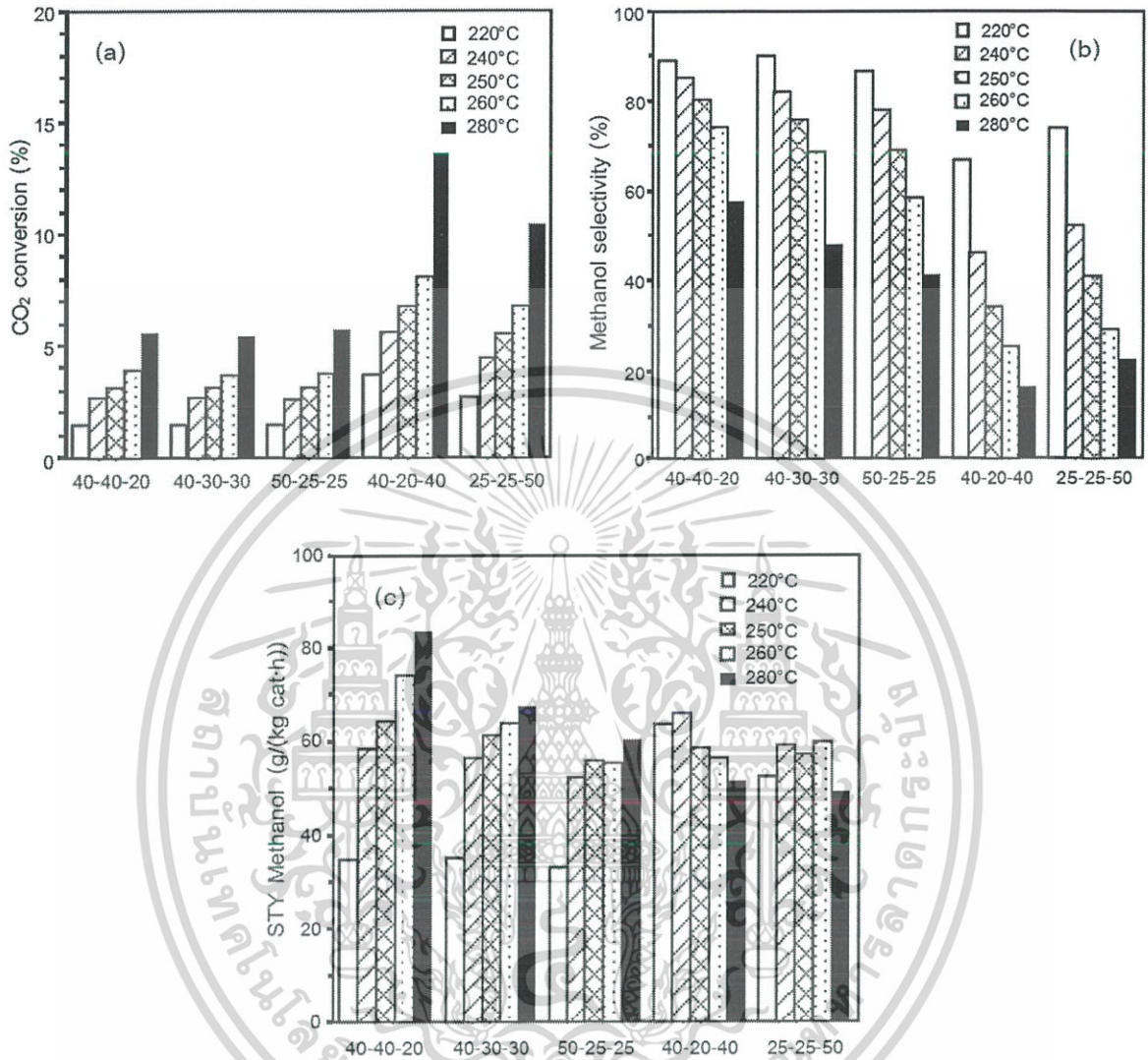


ภาพที่ 2.34 กราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในทุกระยะ (a) CZZ25-25-50 (b) CZZ40-20-40 (c) CZZ50-25-25 (d) CZZ40-30-30 and (e) CZZ40-40-20.

ตารางที่ 2.4 แสดงขนาดของคอปเปอร์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

Samples	Zn/Cu	Average metal oxides crystallite size (nm)	
		CuO	ZnO
CZZ 40-40-20	1.0	15.2	48.1
CZZ 40-30-30	0.75	17.0	19.5
CZZ 50-25-25	0.5	19.2	22.1
CZZ 40-20-40	0.5	-	-
CZZ 25-25-50	1.0	-	-

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตเมทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ได้ผลดังภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกเงื่อนไขภายใต้อุณหภูมิต่างๆ  
 (a) ค่าการแปรผันคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> conversion)  
 (b) ค่าการเลือกเกิดเมทานอล (Methanol selectivity)  
 (c) ค่าผลได้ของเมทานอลต่อกิโลกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหนึ่งชั่วโมง  
 (Space time yield of methanol)

วิเคราะห์ภาพ a. พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่าการแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณมาก (40-50 %) ค่าการแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณน้อย (20-30 %) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มีการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ดีกว่า จะให้ค่าการแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า

วิเคราะห์ ภาพ b. พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการเลือกเกิดเมทานอลจะมีค่าลดลง เป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา reverse water gas shift เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน มีค่าสูงกว่าปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยา reverse water gas shift ส่วนปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณมาก (40-50 %) ค่าการเลือกเกิดเมทานอลจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณน้อย (20-30 %) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ดีจะมีความเฉพาะเจาะจงกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา reverse water gas shift มากกว่าปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์

วิเคราะห์ภาพ c. พบว่าในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณน้อย (20-30 %) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าผลได้ของเมทานอลต่ออิกโลกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหนึ่งชั่วโมงเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีเซอร์โคเนียมไดออกไซด์อยู่ปริมาณมาก (40-50 %) ค่าผลได้ของเมทานอลต่ออิกโลกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหนึ่งชั่วโมงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียส และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 240 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากค่าผลได้ของเมทานอลขึ้นอยู่กับค่าการแปลงผันของคาร์บอนไดออกไซด์และค่าการเลือกเกิดเมทานอล

จากงานวิจัยดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคอปเปอร์ออกไซด์มีส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเพื่อการผลิตเมทานอลได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งวิธีนี้สามารถทำวัสดุประกอบได้และมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความน่าสนใจอยู่ที่การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์และขนาดของอนุภาค

จากเรื่องราวที่กล่าวมาข้างต้น คอปเปอร์ออกไซด์มีคุณสมบัติหลายอย่างในการประยุกต์ใช้งาน เช่น เป็นสารต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส เป็นวัสดุที่ใช้ทำเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์และอีกหลายอย่าง จึงทำให้คอปเปอร์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจที่จะพัฒนาความสามารถที่มีให้ดีขึ้น แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่ควรมองข้าม คือ โครงสร้างที่จะต้องมีความสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นใยหรือเป็นแบบอนุภาคเป็นที่เรียบร้อยแล้ว อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์นั้นนอกจากจะมีสารตั้งต้นเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแล้ว ปัจจัยภายนอกก็มีการส่งผลต่อโครงสร้างไม่น้อยไปกว่ากัน เช่น ปัจจัยทางด้านความร้อน ความดัน อุณหภูมิ สารเพิ่มความเสถียรภาพทางโครงสร้าง รวมไปถึงค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อโครงสร้าง ที่ได้ของวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยผ่านวิธีการสังเคราะห์แบบตกตะกอน นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการสังเคราะห์และวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

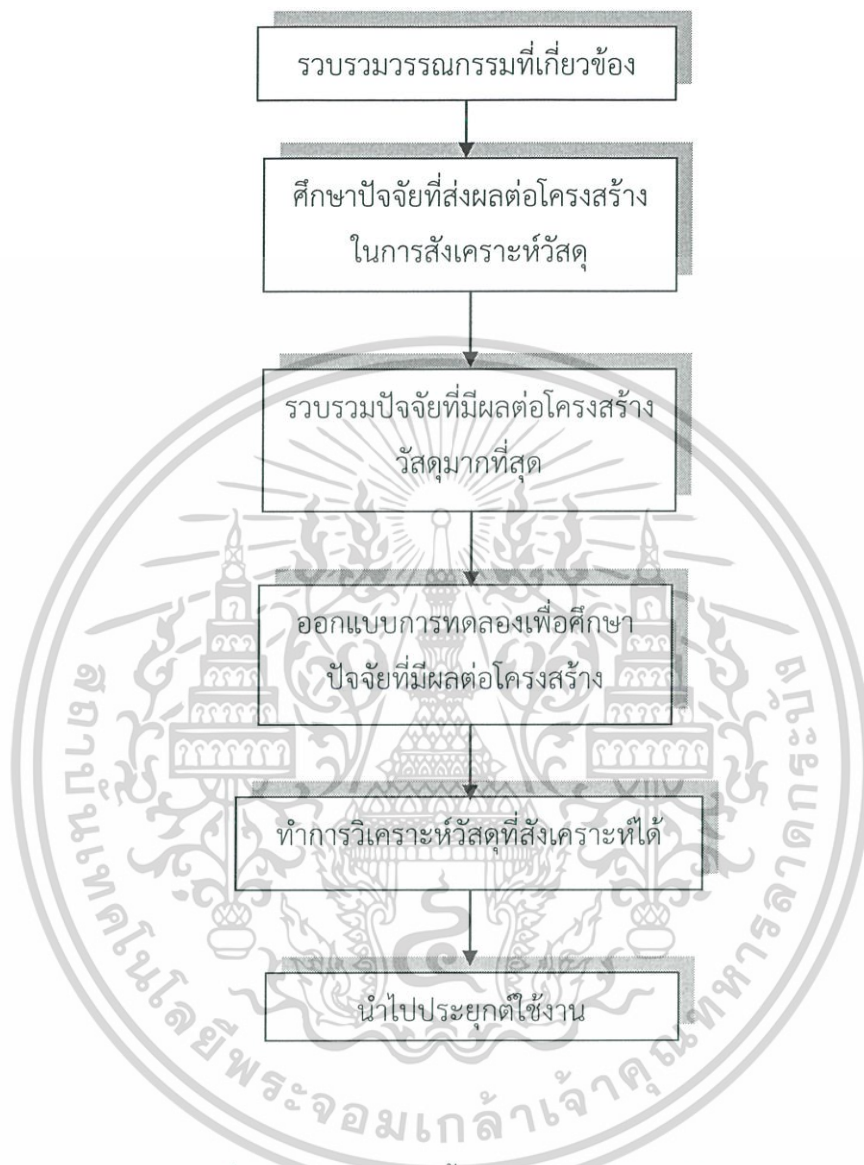
#### 3.1 จุดประสงค์และออกแบบการทดลองวิจัย

