

โครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และ แม่เหล็ก ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์  
ออกไซด์เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

โดย  
สุนัน หนองเหล็ก

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2559

Structural optical and magnetic properties of Fe/Pr  
co-doped CuO nanoparticles

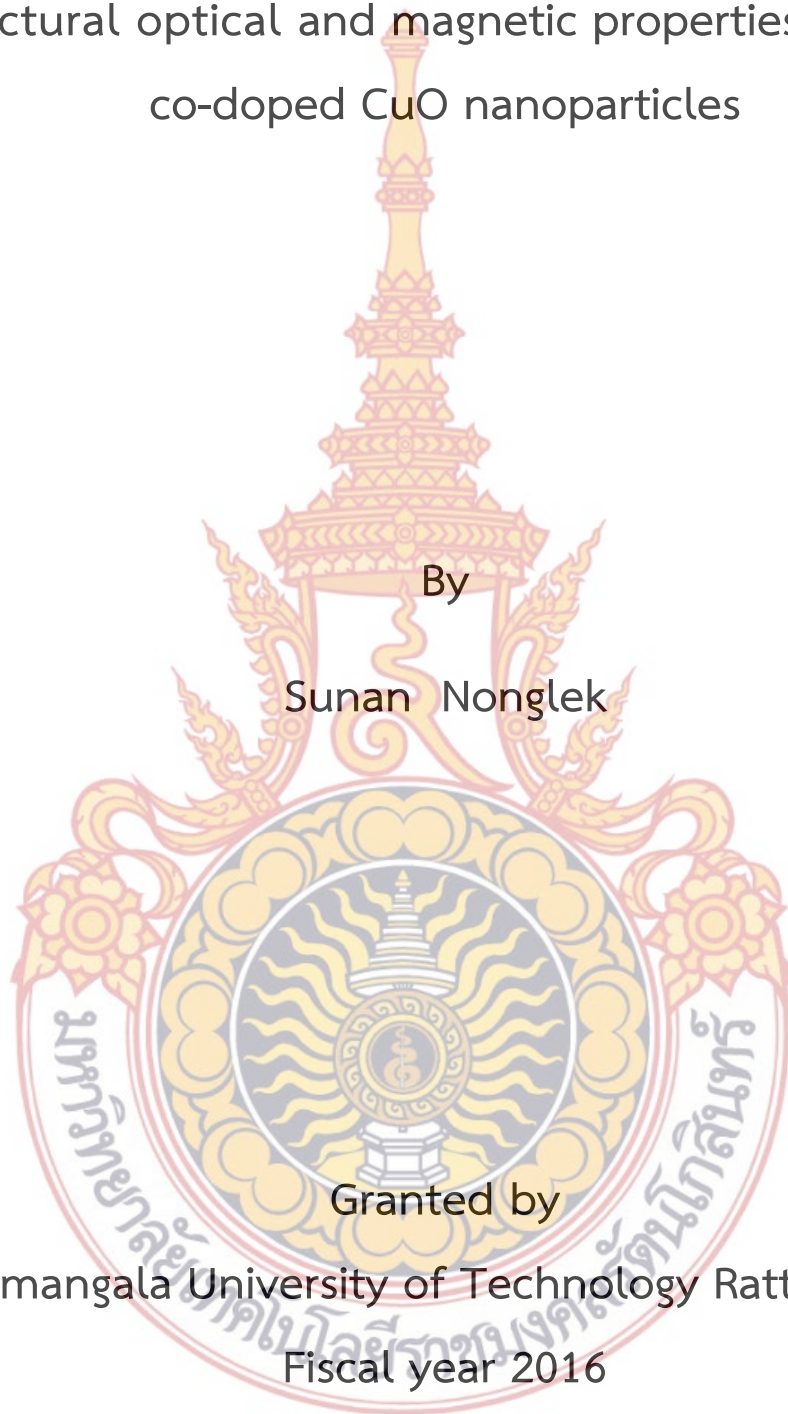
By

Sunan Nonglek

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2016



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ร่วมวิจัยทุกท่านที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย สาขาวิชาไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้เวลาส่วนหนึ่งกับผู้วิจัยในการทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ณ. สถานที่ต่างๆ และขอขอบคุณ ผศ. ดร. ธาณินทร์ ปัจจุโส อาจารย์ประจำสาขาวิชาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำในเรื่องการวิเคราะห์ผลงานวิจัย และการส่งผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีให้การสนับสนุนด้านงบประมาณการวิจัย สาขาวิชาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ พื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำการทดลองและการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้การช่วยเหลือในการทดลองงานวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนงานวิจัยที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



สุนัน หนองเหล็ก และคณะ  
กันยายน 2559

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : Kno 004/2559

ชื่อโครงการ : โครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และ แม่เหล็ก ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

ชื่อนักวิจัย : นายสุนัน หนองเหล็ก และ ผศ.ดนัย สุชีพจน์

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ผงอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เจือร่วมระหว่างโลหะทรานซิชัน เหล็ก (Fe) และพราซีโอดีเมียม (Pr) เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของผงอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค XRD และ SEM ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (VSM) และเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis) ผลการศึกษาด้วย XRD พบว่าผงอนุภาคนาโน CuO มีโครงสร้างแบบ มอนอคลินิก และพบเฟสปลอมปน  $Pr_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  เมื่อปริมาณสารเจือ Pr และ Fe เพิ่มขึ้น ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM พบว่า อนุภาคมีลักษณะเป็นแท่งนาโน (nanorod) เมื่อปริมาณสารเจือร่วม Pr ลดลง ส่วนสมบัติทางแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 27 °C พบว่าอนุภาคนาโน CuO ที่เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetic) และสมบัติทางแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราส่วนของสารเจือร่วม Fe/Pr เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization,  $M_s$ ) เท่ากับ 0.0045 emu/g เมื่อ อัตราส่วนของสารเจือร่วม Fe/Pr เท่ากับ 0.6/0.2 ส่วนผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงพบว่าอนุภาคนาโน CuO ที่เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.40 – 3.48 eV

คำสำคัญ : คอปเปอร์ออกไซด์, สมบัติแม่เหล็ก, สมบัติทางแสง

E-mail Address : sunan.non@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2558 - 30 กันยายน 2559

## Abstract

**Code of project** : Inno 004/2559  
**Project name** : Structural optical and magnetic properties of Fe/Pr co-doped CuO nanoparticles  
**Researcher name** : Mr. Sunun Nonglek and Asst. Prof. Danai Sukheepoj

In this research, Fe/Pr co-doped CuO nanoparticles were successfully synthesized by the hydrothermal method at 200 °C for 10 h. The structure and morphology of the as-prepared products were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Magnetic properties were measured at room temperature using a vibrating sample magnetometer (VSM). The optical properties were measured in the absorption mode using UV-vis spectrophotometer. The XRD results indicate that all as-prepared Fe/Pr co-doped CuO nanoparticles are monoclinic phase with the impurity phase of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. SEM micrographs reveal a nanorod is observed and decrease with Pr content. The magnetic properties measurements at 27 °C reveal that Fe/Pr co-doped CuO nanoparticles exhibit a ferromagnetic behavior with the saturation magnetization (M<sub>s</sub>) of 0.0045 emu/g for Fe/Pr ratio of 0.6/0.2. The determined optical band gaps of the Fe/Pr co-doped CuO nanorods are found to be in the range of 3.40 – 3.48 eV.

**Keyword:** CuO, magnetic properties, optical properties

---

**E-mail Address** : sunan.non@rmutr.ac.th

**Period of Project** : 1 October 2015 - 30 September 2016

## สารบัญ

|  | หน้า     |
|--|----------|
| กิตติกรรมประกาศ  | ก        |
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ข        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ค        |
| สารบัญ   | ง        |
| สารบัญตาราง  | ฉ        |
| สารบัญภาพ  | ช        |
| <b>บทที่ 1</b>   |          |
| <b>บทนำ</b>  | <b>1</b> |
| 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                                | 1        |
| 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย                                   | 2        |
| 3. ขอบเขตโครงการวิจัย  | 2        |
| 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                     | 2        |
| <b>บทที่ 2</b>   |          |
| <b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                             | <b>4</b> |
| 1. สมบัติทางกายภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)                       | 4        |
| 2. สมบัติทางกายภาพของ Fe   | 5        |
| 3. สมบัติทางกายภาพของ Pr   | 5        |
| 4. สมบัติแม่เหล็กของวัสดุ  | 6        |
| 5. คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ                                | 10       |
| 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง   | 12       |
| 7. แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งาน                                   | 13       |
| 8. การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)                                  | 14       |
| 9. เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) | 16       |
| 10. เทคนิคการดูดกลืนแสงของอนุภาค (UV-Visible spectroscopy)       | 19       |
| 11. เทคนิค Vibrating Sample Magnetometer (VSM)                   | 19       |

| สารบัญ (ต่อ) |   | หน้า                             |
|--------------|---|----------------------------------|
| บทที่ 3      | <b>วิธีการดำเนินการวิจัย</b><br>1. สารเคมีและอุปกรณ์<br>2. การสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr  | 21<br>21<br>22                   |
| บทที่ 4      | <b>ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล</b><br>1. ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานโดยเทคนิค XRD<br>2. การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยเทคนิค SEM<br>3. การศึกษาสมบัติแม่เหล็ก โดยเทคนิค VSM<br>4. การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-Vis   | 24<br>24<br>31<br>35<br>38       |
| บทที่ 5      | <b>สรุป ผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ</b><br>1. การศึกษาเฟสและโครงสร้างของผงอนุภาคนาโน CuO และ Cu <sub>(1-(x+y))</sub> Fe <sub>x</sub> Pr <sub>y</sub> O โดยเทคนิค XRD<br>2. การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน CuO และ Cu <sub>(1-(x+y))</sub> Tm <sub>x</sub> Pr <sub>y</sub> O โดยเทคนิค SEM<br>3. การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคนาโน CuO และ Cu <sub>(1-(x+y))</sub> Fe <sub>x</sub> Pr <sub>y</sub> O โดยเทคนิค VSM<br>4. การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน CuO และ Cu <sub>(1-(x+y))</sub> Fe <sub>x</sub> Pr <sub>y</sub> O โดยเทคนิค UV-Vis<br>5. ข้อเสนอแนะ | 42<br>42<br>43<br>43<br>43<br>44 |
|              | บรรณานุกรม  | 45                               |
|              | ประวัติผู้วิจัย   | 48                               |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | แสดงสมบัติทางกายภาพของ CuO   | 5    |
| 2.2      | แสดงสมบัติทางกายภาพของ Fe  | 5    |
| 2.3      | แสดงสมบัติทางกายภาพของ Pr  | 6    |
| 3.1      | สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr   | 21   |
| 3.2      | แสดงสัดส่วนโมลของสารเจือที่ใช้สังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ $Cu_{(1-(x+y))}Fe_xPr_yO$   | 22   |
| 4.1      | แสดงขนาดผลึกและค่าคงที่แลทธิซของผงอนุภาคนาโน CuO, $Cu_{0.92}Fe_{0.08}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.06}Pr_{0.02}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.04}Pr_{0.04}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.02}Pr_{0.06}O$ และ $Cu_{0.92}Pr_{0.08}O$ เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C โดยใช้ เวลา 10 ชั่วโมง | 30   |
| 4.2      | แสดงค่า Saturation magnetization ( $M_s$ ), Remanence flux density ( $B_r$ ) และค่า Coercivity ( $H_c$ ) ของผงอนุภาคนาโน $Cu_{(1-(x+y))}Fe_xPr_yO$   | 37   |
| 4.3      | ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโน ของผงอนุภาคนาโน $Cu_{0.92}Fe_{0.08}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.07}Pr_{0.01}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.06}Pr_{0.02}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.04}Pr_{0.04}O$ , $Cu_{0.92}Fe_{0.02}Pr_{0.06}O$ และ $Cu_{0.92}Pr_{0.08}O$ เปรียบเทียบกับผงอนุภาคนาโน CuO             | 41   |