หลังจากที่ได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 2 แล้ว จะเห็นว่าวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์มีประโยชน์ในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์กักเก็บพลัง การต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น อุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้วัสดุจะให้คุณประโยชน์ในหลายด้าน สิ่งหนึ่งที่เป็นพื้นฐานในการพัฒนาความสามารถของวัสดุคือโครงสร้างของวัสดุนั้นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวคือ ปัจจัยทางด้านความเข้มข้นของสารตั้งต้นของสารละลาย รวมถึงสารให้ความเสถียรทางโครงสร้างวัสดุ

วิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ใช้คือ วิธีการตกตะกอน (Precipitation method) โดยใช้สารตั้งต้นคือสารละลายคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารที่ให้ความเสถียรภาพทางโครงสร้างคือ ไทโกลีเซอรอล (thioglycerol : TG)

สมมติฐานเบื้องต้นคือ ได้อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยดังกล่าว คือ ปัจจัยความเข้มข้นของสารตั้งต้นซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และปัจจัยการเติมสารให้ความเสถียรภาพทางโครงสร้างไทโกลีเซอรอล (thioglycerol : TG)

### 3.1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

การเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ วิธีการตกตะกอนทางเคมี (precipitation method) โดยใช้สารตั้งต้นเป็นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 - \text{H}_2\text{O}$ ) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เมื่อทำการผสมกันแล้วจะเกิดตะกอนสีน้ำตาลเข้ม-ดำ ตะกอนที่ได้คือ อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

#### 3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีการเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

- บีกเกอร์ขนาด 200 ml
- ปีเปตขนาด 50 ml
- เตอบสาร
- เครื่องคนสารด้วยสนามแม่เหล็ก
- ไมโครทรอปเลท
- กระจกทดสอบกรด - เบส ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
- สารคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 - \text{H}_2\text{O}$ )
- สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
- สารให้ความเสถียรภาพทางโครงสร้างไทโอกลิเซอรอล (Thioglycerol : TG)
- น้ำปลอดประจุ (De-ionized water)

#### 3.2.2 การเตรียมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

3.3.2.1 เงื่อนไขการทดลองความเข้มข้นของคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 - \text{H}_2\text{O}$ ) และความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในการทดลองนี้จะ ทำการศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นของคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 - \text{H}_2\text{O}$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยกำหนดให้ ความเข้มข้นของสารละลาย ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

3.3.3.2 เงื่อนไขการเติมสารไทโอกลิเซอรอลเพื่อเพิ่มความเสถียร

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารไทโอกลิเซอรอล โดยกำหนดให้การเติมอยู่ที่ 1, 10 และ 100 ไมโครลิตร ในทุกเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต

เงื่อนไข	ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
1	0.125 M	0.5 M
2	0.083 M	0.5 M
3	0.0625 M	0.5 M
4	0.05 M	0.5 M

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เงื่อนไข	ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
1	0.05 M	0.0125 M
2	0.05 M	0.1 M
3	0.05 M	0.5 M
4	0.05 M	2 M

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอรอลเพื่อเพิ่มความเสถียร

เงื่อนไข	ความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	เติมสารไทโอกลีเซอรอล (ไมโครลิตร)
1	0.125 M	0.5 M	1, 10, 100
2	0.083 M	0.5 M	1, 10, 100
3	0.0625 M	0.5 M	1, 10, 100
4	0.05 M	0.5 M	1, 10, 100

### 3.3.2.3 วิธีการผสมสาร

ในการทดลองนี้จะทำการใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ

100 มิลลิลิตร ผ่านอุปกรณ์ตวงสารปิเปตขนาด 50 มิลลิลิตร ลงในสารละลายคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต ในแต่ละความเข้มข้น ด้วยอัตราการผสมสาร 36 หยด ต่อ 10 วินาที ภายใต้ตัวแปรควบคุม คือ ทำการทดลองในห้องปราศจากฝุ่น ทำการทดลองในอุณหภูมิห้อง คนสารด้วยเครื่องคนสารด้วยสนามแม่เหล็กตลอดเวลาด้วยอัตราการคนเท่ากันทุกเงื่อนไข หลังจากผสมเสร็จแล้วจะได้ตะกอนสีน้ำตาลเข้ม – ดำ ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ จนกว่า ค่ากรด – เบส ของสารละลายมีความเป็นกลาง แล้วทำการกำจัดน้ำโดยนำไปเข้าเตาอบสารภายใต้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง

### 3.3 การตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

#### 3.3.1 การตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว

ในส่วนของงานวิจัยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ บริษัท Rigaku smart lab X-ray diffraction แสดงในรูป 3.2 เครื่องนี้ใช้รังสีคอปเปอร์ เค แอลฟา ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร เงื่อนไขที่ใช้ในการตรวจสอบคือ ตรวจวัดมุม 2 $\theta$  - 80 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ควรจะพบระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ ตัวอย่างที่เตรียมตรวจวัดเป็นผง



ภาพที่ 3.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

#### 3.3.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวอย่างโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ มีลักษณะภาพเป็นภาพขาวดำมีกำลังขยาย 10 - 300,000 เท่า ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณนำสัญญาณไปขยายและสร้างเป็นภาพออกมา แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพแสดงบนหน้าจอ

ในงานวิจัยเครื่องที่ใช้ตรวจสอบ คือ เครื่องบริษัท Carl Zeiss แสดงในภาพที่ 3.1 ตัวอย่างที่ใช้คือผง แต่เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์เป็นฉนวนไฟฟ้า จะไม่สามารถดูโครงสร้างภายนอกได้ จึงต้องทำการเคลือบทองก่อนนำไปวัด



ภาพที่ 3.3 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

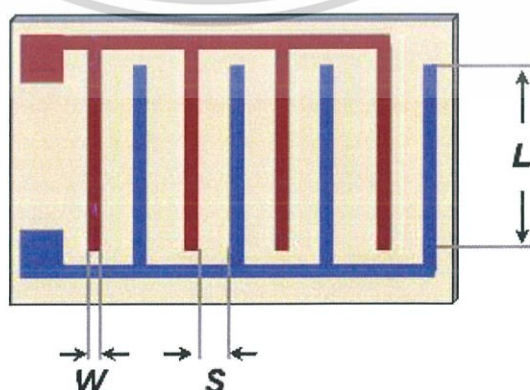
### 3.4 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

#### 3.4.1 เตรียมอุปกรณ์ตรวจวัด

##### 3.4.1.1 ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าประเภทหวี (interdigital electrodes)

ภาพที่ 3.3 ด้วยน้ำปราศจากประจุ และล้างด้วยไอโซโพรพานอล อย่างละ 5 นาที ผ่านเครื่องสั่นความถี่สูง จากนั้นนำไปวางไว้บนเครื่องแผ่นให้ความร้อน (hotplate) ที่ 80 องศาเซลเซียส

3.4.1.2 ทำการผสมวัสดุนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์กับเมทานอลในอัตราส่วน 0.01 กรัม ต่อ 1 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonication) 20 นาที ทำการดูดสาร 100 ไมโครลิตรด้วยอุปกรณ์หยดสารระดับไมโครเมตร หยดลงในขั้วไฟฟ้าประเภทหวี



ภาพที่ 3.4 ภาพจำลองขั้วไฟฟ้าแบบหวี (interdigital electrode)

### 3.4.2 การตรวจวัดความชื้น

ความชื้นที่ใช้ในการตรวจวัดมีดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

ชนิดสาร	LiCl	CH <sub>3</sub> COOK	MgCl	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaCl	KCl	KNO <sub>3</sub>
ค่าความชื้น (%RH)	11.30	23.00	32.75	52.89	75.29	84.34	93.00

3.4.2.1 ตรวจวัดการตอบสนอง ทำการบันทึกแนวโน้มความต้านทานไฟฟ้าในอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น โดยใช้เครื่องแอลซีอาร์ (LRC meter) แสดงในภาพที่ 3.4 เริ่มทำการตรวจวัด จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด(11%RH) ไปยังค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด (93 %RH) ในแต่ละค่าความชื้นใช้เวลาในการวัด 5 นาที ภายใต้เงื่อนไขควบคุมคือ อุณหภูมิห้อง และเปรียบเทียบผลการทดลอง