## สารบัญภาพ

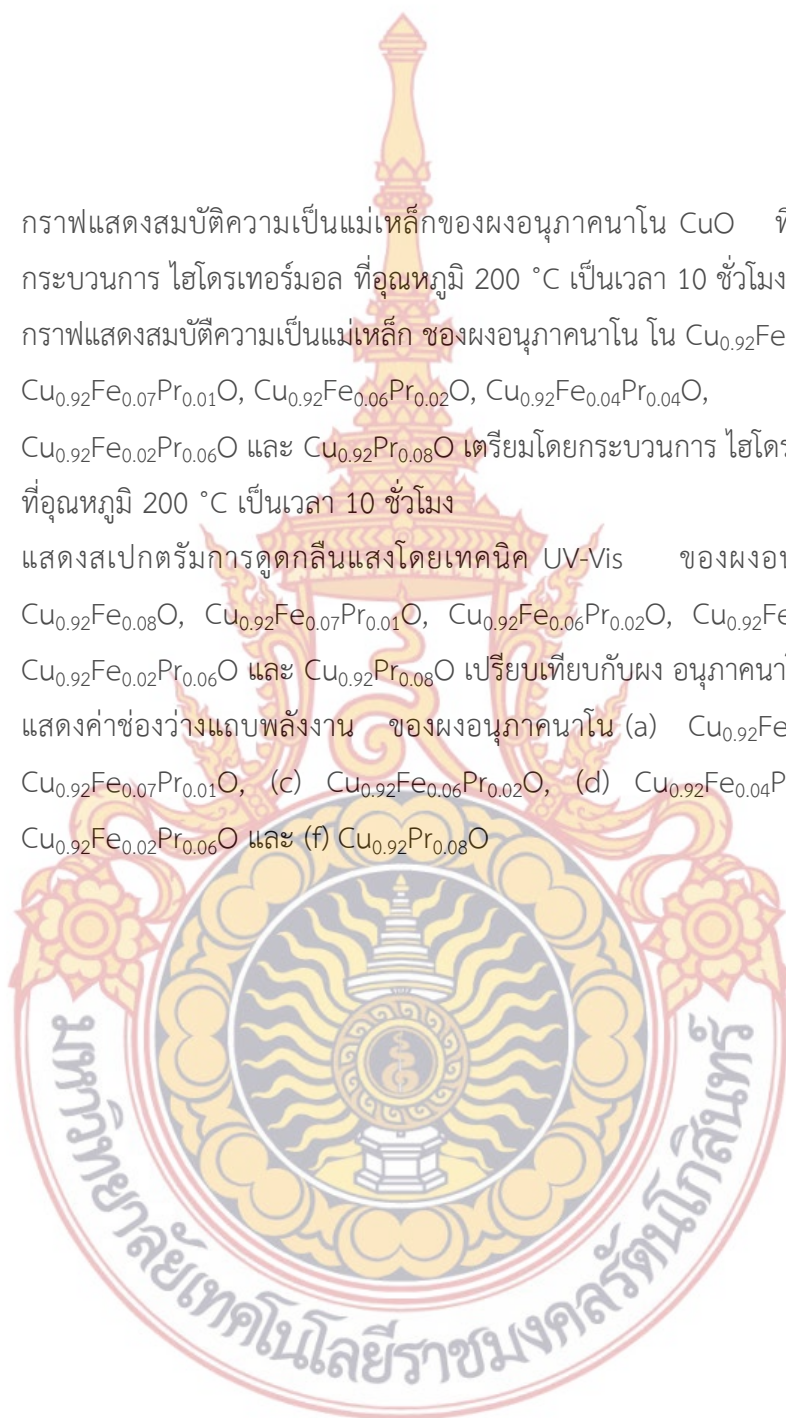
| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.1    | โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) อะตอมสีแดง คือ O และอะตอมสีส้ม คือ Cu [4] มีสมบัติทางกายภาพดังสรุปในตารางที่ 2.1  | 4    |
| 2.2    | แสดงโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจรรอบนิวเคลียส (orbiting) (ข) การสปินของอิเล็กตรอน [8]  | 7    |
| 2.3    | แสดงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (แทนด้วยลูกศร) ในวัสดุแบบไดอะแมกเนติก H คือสนามแม่เหล็กภายนอก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (H=0) วัสดุไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก (H ≠ 0) วัสดุจะถูกเหนี่ยวนำให้มี โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิขึ้น ทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก [8]                    | 8    |
| 2.4    | แสดงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (แทนด้วยลูกศร) ในวัสดุแบบพาราแมกเนติก H คือสนามแม่เหล็กภายนอก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (H=0) วัสดุไม่มีโมเมนต์ แม่เหล็กสุทธิแต่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก (H≠0) โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุถูกเหนี่ยวนำให้มี ทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก [8] | 9    |
| 2.5    | แสดงโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรถึงแม้ไม่ได้ อยู่ในสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีค่าแมกนีไทเซชันสูงมาก [7]  | 9    |
| 2.6    | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ [8]  | 10   |
| 2.7    | การดูคลื่นมูลฐานของสารกึ่งตัวนำแบบ direct – gap [10]  | 11   |
| 2.8    | ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส (gas sensor) ที่ได้จากสาร CuO [13]   | 14   |
| 2.9    | แสดงกรวยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากสารตัวอย่างชนิดผลึกผง [14]   | 15   |
| 2.10   | เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) [15]   | 15   |
| 2.11   | (a) แสดงส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM (b) แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ [18] ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM มีดังนี้   | 17   |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.12   | แสดงภาพถ่ายเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ยี่ห้อ Lake Shore รุ่น 7403 [20]   | 20   |
| 3.1    | แผนภาพแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr   | 22   |
| 3.2    | แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr  | 23   |
| 4.1    | แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโน CuO เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 6, 8 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ   | 25   |
| 4.2    | แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโน CuO เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ใช้เวลาในการเท่ากับ 10 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 160 °C, 180 °C และ 200 °C ตามลำดับ  | 26   |
| 4.3    | แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) จาก มุม 2θ เท่ากับ 20-70 องศาของผงอนุภาคนาโน CuO, Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.08</sub> O, Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.06</sub> Pr <sub>0.02</sub> O, Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.04</sub> O, Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.02</sub> Pr <sub>0.06</sub> O และ Cu <sub>0.92</sub> Pr <sub>0.08</sub> O เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับพีคหลักของผงอนุภาคนาโน CuO | 27   |
| 4.4    | ภาพถ่าย SEM ของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยอุณหภูมิ 200 °C และเวลา 10 ชั่วโมงตามลำดับ  | 31   |
| 4.5    | แสดงผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุหลัก Cu, Fe และ Pr เมื่อศึกษาด้วยเทคนิค EDS  | 32   |