3.4.2.2 ตรวจวัดความสามารถในการใช้ซ้ำ (repeativity) นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นต่ำสุดคือ 11.30%RH และ 93.00%RH ตามลำดับ โดยทำการจับเวลาความชื้นละ 5 นาที ทำการวัดซ้ำ

3.4.2.3 ตรวจวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น (responsivity) นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นต่ำสุดคือ 11.30%RH วัดค่าความต้านทานจนมีค่าคงที่ หลังจากนั้นเปลี่ยนวัดความชื้นเป็น 93.00%RH วัดค่าความต้านทานจนมีค่าคงที่ หลังจากนั้นเปลี่ยนกลับมาวัดความชื้นที่ต่ำสุดอีกครั้ง วัดค่าความต้านทานจนมีค่าคงที่



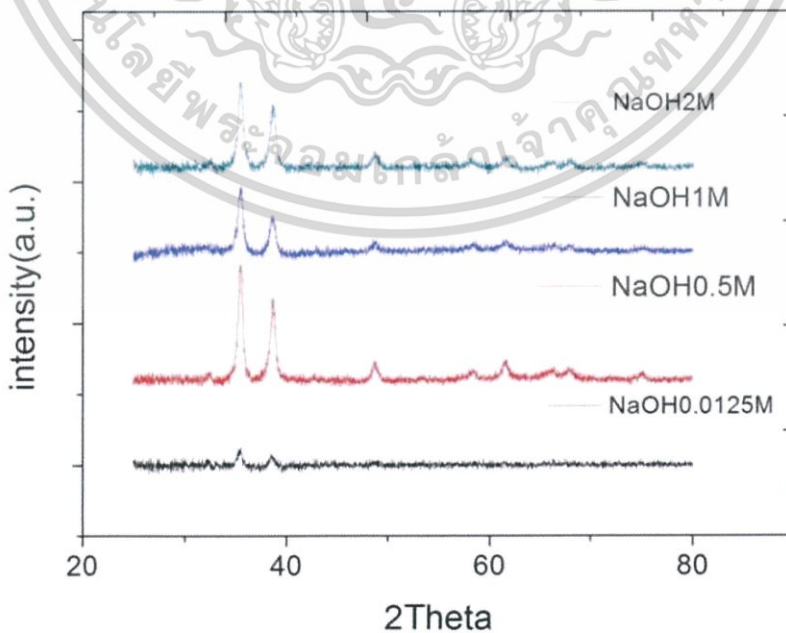
ภาพที่ 3.5 เครื่องแอลซีอาร์มิเตอร์ (LCR meter)

## บทที่ 4

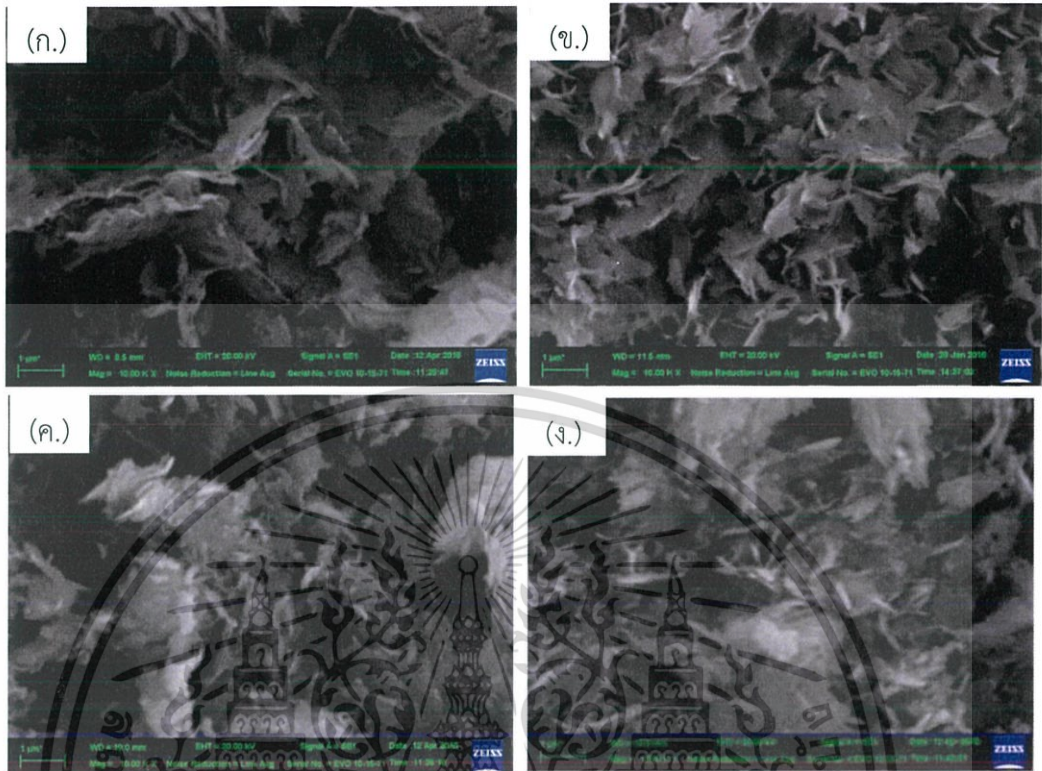
### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในทุกเงื่อนไขของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้กราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีระนาบหลักของคอปเปอร์ออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ระนาบ (111) [9,15] อยู่ที่มุม 35.5 องศา ระนาบ (110) อยู่ที่มุม 38.6 องศา ระนาบ (202) อยู่ที่มุม 48.8 องศา ระนาบ (113) อยู่ที่มุม 61.5 องศาและระนาบ (220) อยู่ที่มุม 68.1 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4.1 วัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ แนวโน้มการเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มมากขึ้นในช่วงความเข้มข้น 0.0125 โมลาร์ ถึงความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีแนวโน้มความเป็นผลึกมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 โมลาร์ ถึงความเข้มข้น 2 โมลาร์ มีแนวโน้มความเป็นผลึกน้อยลง จากผลการตรวจวัด กราฟที่แสดงความเป็นผลึกมากที่สุดคือ เงื่อนไขความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ ซึ่งเมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 10 กิโลโวลต์ ได้ผลเป็นดังภาพที่ 4.2 ในทุกเงื่อนไข โครงสร้างของวัสดุมีลักษณะเป็นแผ่น มีบางส่วนรวมเกาะกลุ่ม จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลต่อโครงสร้างวัสดุ โดยเงื่อนไขที่แสดงความเป็นแผ่นหรือมีการกระจายตัวทำให้เห็นโครงสร้างได้ชัดที่สุดคือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ ดังนั้นในเงื่อนไขนี้ จึงถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์คอปเปอร์ออกไซด์ในทุกเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต ผลการทดลองจะอธิบายในหัวข้อ 4.2



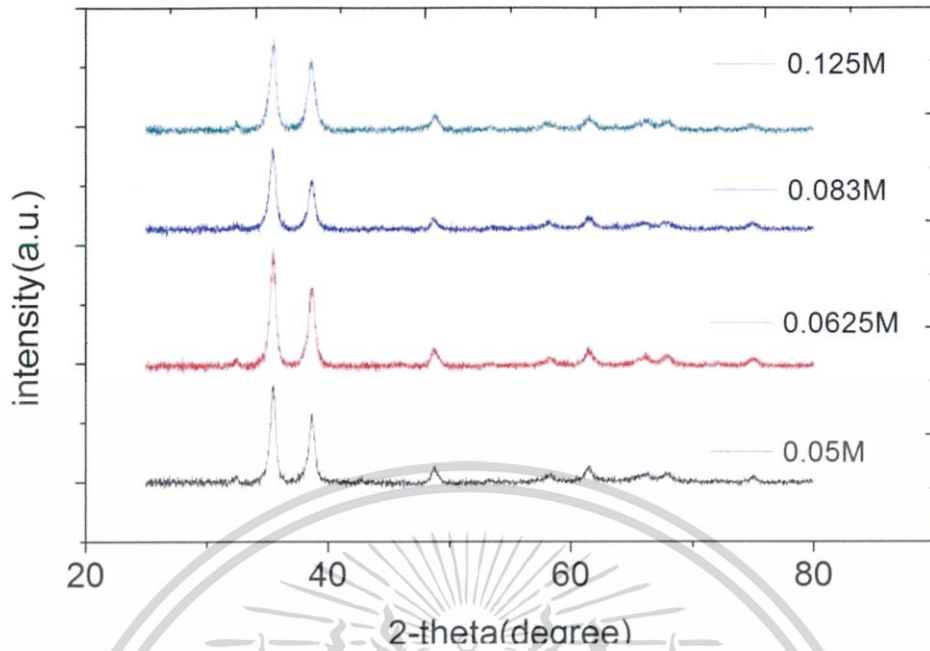
ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์