| 4.6    | ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคนาโน (a) Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.08</sub> O, (b) Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.07</sub> Pr <sub>0.01</sub> O, (c) Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.06</sub> Pr <sub>0.02</sub> O, (d) Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.04</sub> Pr <sub>0.04</sub> O, (e) Cu <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.02</sub> Pr <sub>0.06</sub> O และ (f) Cu <sub>0.92</sub> Pr <sub>0.08</sub> O   | 34   |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.7    | กราฟแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง   | 36   |
| 4.8    | กราฟแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ของผงอนุภาคนาโน $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ และ $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง | 37   |
| 4.9    | แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-Vis ของผงอนุภาคนาโน $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ , $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ และ $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ เปรียบเทียบกับผง อนุภาคนาโน CuO                             | 39   |
| 4.10   | แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของผงอนุภาคนาโน (a) $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ , (b) $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ , (c) $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ , (d) $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ , (e) $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ และ (f) $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$   | 40   |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนเป็นหนึ่งในหัวข้อที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุที่โครงสร้างระดับนาโนเมตรได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีการนำวัสดุนาโนหลากหลายชนิดมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์และเครื่องมือเพื่อใช้งานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งโดยปกติแล้ว CuO เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductors) ชนิดพี (p-type) ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบมอนอคลินิก (monoclinic) แต่เมื่อสังเคราะห์ให้มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้นเพราะทำให้คุณสมบัติในด้านต่างๆ แตกต่างออกไปจาก CuO เมื่ออยู่ในรูปที่เป็นก้อนสาร (bulk) ตัวอย่างเช่น แลပ်พลังงาน (band gap) ของ CuO อนุภาคนาโนมีค่า 2.43 eV ซึ่งมากกว่าแลပ်พลังงานของ CuO ที่เป็นก้อนสาร ซึ่งมีค่าแลပ်พลังงาน 1.85 eV [1] จึงสามารถนำ CuO อนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น microwave, photovoltaic และ อุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส (gass sensor device) และจากรายงานการวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าอนุภาคนาโน CuO ที่เจือด้วยสารแม่เหล็กที่เรียกว่า ออกไซด์แม่เหล็กเจือจาง (Diluted Magnetic Oxide, DMO) หรือ วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Materials) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านสปินทรอนิกส์ (Spintronic) และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านของแม่เหล็กเหลว (Ferofluids) และการบันทึกข้อมูลระบบแม่เหล็ก (Magnetic Recording) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วนี้ยังมีการนำไปใช้งานในด้านชีวการแพทย์ (Biomedical Application) เป็นต้น เมื่อไม่นานมานี้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ให้ความสนใจศึกษา สมบัติทางแสงและสมบัติแม่เหล็กในอนุภาคนาโน CuO ด้วยวิธีการเตรียมที่ต่างกันไป [1-2] รวมทั้งการเจือโลหะทรานซิชัน Ni [3], Fe [4-5], Zn[6] ในวัสดุผงนาโน CuO ส่วนธาตุหมู่แรเอิร์ทนั้นนักวิจัยสนใจศึกษาสมบัติทางแสง และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเจือเข้าไปใน ZnO [7] ดังนั้นการเตรียมวัสดุ CuO ที่มีขนาดนาโนเมตร และมีสมบัติทางแสงและสมบัติแม่เหล็กที่ดีและเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ อีกทั้งรายงานการวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาผลของการเจือร่วม (co-doped) ระหว่างโลหะทรานซิชัน (Fe) และธาตุหมู่แรเอิร์ท (Pr) ต่อสมบัติทางแสงและแม่เหล็กในผงอนุภาคนาโน CuO

โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อเตรียมผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-rays diffraction, XRD), ศึกษาขนาดและยืนยันโครงสร้างของผงวัสดุที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM), ศึกษาภาพถ่ายเชิงลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) และเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer, UV-Vis)

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เตรียมผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล
- 2.2 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานด้วยเทคนิค XRD และ SEM-EDX
- 2.3 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS
- 2.4 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM

## 3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 3.1 เตรียมผงอนุภาคนาโน CuO บริสุทธิ์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 160, 180 และ  $200^\circ\text{C}$  และเวลา 6, 8, และ 10 ชั่วโมง
- 3.2 เตรียมผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  [ $x+y=0.8$ ] โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง ตามเงื่อนไขดังนี้
  - เตรียมผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ( $x=0.00, 0.02, 0.04, 0.06$  และ  $0.08$  )
- 3.3 ศึกษาโครงสร้าง พื้นฐานวิทยาและขนาดอนุภาคของผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{CuO}$  เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr ด้วยเทคนิค XRD, TEM และ SEM
- 3.4 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก ของผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{CuO}$  เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr โดยเทคนิค VSM
- 3.5 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง ของผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{CuO}$  เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr โดยเทคนิค UV-VIS

## 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 สามารถเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะ โครงสร้างของ CuO และ  $\text{CuO}$  เจือร่วมระหว่าง Fe/Pr โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล
- 4.2 สามารถอธิบายอิทธิพลของ Fe, Fe/Pr และ Pr ต่อโครงสร้าง สมบัติแม่เหล็กและสมบัติเชิงแสงได้

4.3 ได้ข้อมูลพื้นฐานในสำหรับผลของสารเจือ ร่วมระหว่าง Fe/Pr ในผงวัสดุนาโน CuO เพื่อนำไปประยุกต์และการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ CuO

4.4 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปเสนอในที่ประชุมวิชาการ หรือตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานลงในวารสารทางวิชาการระดับชาติ ตลอดจนการนำไปเป็นกรณีศึกษาสำหรับอนุภาคนาโน CuO โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล รวมทั้งใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเตรียมวัสดุด้วยสารละลายโพลีเมอร์ไพโรไลซิส



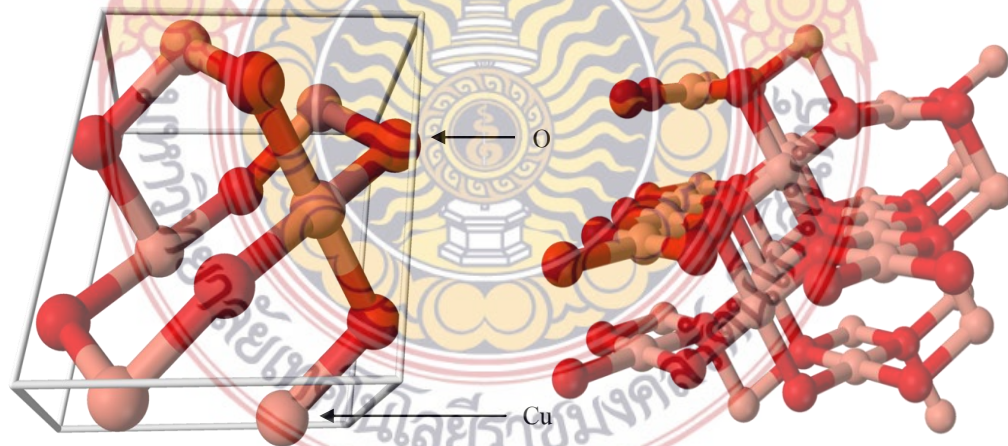
## บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทองแดงเป็นโลหะตัวนำราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายจึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น สายไฟฟ้า แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ทองแดงเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่โลหะทรานซิชัน ที่มีเลขอะตอม 29 มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่าทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางวิทยาศาสตร์คือ Cu ทองแดงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเป็นสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ได้สองเฟส คือ CuO และ Cu<sub>2</sub>O [3] ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาคุณสมบัติในด้านต่างๆของ CuO โดยเฉพาะ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของผงเป็นสีดำ มีโครงสร้างผลึกแบบมอนอคลินิก (monoclinic) มีจุดหลอมเหลวที่ 1336 องศาเซลเซียส จุดเดือดมากกว่า 1800 องศาเซลเซียส [4]

### 1. สมบัติทางกายภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

CuO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีโครงสร้างแบบ มอนอคลินิก โดย Cu เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ที่มีประจุเท่ากับ +2 หรือ +3 ดังแสดงในรูปที่ 2.1

โดยอะตอม Cu แทนด้วยตำแหน่งอะตอมสี่สีส้มจะอยู่ที่แกนกลางล้อมรอบด้วยแขนทั้งสี่ข้างของอะตอม O ซึ่งแทนด้วยตำแหน่งอะตอมสีแดง และด้านทั้ง 3 ด้านของโครงสร้างยาวไม่เท่ากัน ( $a \neq b \neq c$ ) และมุม  $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$  สมบัติทางกายภาพอื่นๆของ CuO สรุปไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) อะตอมสีแดง คือ O และอะตอมสีส้ม คือ Cu [4]  
มีสมบัติทางกายภาพดังสรุปในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของ CuO

| สมบัติพื้นฐาน                  | ปริมาณ                 |
|--------------------------------|------------------------|
| น้ำหนักโมเลกุล                 | 79.545 g/mol           |
| สัดส่วนน้ำหนักของอะตอมทองแดง   | 79.89%                 |
| สัดส่วนน้ำหนักของอะตอมออกซิเจน | 20.11%                 |
| ความหนาแน่น                    | 6310 kg/m <sup>3</sup> |
| จุดหลอมเหลว                    | 1336°C                 |
| จุดเดือด                       | มากกว่า 1800°C         |
| ช่องว่างแถบพลังงาน             | 1.85 eV                |
| โครงสร้าง                      | Monoclinic             |
| Enthalpy of fusion             | 52.30 kJ/mol           |
| ความเป็นแม่เหล็ก               | antiferromagnetic      |

## 2. สมบัติทางกายภาพของ Fe

เหล็ก (Iron, Fe) เป็นโลหะสีเงินสีขาวหรือสีเทาเป็นเงา ในสภาพปกติจะมีโครงสร้างผลึกแบบ body - centered cubic แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบ face-centered cubic เหล็กเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน มีเลขอะตอมเท่ากับ 26 มีประจุเท่ากับ +2 หรือ +3 โดยสมบัติทางกายภาพของ Fe สรุปไว้ในตารางที่ 2.3 [6]