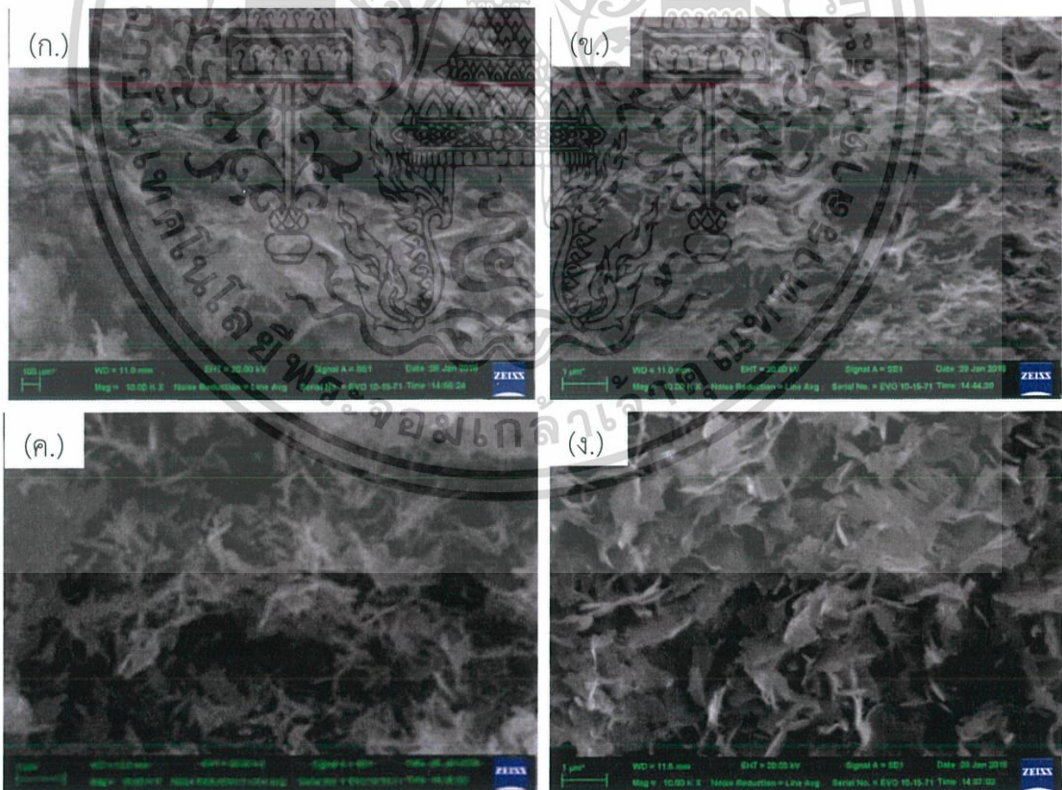
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0125 โมลาร์(ก.), 0.05 โมลาร์(ข.), 1 โมลาร์(ค.) และ 2 โมลาร์(ง.)

#### 4.2 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต

จากการนำวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ในทุกเงื่อนไขของความเข้มข้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรตไปตรวจสอบด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีระนาบหลักของคอปเปอร์ออกไซด์แสดงขึ้นมาในกราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังรูป 4.3 (ระนาบของคอปเปอร์ออกไซด์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1) ดังนั้น วัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์จริง เงื่อนไขที่มีความเป็นผลึกสูงสุดได้แก่ เงื่อนไขความเข้มข้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์ ความเป็นผลึกน้อยสุดคือความเข้มข้น 0.083 โมลาร์ เมื่อนำวัสดุที่ได้ในทุกเงื่อนไขไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 4.4 โครงสร้างของวัสดุทุกเงื่อนไข มีโครงสร้างแบบแผ่น มีบางส่วนเกาะกลุ่ม เงื่อนไขที่มีการกระจายตัวที่ทำให้เห็นโครงสร้างได้ชัดเจนที่สุดคือ เงื่อนไขความเข้มข้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์ ดังนั้นการเติมปริมาณคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต ส่งผลต่อโครงสร้างของวัสดุ อย่างไรก็ตามในเงื่อนไขนี้ บางบริเวณมีการจับรวมตัวเป็นกลุ่ม ทำให้สังเกตโครงสร้างของวัสดุได้ยาก ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเติมสารไทโอกลีเซอรอล ซึ่งเป็นสารช่วยลดการจับรวมกลุ่ม เพิ่มการกระจายตัว จะอธิบายผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 ต่อไป



ภาพที่ 4.3 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไข  
ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต

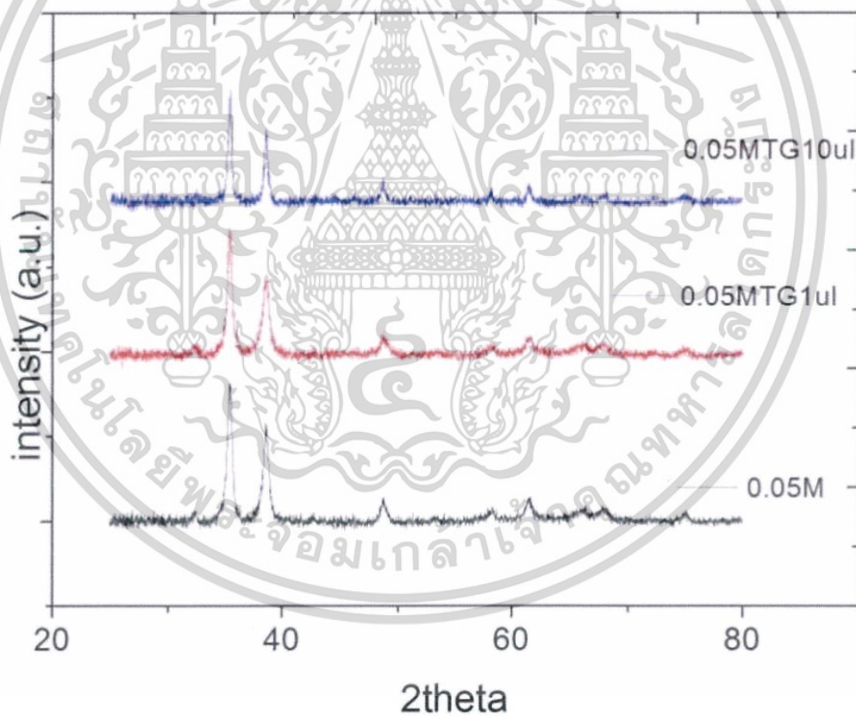


ภาพที่ 4.4 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไข  
ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต  
0.125 โมลาร์(ก.), 0.083 โมลาร์(ข.), 0.0625 โมลาร์(ค.) และ 0.05 โมลาร์(ง.)

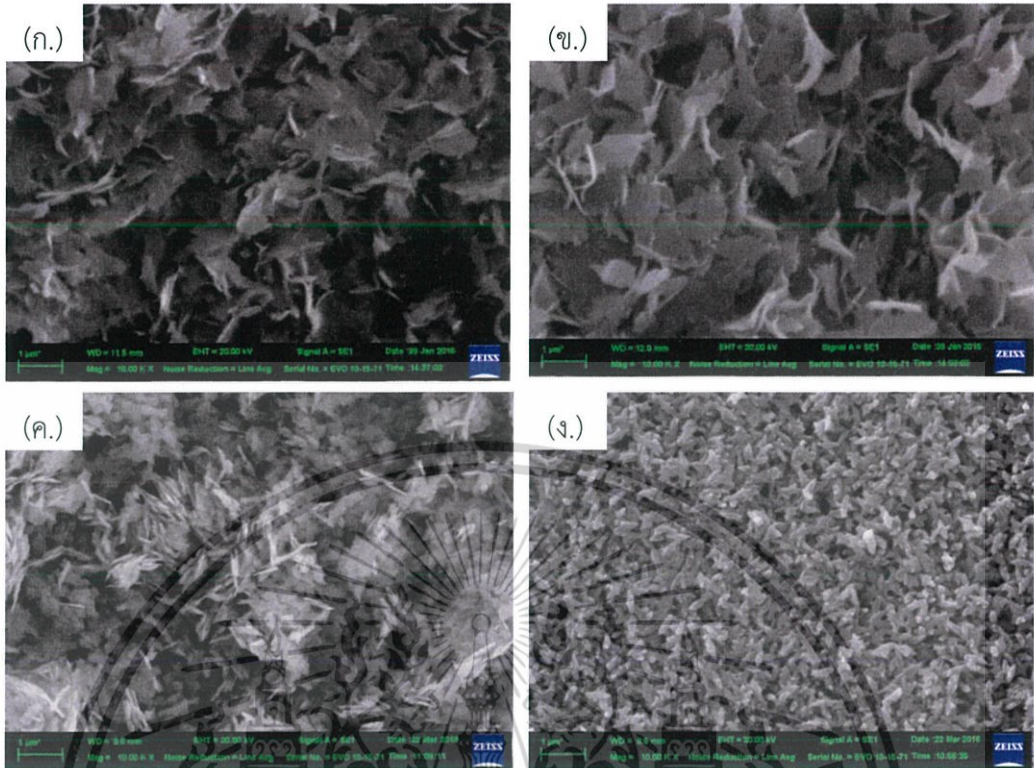
### 4.3 ผลการทดลองการเติมสารให้ความเสถียรทางโครงสร้างไทโอกลีเซอรอล