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของ Fe

| สมบัติพื้นฐาน    | ปริมาณ                 |
|------------------|------------------------|
| น้ำหนักโมเลกุล   | 55.845 g/mol           |
| ความหนาแน่น      | 7860 kg/m <sup>3</sup> |
| จุดหลอมเหลว      | 1538°C                 |
| จุดเดือด         | 2861°C                 |
| โครงสร้าง        | body - centered cubic  |
| ความเป็นแม่เหล็ก | ferromagnetic          |

## 3. สมบัติทางกายภาพของ Pr

พราซีโอดิเมียม (Praseodymium, Pr) เป็นธาตุโลหะสีเงินและเกิดสนิมสารประกอบออกไซด์



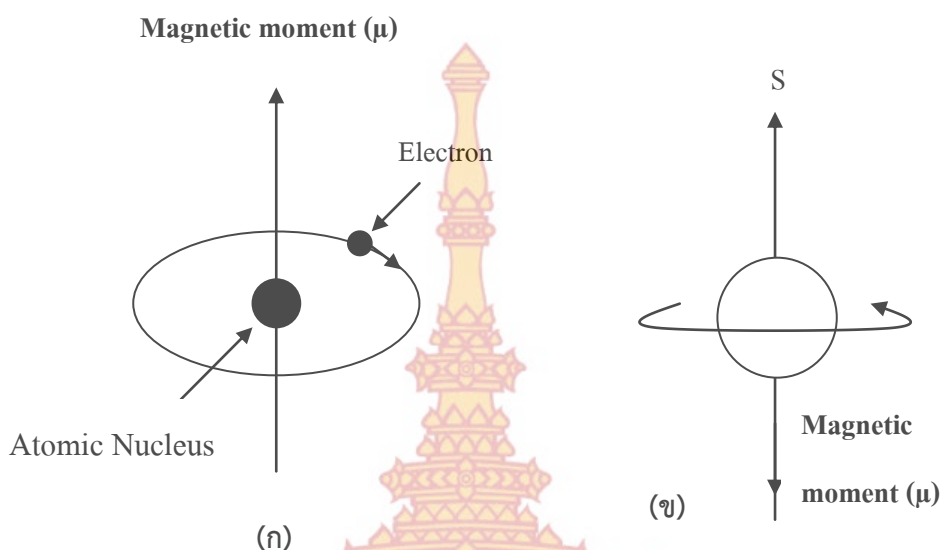
สี่เหลี่ยมเมื่อสัมผัสอากาศ Pr มีเลขอะตอม 59 มีโครงสร้างแบบ hexagonal อยู่ในกลุ่มแลนทาไนด์ (lanthanide group) มีประจุเท่ากับ +3 โดยสมบัติทางกายภาพของ Pr สรุปไว้ในตารางที่ 2.3 [7]

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของ Pr

| สมบัติพื้นฐาน    | ปริมาณ                 |
|------------------|------------------------|
| น้ำหนักโมเลกุล   | 140.90765 g/mol        |
| ความหนาแน่น      | 6770 kg/m <sup>3</sup> |
| จุดหลอมเหลว      | 935°C                  |
| จุดเดือด         | 3520°C                 |
| โครงสร้าง        | hexagonal              |
| ความเป็นแม่เหล็ก | paramagnetic           |

#### 4. สมบัติแม่เหล็กของวัสดุ

สมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ เป็นผลสืบเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนแต่ละตัวในวัสดุนั้น โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดสองแหล่งด้วยกันคือ แหล่งที่มาจากการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนและการหมุนรอบตัวเองระหว่างโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนในอะตอม การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสเทียบได้กับกระแสไฟฟ้าไหลวนเป็นวงเล็กๆทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กมากและมีโมเมนต์แม่เหล็กตลอดแนวการหมุน โมเมนต์แม่เหล็ก ( $\mu$ ) เป็นปริมาณทางกายภาพที่วัดได้มีขนาดเท่ากับกระแส (I) คูณกับพื้นที่ของวงจรรปิด (A) นั่นคือ  $\mu = IA$  มีหน่วยในระบบ SI เป็น A.m<sup>2</sup> และมีทิศทางกับระนาบของการโคจร ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) นอกจากนี้อิเล็กตรอนแต่ละตัวยังมีการสปิน (spin) ซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการสปินจะมีทิศทางทางได้เพียง 2 ทิศทางคือ ทิศขึ้นหรือทิศลงซึ่งจะขนานหรือตรงข้ามกับสปินเท่านั้น ดังนั้นอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมจึงอาจถือเสมือนได้ว่าเป็นแม่เหล็กแท่งเล็กๆที่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวร อันเกิดจากการโคจรและการสปินของอิเล็กตรอน [8]



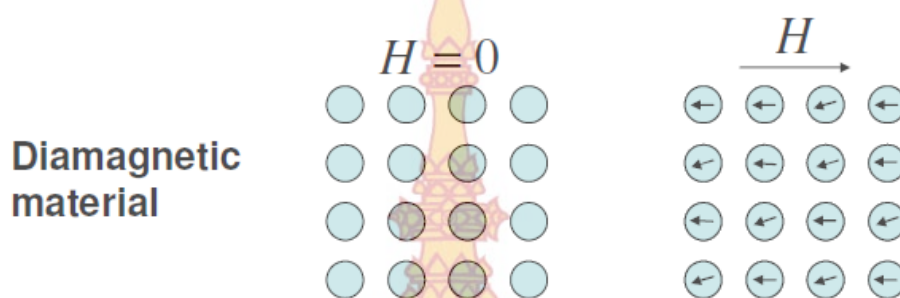
รูปที่ 2.2 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจรรอบนิวเคลียส (orbiting) (ข) การสปีนของอิเล็กตรอน [8]

โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนในอะตอมอาจมีทิศทางในลักษณะเสริมกันหรือหักล้างกันได้ เช่น โมเมนต์จากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งซึ่งให้เวกเตอร์ในทิศขึ้น จะหักล้างกับโมเมนต์ที่หมุนรอบตัวเองในอีกทิศที่ตรงข้ามกันซึ่งมีขนาดโมเมนต์เท่ากันแต่ให้เวกเตอร์ในทิศลง ค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของอะตอมหนึ่งๆ เท่ากับผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยรวมโมเมนต์ที่เกิดจากการโคจรรอบนิวเคลียสและการสปีนของอิเล็กตรอนที่บรรจุหรืออยู่ที่สถานะต่างๆในชั้น (shell) หรือชั้นย่อย (subshell) ของอะตอมเมื่อคิดผลรวมโมเมนต์ ( $\mu$  และ  $s$ ) ของอิเล็กตรอนทุกตัวจึงทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนที่จับคู่กัน (electron pair) หักล้างกันเองหมดเป็นคู่ๆ ทั้งโมเมนต์จากการโคจรและการสปีน ดังนั้นวัสดุที่อะตอมมีการบรรจุอิเล็กตรอนเต็มชั้นจึงไม่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กอย่างถาวรได้ วัสดุกลุ่มนี้ได้แก่ พวกก๊าซเฉื่อย รวมทั้งวัสดุไอออนิก สภาพความเป็นแม่เหล็กหรือการตอบสนองของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุต่อสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายแบบ คือ ไดอา พารา และเฟอร์โร ตลอดจนแบบแอนติเฟอร์โร และเฟอร์ริ ซึ่งอาจจะเป็นประเภทย่อยของเฟอร์โร วัสดุทุกชนิดจะแสดงความเป็นแม่เหล็กอย่างน้อยที่สุดอย่างใดอย่างหนึ่งในบรรดาที่กล่าวมานี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการตอบสนองของไดโพลแม่เหล็กของอะตอมของวัสดุนั้นที่มีต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำ

#### 4.1 ความเป็นแม่เหล็กแบบไดอา (Diamagnetism)

แม่เหล็กแบบไดอาคือสภาพความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ สามารถพบได้ในวัสดุทุกประเภท สภาพความเป็นแม่เหล็กประเภทนี้เป็นแบบไม่ถาวร นั่นคือจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก

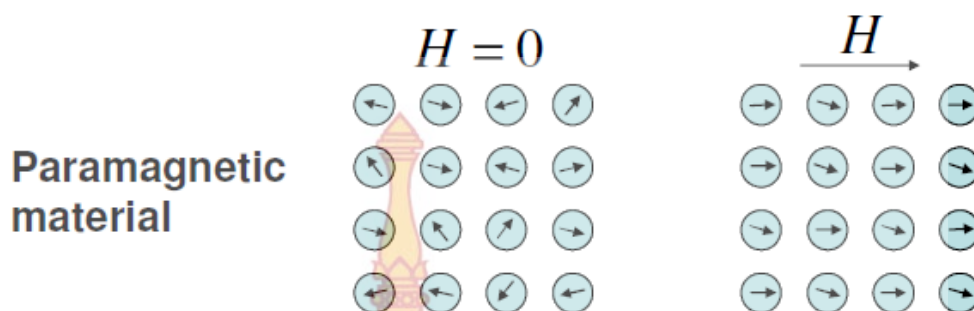
เท่านั้น แม่เหล็กแบบไดอาเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการโคจรของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก โดยทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ค่าการซึมซับสภาพความเป็นแม่เหล็ก (*magnetic susceptibility;  $\chi_m$* ) สำหรับวัสดุแม่เหล็กแบบไดอาจะมีค่าเท่ากับ  $10^{-5}$  [9]



รูปที่ 2.3 แสดงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (แทนด้วยลูกศร) ในวัสดุแบบไดอาแมกเนติก  $H$  คือสนามแม่เหล็กภายนอก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H=0$ ) วัสดุไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H \neq 0$ ) วัสดุจะถูกเหนี่ยวนำให้มี โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิขึ้น ทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก [8]

#### 4.2 ความเป็นแม่เหล็กแบบพารา (Paramagnetism)

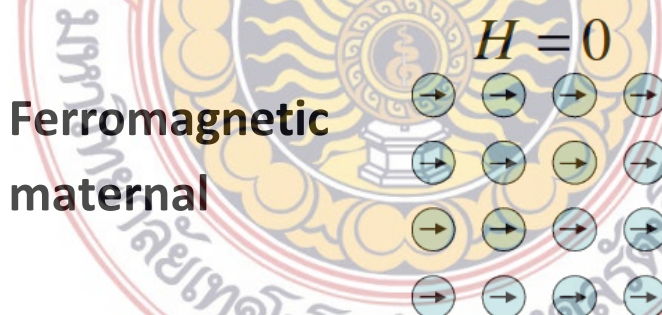
แม่เหล็กแบบพารา คือสภาพความเป็นแม่เหล็กในวัสดุที่โมเมนต์แม่เหล็กจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป โมเมนต์แม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังแสดงในภาพที่ 2.4 ค่าการซึมซับสภาพความเป็นแม่เหล็ก (*magnetic susceptibility;  $\chi_m$* ) สำหรับวัสดุแม่เหล็กแบบพาราจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $10^{-5}$ - $10^{-2}$  เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการจัดวางตัวเป็นระเบียบจะลดลง เป็นผลทำให้สภาวะแม่เหล็กแบบพาราลดลง วัสดุที่แสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบพาราจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุแตรนซีซันหรือธาตุแรเอิร์ท (rare earth) บางชนิด ที่อิเล็กตรอนภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่มีคู่ บรรจุอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นใน ด้วยเหตุนี้ธาตุเหล่านี้มักจะก่อให้เกิดผลของแม่เหล็กแบบพาราอย่างแรงและในบางครั้งอาจจะแสดงสภาวะแม่เหล็กได้แรงเช่นเดียวกับวัสดุจำพวกเฟอร์โร (ferromagnetic) [9]