#### 4.3.1 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์

จากการนำวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ผลการตรวจแสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นว่า มีตำแหน่งจุดยอดที่สำคัญแสดงถึงว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์จริง (ตำแหน่งจุดยอด อธิบายในหัวข้อ 4.1) เมื่อเติมสารไทโอกลีเซอรอล 1 ไมโครลิตร วัสดุยังคงมีความเป็นผลึกสูง แต่เมื่อเติมในปริมาณมากขึ้น คุณสมบัติความเป็นผลึกเริ่มลดน้อยลง เมื่อนำไปตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภาพที่ 4.6 พบว่า ขนาดของวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในเงื่อนไขการเติมไทโอกลีเซอรอล 1 ไมโครลิตร เมื่อเติมมากขึ้น 10 และ 100 ไมโครลิตร ทำให้คุณสมบัติความเป็นแผ่นลดน้อยลงตามลำดับ โดยขนาดเล็กที่สุดคือเงื่อนไขการเติม 100 ไมโครลิตร จากผลการทดลองดังกล่าว สารไทโอกลีเซอรอลมีผลต่อโครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มขนาดพื้นที่เล็กลงตามปริมาณสารไทโอกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น



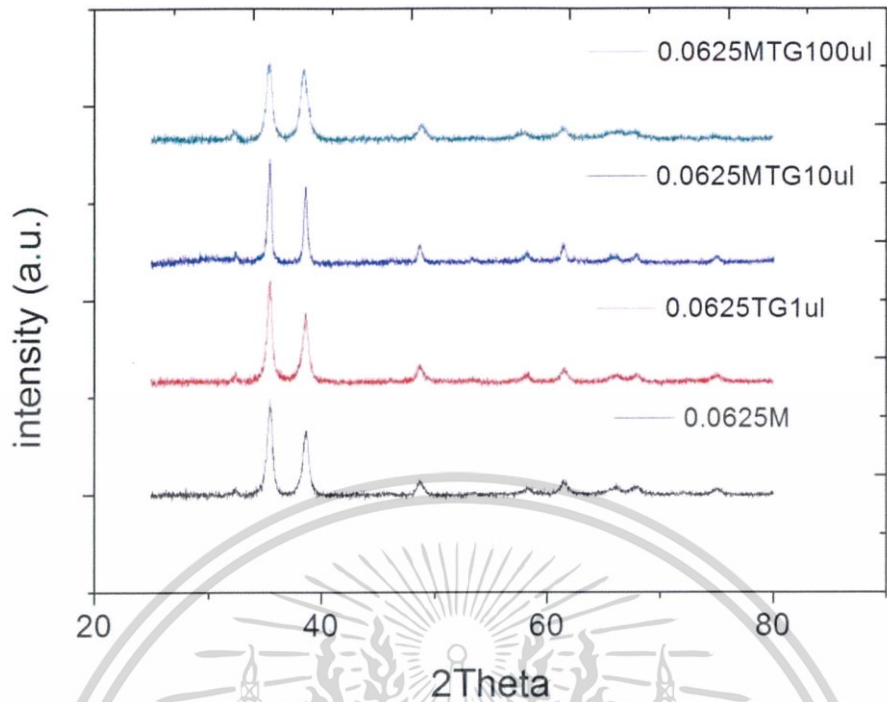
ภาพที่ 4.5 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์



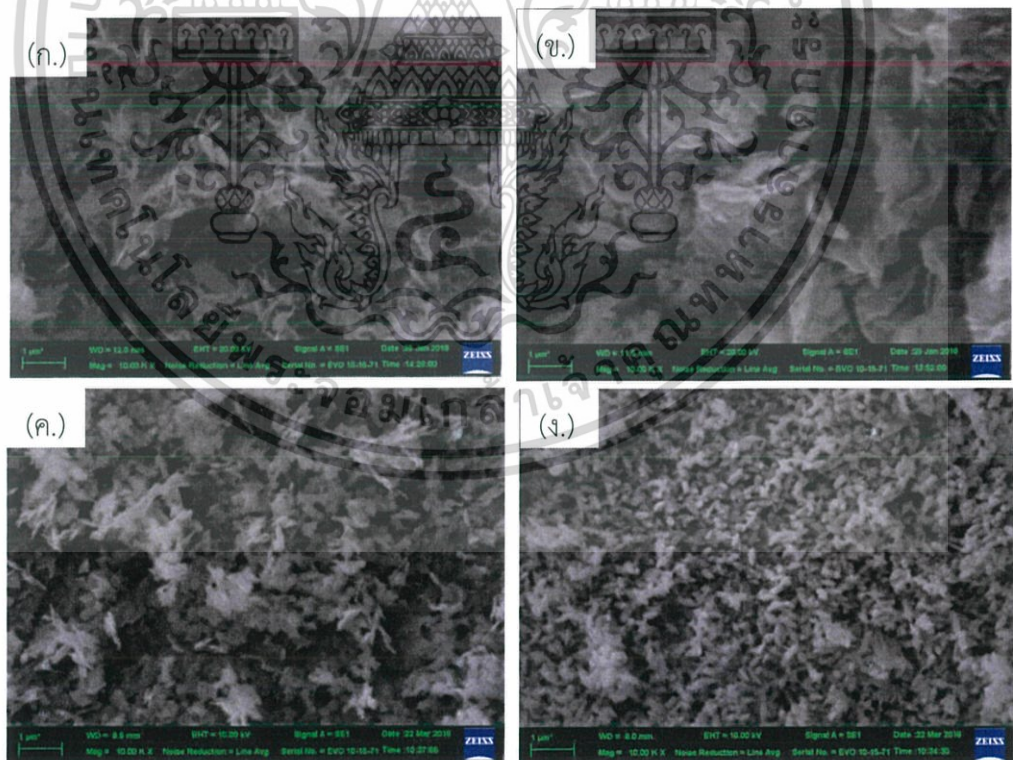
ภาพที่ 4.6 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอรอล ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.05 โมลาร์ ไม่เติม(ก.) 1 ไมโครลิตร(ข.) 10 ไมโครลิตร(ค.) และ 100 ไมโครลิตร(ง.)

#### 4.3.2 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์

เมื่อนำวัสดุที่สังเคราะห์ไปตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ผลการตรวจวัดดังภาพที่ 4.7 กราฟที่ได้แสดงให้เห็นถึงจุดยอดหลักของแต่ละระนาบผลึกในวัสดุที่แสดงความเป็นคอปเปอร์ออกไซด์ (จุดยอดของแต่ละระนาบ กล่าวในหัวข้อที่ 4.1) ดังนั้นวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์จริง เมื่อเติมสารไทโอกลีเซอรอล 1, 10 และ 100 ไมโครลิตร พบว่า ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นในการเติมไทโอกลีเซอรอล 1 ไมโครลิตร และ 10 ไมโครลิตร แต่เมื่อเติม 100 ไมโครลิตร ความเป็นผลึกลดลง เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 4.8 เงื่อนไขที่แสดงการกระจายตัวได้ดีที่สุดคือ เติมสารไทโอกลีเซอรอล 1 ไมโครลิตร และเกาะกลุ่มเป็นก้อนมากที่สุดในเงื่อนไขการเติมไทโอกลีเซอรอล 100 ไมโครลิตร จากผลการทดลองดังกล่าว จะเห็นว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารไทโอกลีเซอรอล ส่งผลต่อโครงสร้างของวัสดุ โดยมีแนวโน้มลดขนาดของวัสดุ ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น



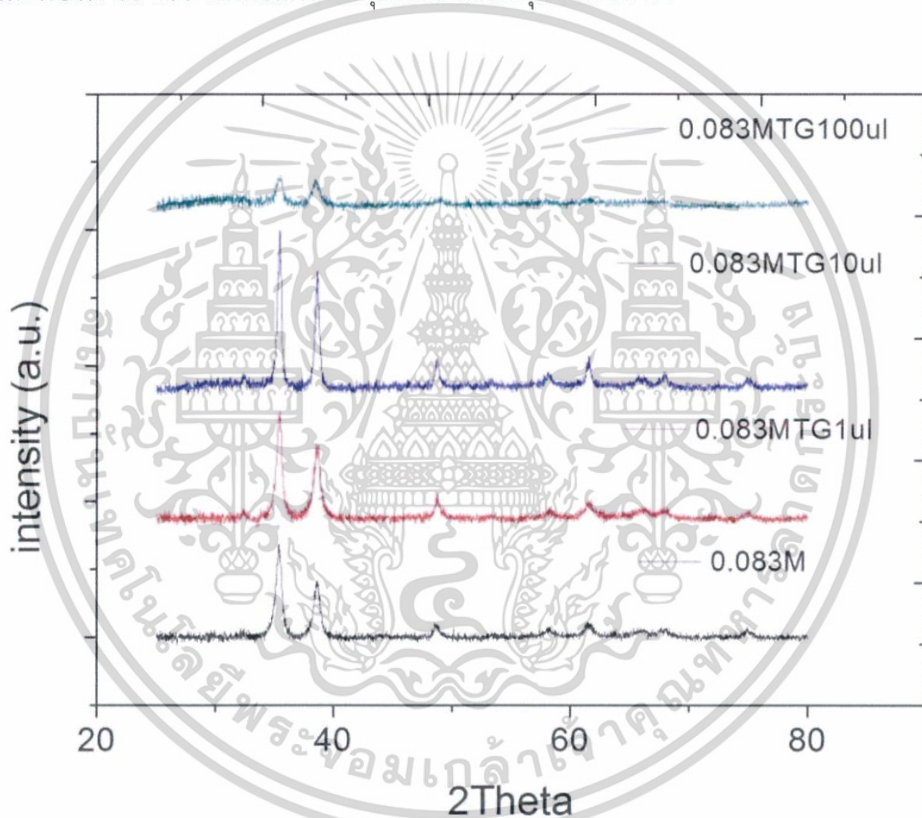
ภาพที่ 4.7 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในเงื่อนไขเตรียมสารไทโอกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์



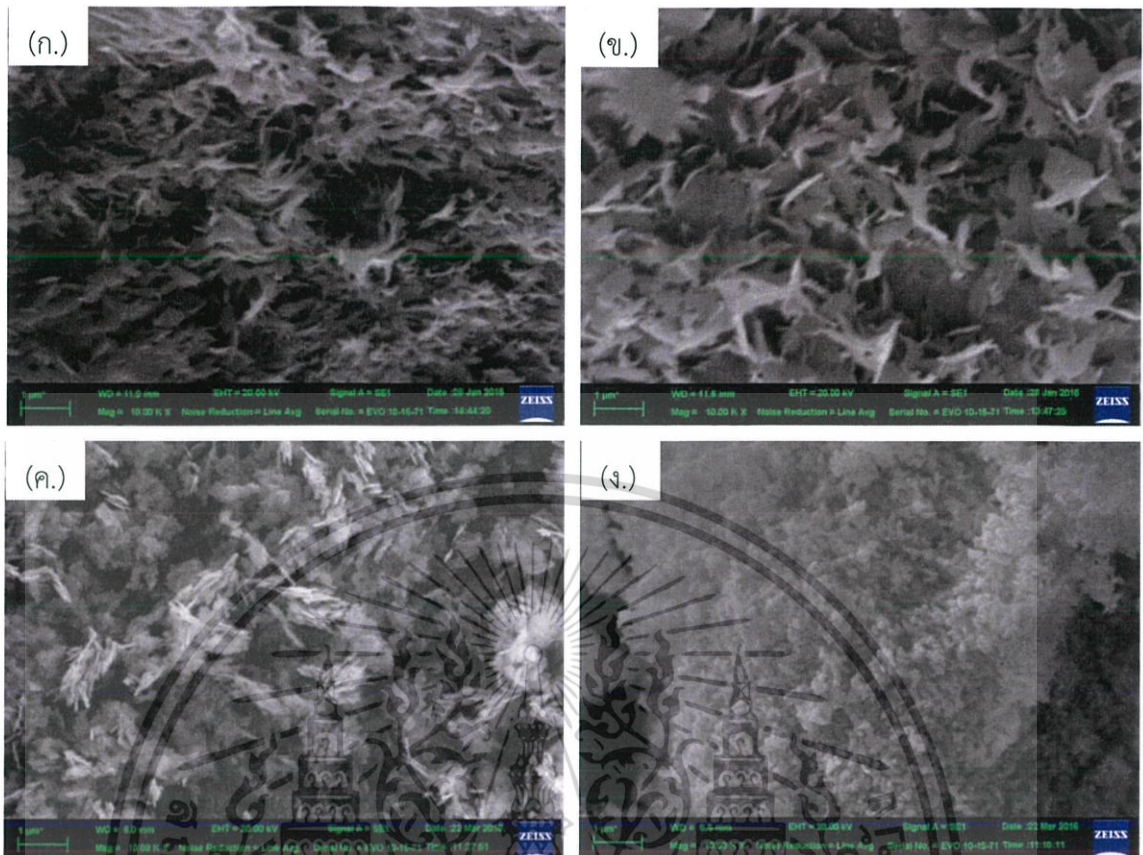
ภาพที่ 4.8 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเตรียมสารไทโอกลีเซอรอล ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.0625 โมลาร์  
ไม่เติม(ก.) 1 ไมโครลิตร(ข.) 10 ไมโครลิตร(ค.) และ 100 ไมโครลิตร(ง.)

#### 4.3.3 เติมสารให้ความเสถียรไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์

เมื่อทำการวิเคราะห์วัสดุที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ภาพที่ 4.9 พบว่ากราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ปรากฏจุดยอดระนาบที่สำคัญ (กล่าวในหัวข้อที่ 4.1) แสดงถึงว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นคอปเปอร์ออกไซด์จริง ความเป็นผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์เนื่องจากการเติมสารไทโอกลี- เซอรอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเติม 1 ไมโครลิตร และมีค่าสูงสุดในเงื่อนไขการเติม 10 ไมโครลิตร แต่เมื่อเติม 100 ไมโครลิตร ความเป็นผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากการตรวจวิเคราะห์วัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภาพที่ 4.10 ขนาดของวัสดุมีขนาดเล็กลงแปรผันตามปริมาณสารไทโอกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ 1 ไมโครลิตร วัสดุแสดงความเป็นแผ่น และที่ปริมาณ 100 ไมโครลิตร วัสดุมีความเป็นอนุภาคมากกว่า



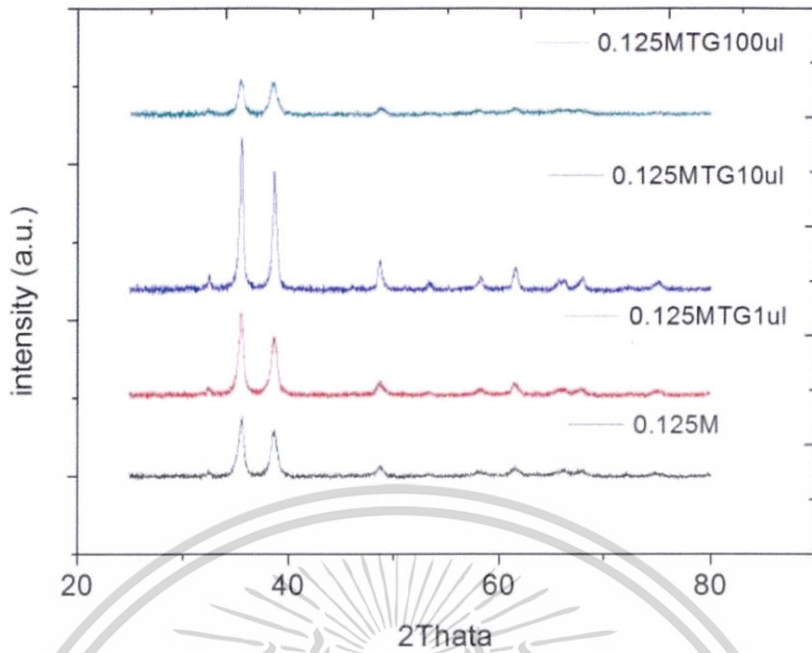
ภาพที่ 4.8 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเติมสารไทโอกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์



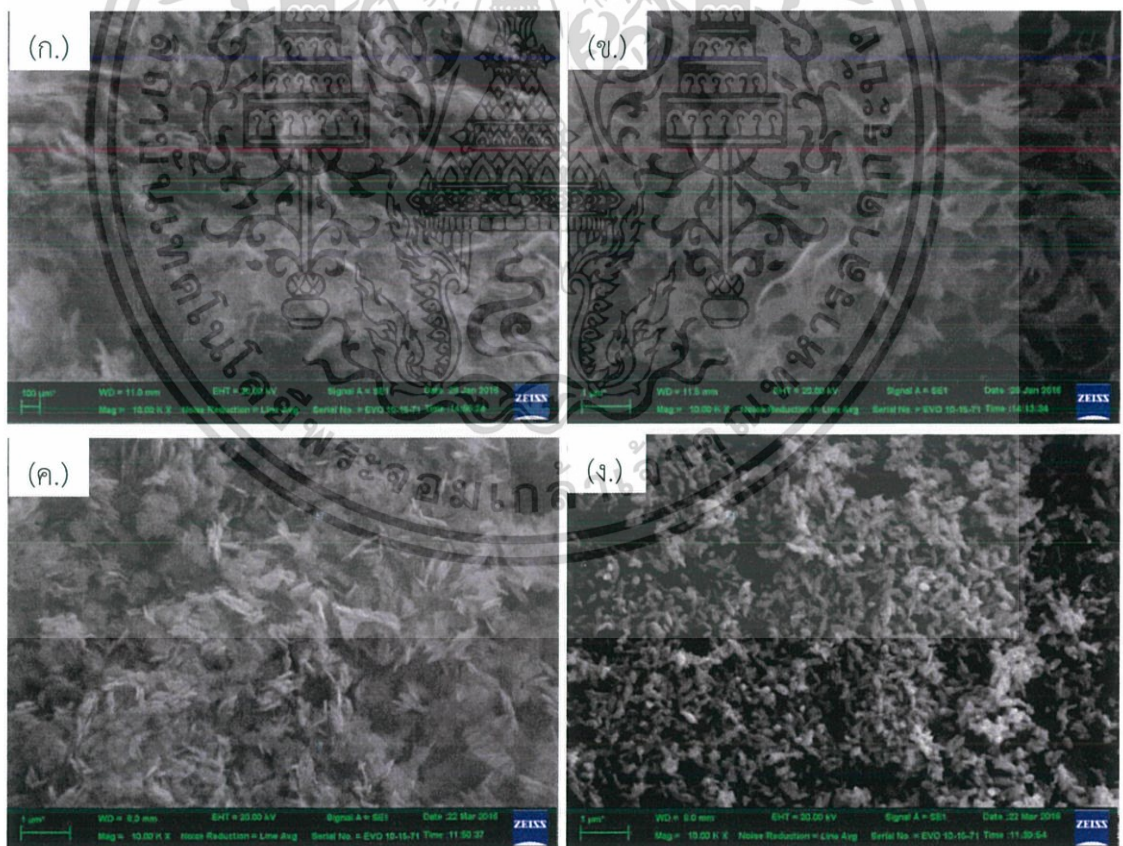
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอรอล  
 ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์  
 ไมโครลิตร(ก.) 1 ไมโครลิตร(ข.) 10 ไมโครลิตร(ค.) และ 100 ไมโครลิตร(ง.)

#### 4.3.4 เติมสารไทโอกลีเซอรอลในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์

ผลจากการตรวจสอบวัสดุด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ผลเป็นกราฟ ดังภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงระนาบที่สำคัญของวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นผลการวิเคราะห์ที่รับรองว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นคอปเปอร์ออกไซด์จริง (จุดยอดของระนาบ อธิบายในหัวข้อ 4.1) ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเงื่อนไขที่มีความเป็นผลึกมากที่สุดคือเติมไทโอกลีเซอรอล 10 ไมโครลิตร แต่ในขณะที่เติมไทโอกลีเซอรอลถึง 100 ไมโครลิตร วัสดุที่ได้มีความเป็นผลึกน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขทั้งหมด จะเห็นได้ว่า การเติมสารไทโอกลีเซอรอลสามารถทำให้วัสดุมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นได้ แต่เมื่อใส่ถึงปริมาณหนึ่งจะส่งผลให้ความเป็นผลึกของวัสดุมีค่าน้อยลง เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคที่สอดคล้องกับปริมาณสารไทโอกลีเซอรอล ในเงื่อนไขการเติม 1 ไมโครลิตร ให้



ภาพที่ 4.8 ผลการตรวจวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในเงื่อนไขเดิมสารไทโอกลีเซอร์อลที่ปริมาณต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในเงื่อนไขการเติมสารไทโอกลีเซอร์อล ความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์ อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.125 โมลาร์  
ไม่เติม(ก.) 1 ไมโครลิตร(ข.) 10 ไมโครลิตร(ค.) และ 100 ไมโครลิตร(ง.)

#### 4.4 ผลการทดลองประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

ในการประยุกต์ใช้งาน จะพิจารณาความสามารถในการกักเก็บความชื้นในตัววัสดุ โดยที่นี้เลือกเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตทมอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์ ไม่เติมสารไทโอกลิเซอรอล, เติมสารไทโอกลิเซอรอล 1 ไมโครลิตร, 10 ไมโครลิตรและ 100 ไมโครลิตร เนื่องจากวัสดุมีอัตราส่วนของพีคหลักที่มุม 35 องศา และ 38 องศาจากกราฟเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์(ภาพที่ 4.8) มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงในตารางที่ 4.1 แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของวัสดุ

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนพีคที่มุม 35.5 องศา และ 38.6 องศา ในเงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต

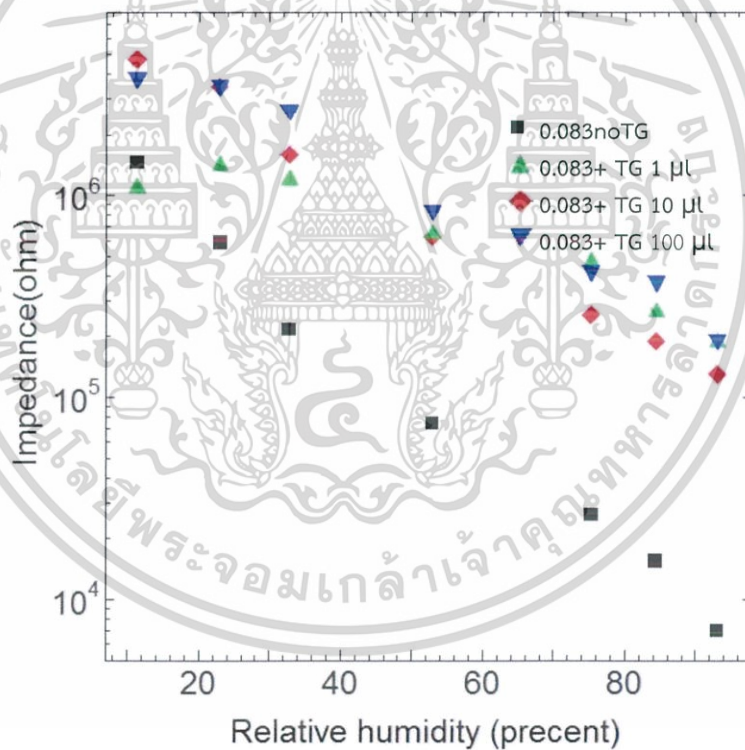
Cu(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>	NaOH	ไม่เติม TG	เติม TG 1 ไมโครลิตร	เติม TG 10 ไมโครลิตร	เติม TG 100 ไมโครลิตร
0.125 M	0.5 M	1.211	1.313	1.255	1.085
0.083 M	0.5 M	1.436	1.323	1.271	1.115
0.0625 M	0.5 M	1.317	1.345	1.298	1.105
0.05 M	0.5 M	1.344	1.365	1.381	—

#### 4.1 สภาพความไวของอุปกรณ์วัดความชื้น

ค่าการวัดความชื้นแสดงในตารางที่ 4.2 ในเงื่อนไขไม่เติม TG มีจำนวนออเดอร์ทหรือค่าความแตกต่างระหว่างความชื้น 11.30 %RH กับ 93.00 %RH มากที่สุด คือ 208.4 ในขณะที่เงื่อนไขเติมสารไทโอกลิเซอรอล 10 ไมโครลิตร มีค่าน้อยสุด คือ 5.83 เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับโครงสร้างของวัสดุ ความสามารถในการกักเก็บความชื้น ความเป็นแผ่นสามารถกักเก็บได้ดีกว่า เมื่อมีการเติมสารไทโอกลิเซอรอล ทำให้ลักษณะโครงสร้างสารมีขนาดลดลง แต่เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงลักษณะแผ่นไปเป็นอนุภาค วัสดุบางบริเวณขีดขวางการเข้าสัมผัสความชื้น เป็นผลให้ความสามารถในการกักเก็บลดน้อยลงในเงื่อนไข 1 ไมโครลิตร และ 10 ไมโครลิตรตามลำดับ แต่เมื่อเติมสารไทโอกลิเซอรอล 100 ไมโครลิตร วัสดุมีความเป็นอนุภาคขนาดเล็ก กักเก็บความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การเติมสารไทโอกลิเซอรอล ในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน นอกจากนี้พบว่า ในเงื่อนไขการเติมสารไทโอกลิเซอรอล 10 ไมโครลิตร แนวโน้มความต้านทานแตกต่างจากเงื่อนไขอื่น กล่าวคือ ที่ความชื้น 23.00 %RH ความต้านทานวัดได้ 10.620 เมกะโอห์ม ในขณะที่เริ่มต้นความชื้นที่ 11.30 %RH วัดความต้านทานได้ 1.255 เมกะโอห์ม แต่อย่างไรก็ตามความชื้นตั้งแต่ 32.78 %RH ถึง 93.00 %RH มีแนวโน้มความต้านทานที่ลดลงตามลำดับ ในภาพที่ 4.11 ซึ่งแนวโน้มความเป็นเส้นตรงมากที่สุด มีความชันมาก สามารถแยกความแตกต่างความชื้นได้ อย่างชัดเจน อยู่ที่เงื่อนไขสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์แบบไม่เติมสารไทโอกลิเซอรอล และในเงื่อนไขการเติมไทโอกลิเซอรอล 10 ไมโครลิตร แต่มีความชันของเส้นที่น้อยกว่า

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานที่วัดได้ในอุปกรณ์ในความชื้นต่างๆ

ความชื้น (% RH)	ความต้านทาน (กิโลโอห์ม)			
	0.083 โมลาร์ ไม่เติม TG	0.083 โมลาร์ TG 1 ไมโครลิตร	0.083 โมลาร์ TG 10 ไมโครลิตร	0.083 โมลาร์ TG 100 ไมโครลิตร
11.30	1459	4720	1090	3800
23.00	581.9	3470	1460	3480
32.78	216.6	1592	1192	2630
52.89	74.18	623.4	640	844.5
75.29	26.2	257.3	467	420.2
84.34	15.5	189.5	263	373.5
93.00	7.0	130	186.8	192.3
11RH/93RH	208.42	36.30	5.83	19.76

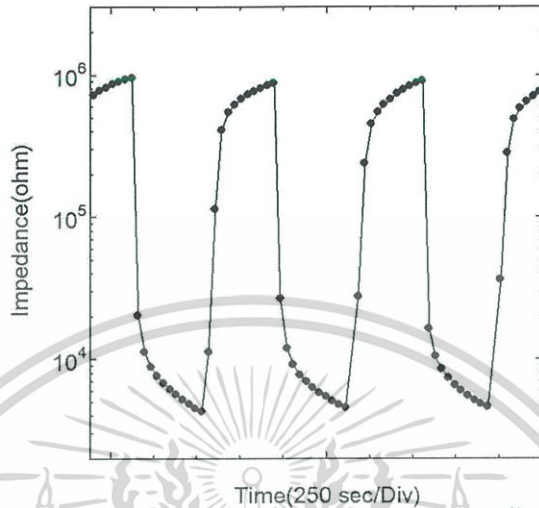


ภาพที่ 4.11 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในความชื้นต่างกัน

#### 4.2 ความสามารถในการทำซ้ำ

ตรวจวัดความสามารถในการตอบสนองการซ้ำซ้ำ(repeativity) เงื่อนไขความเข้มข้นสารตั้งต้นคอปเปอร์อะซิเตท มอนอไฮเดรต 0.083 โมลาร์ ไม่เติมสารไทโอกลิเซอรอล ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีการตอบสนองในทุกช่วงความชื้นได้ดี ได้ผลการวัด ภาพที่ 4.12 ในค่าการใช้งานซ้ำของอุปกรณ์ค่อนข้างคงที่โดยระยะเวลาที่ใช้ในการวัดแต่ละช่วงคือ 250 วินาที และทำการวัดค่าการตอบสนอง ได้ผลการ

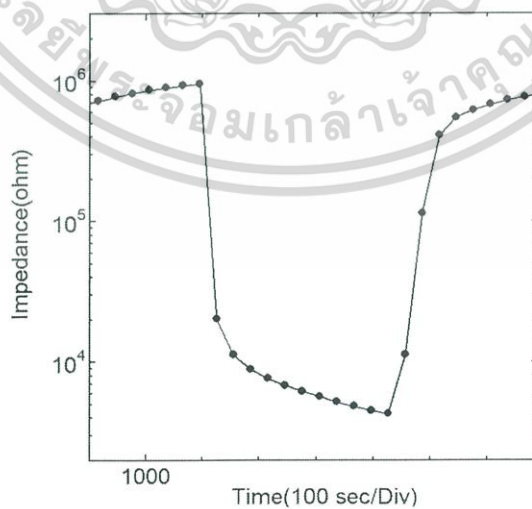
ทดลอง ดังภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ค่อนข้างมีการตอบสนองช้า ค่าความต้านทานที่วัดได้ จะลดลงเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงจุดอิ่มตัว ต้องใช้เวลานานพอสมควร ต้องมีการพัฒนาระบบการวัดหรืออุปกรณ์ตรวจวัดต่อไป



ภาพที่ 4.12 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในการใช้ซ้ำ (repeatability)

#### 4.3 ค่าความไวในการตอบสนองช่วงดูดซับความชื้นและคายความชื้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดและการคาย ภาพที่ 4.13 วัดจากจุดที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงมาก เทียบกับจุดความต้านทานเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลง หรือประมาณที่ตำแหน่ง 80 เปอร์เซ็นต์ ของกราฟ นับจากจุดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาก จะเห็นว่า มีความสามารถในการดูดซับความชื้น (11%RH ไปยัง 93%RH) ได้ดีกว่าช่วงคายความชื้น (93%RH ไปยัง 11%RH) เนื่องจาก ช่วงการดูดซับน้อยกว่าช่วงการคายความชื้น



ภาพที่ 4.13 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในตอบสนองต่อความชื้น (responsivity)

## สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การสังเคราะห์นาโนคอปเปอร์ออกไซด์ สามารถทำได้ด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation method) ซึ่งในกระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์วัสดุในระดับนาโนเมตร เช่น วัสดุ 2D หรือความเป็นแผ่น และ 0D หรือความเป็นอนุภาค จากการวิเคราะห์โครงสร้างผ่านเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่า มีขนาดความเป็นผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 10-30 นาโนเมตร ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดผลึกและโครงสร้างคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น รวมไปถึงปริมาณการเติมสารให้ความเสถียรภาพทางโครงสร้าง ข้อดีของกระบวนการนี้คือ การดำเนินการกระบวนการขั้นตอนไม่ซับซ้อน การลงทุนต่ำ ประหยัดพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องทำในตัวแปรควบคุม อันได้แก่ อัตราการผสมสาร อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความสะอาดเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เวลาแต่ละขั้นตอน

การประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ตรวจวัด คอปเปอร์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นนาโนซีทสามารถเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นได้ดีกว่าคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นอนุภาค แสดงว่าโครงสร้างนาโนซีทเหมาะสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น แต่อย่างไรก็ตามความเป็นนาโนซีทอาจจะไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานด้านอื่นก็ได้ ความเป็นอนุภาคอาจจะเหมาะสมมากกว่า จำเป็นต้องมีการพิจารณาแนวทางการพัฒนา เช่น กระบวนการตรวจวัด เพื่อเลือกโครงสร้างที่เหมาะสม

### 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

5.2.1 ในกระบวนการนี้ เป็นกระบวนการที่เกิดในสถานะสารที่เป็นของเหลว ดังนั้นจะเกิดการเจือปนจากสารอื่นได้ง่าย ทำให้วัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่เป็นแนวโน้มเดียวกัน การตรวจวัดไม่ได้ผลตามต้องการ การแก้ปัญหาคือ ควรใส่ถุงมือในการทำทุกครั้ง และตรวจสอบความสะอาดเครื่องมือก่อนใช้งาน

5.2.2 การเก็บสารที่ได้จากการสังเคราะห์ ความชื้นจะมีผลต่อชิ้นงาน อาจทำให้ชิ้นงานเสื่อมสภาพก่อนการตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ดังนั้น จะต้องมีการเก็บรักษาให้ดี อาจเก็บไว้ในกล่องที่ตัวดูดซับความชื้น ให้มีความสัมผัสกับอากาศภายนอกน้อยที่สุด

5.2.2 ในการวัดระบบการตรวจวัดทางด้านความชื้น อุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าการวัดเปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารระเหยมีอัตราการระเหยที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่เท่ากัน การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดจึงมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น หากจะทำการวัดอุปกรณ์ตรวจวัด ควรทำในครั้งเดียว เพื่อลดปัญหาปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบ

## บรรณานุกรม

- [1] ชีระพงษ์ พวงมะลิ. (2557). “นาโนฟิสิกส์ Nanophysics”. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดบุคเซ็นเตอร์.
- [2] สิริพัทธ์ ประโทนเทพ. (2558). “ควอนตัมและนาโนเทคโนโลยี “. (พิมพ์ครั้งที่ 1).กรุงเทพมหานคร : วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] การดา ว่องไวลิขิต และณัชชา ศรีภูมิวัฒน์, “ การสังเคราะห์ทองแดง (I) ออกไซด์ทรงกลม กลวงขนาดไมโครเมตร”, งานประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต, หน้า 250-258, 2013
- [4] Maqusood ahamed, Hisham A. Alhadlq. M.A. Majeed khan, Ponmurugan Karuppiah, and Naif A. Al-Dhabi, “Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Activity of Copper Oxide Nanoparticles”, *Hindawi publishing coporation journal of nanomaterials*, Vol, 2014. Article id 637848. Page 1 – 4.
- [5] Xuyang Li, “Synthesis of copper oxide and zinc oxide nanowires by thermal oxidation for photovoltaic devices “. *Nagoya Institute of Technology*, 2014.
- [6] Mohammed Suleiman, Muath Mousa, Amjad Hussein, Belkheir Hammouti, Taibi B. Hadda, and Ismail Warad, “copper(II) oxide Nanostructures:Synthesis, Characterizations and their application review”, *J. Mater. Environ*, vol 4(5), 2013, page 792-799.
- [7] Anita Sagadevan Ethiraj and Dae joon Kang, “Synthesis and characterization of CuO nanowires by a simple wet chemical method”, *Nanoscale Research*, Vol 7:70, 2012, page 2-5,
- [8] G philipic and U Vcelbar, “copper oxide nanowire : a review of growth”, *IOP publishing nanotechnology*, Vol 23, 2012, page 1-6.
- [9] H.T.Hsueh, T.J. Hsueh, S.J. Chang, F.Y. Tsai, W.Y. Weng, C.L. Hsu, and B.T.Dai, “CuO nanowire-based humidity sensors prepare on glassubstrate”, *ScienceDirect*, Vol.516, 2011, page 906-911.
- [10] Sheng-Bo Wang, Chin-Hung Hsiao, Shang-Chao Hung, Shoou-Jinn Chang, Shen-Jone Young, Bo-Chin wang, San-Lein Wu, Bohr-Ran Huang and Hsieh-Chang Han, “ One step Fabrication of Low Noise CuO Nanowire-Bridge Gas sensor”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol 8, 2013, page 3472-3482.
- [11] Kailash R. Nemade and Sandeep A. Waghuley, “Optical and gassensing properties of CuO Nanoparticles grown by spray pyrolysis of cupric nitrate solution”, *International journal of materials science and engineering*, vol 2. No1, 2014, page 63-66.

- [12] ยูวัฒน์ บุญหนัก. (2554). “การปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น”. กรุงเทพมหานคร :วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] Yu Liu, Wei Wang, Lin Gu, Yewu Wang, Yulong Ying, Yiyin Mao, Luwei Sun, and Xinsheng Peng, “Flexible CuO Nanosheets/Reduced-Graphene Oxide Composite Paper: Binder-Free Anode for High-Performance Lithium-Ion Batteries”, **Applied material and interface**, vol 5, 2013, page 9850-9855.
- [14] Nantana Kachaban and Thongthai Witoon, “Synthesis of CuO-ZnO-ZrO<sub>2</sub> catalysts for methanol production from CO<sub>2</sub> hydrogenation” Bangkok : faculty of engineering kasetsart university.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายฐิติวัฒน์ มาบุญช่วย
วัน-เดือน-ปีเกิด	22 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
ที่อยู่ปัจจุบัน	463/61 หมู่ 8 หมู่บ้านฉัตรแก้ว ต.สมอแข อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย จาก โรงเรียนจ่านกร้อง อ.เมือง จ.พิษณุโลก ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรม วัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