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (แทนด้วยลูกศร) ในวัสดุแบบพาราแมกเนติก  $H$  คือ สนามแม่เหล็กภายนอก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H=0$ ) วัสดุมีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธีแต่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H \neq 0$ ) โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุถูกเหนี่ยวนำให้มี ทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก [8]

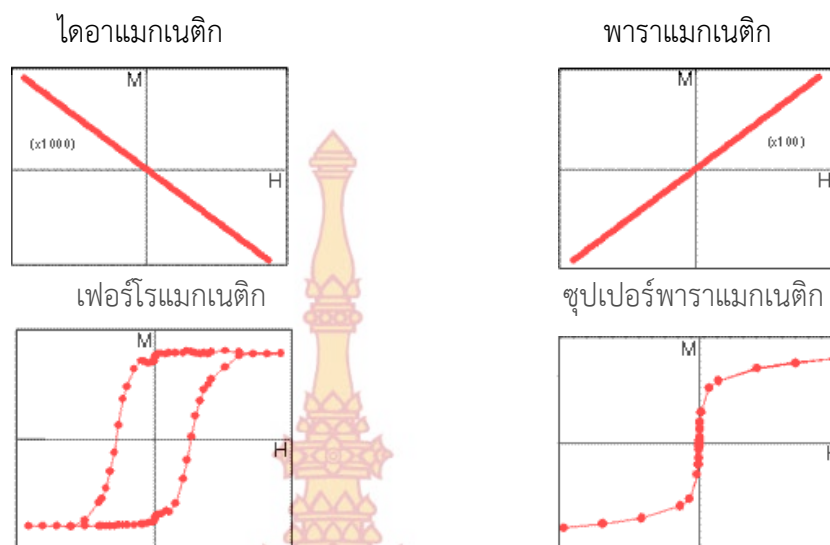
#### 4.3 ความเป็นแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetism)

สภาวะแม่เหล็กแบบไดอาและพาราของวัสดุตั้งที่กล่าวมาในข้างต้น จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้เมื่อวางวัสดุไว้ในสนามแม่เหล็กภายนอกและวัสดุจะยังคงสภาวะแม่เหล็กนั้นได้ตราบเท่าที่สนามแม่เหล็กภายนอกนั้นยังคงอยู่ แต่สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรเป็นสภาวะแม่เหล็กที่คงอยู่ได้ แม้ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีค่าการซึมซับสภาพความเป็นแม่เหล็ก (*magnetic susceptibility;  $\chi_m$* ) ได้สูงถึง  $10^6$  สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรจึงมีความสำคัญมากต่องานในด้านวิศวกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กแบบนี้ได้และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) เป็นต้น [7, 8]



รูปที่ 2.5 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรถึงแม้ไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีค่าแมกนีไทเซชันสูงมาก [7]

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า แม็กนีไทเซชัน (Magnetization,  $M$ ) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6



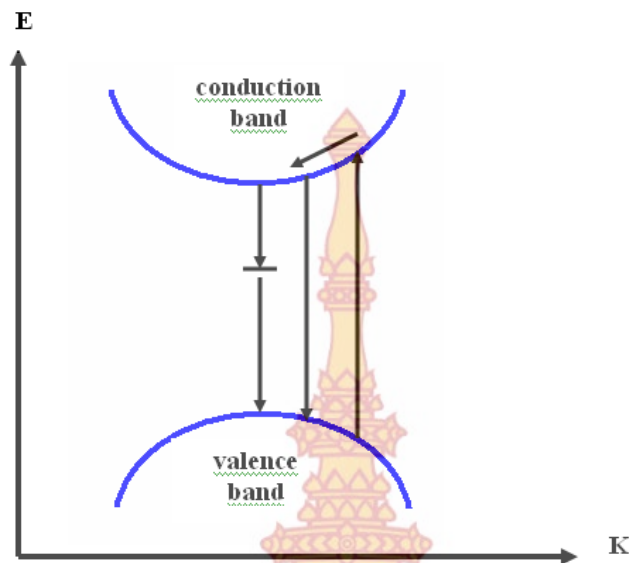
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ [8]

### 5. คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

ขบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่สุดคือกระบวนการซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Transition) ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำคือเป็น Interband transition ขบวนการดูดกลืนแสงนี้ถูกเรียกว่า การดูดกลืนมูลฐาน (fundamental absorption) ในกระบวนการนี้อิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบและกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำ พลังงานโฟตอนในกระบวนการนี้จะต้องเท่ากับ  $E_g$  หรือมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 นั่นคือถ้าโฟตอนมีความถี่  $\nu$  จะได้ว่า

$$h\nu \geq E_g \quad (2.1)$$

ความถี่  $\nu_0 = E_g / h$  เรียกว่า absorption edge



รูปที่ 2.7 การดูดกลืนมูลฐานของสารกึ่งตัวนำแบบ direct - gap [10]

ในกระบวนการดูดกลืนแสง พลังงาน และโมเมนตัมของอิเล็กตรอนรวมกับโฟตอนจะอนุรักษ์ (conserved) นั่นคือ

$$E_f = E_i + h\nu$$

(2.2)

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i + \vec{q}$$

(2.3)

เมื่อ  $E_i$  และ  $E_f$  เป็นพลังงานของอิเล็กตรอนก่อนและหลังการดูดกลืนแสง ส่วน  $\vec{k}$  เป็นโมเมนตัมของอิเล็กตรอน  $\vec{q}$  เป็นเวกเตอร์คลื่นของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนและเนื่องจาก  $\vec{q}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $\vec{k}$  ดังนั้นสมการ (2.3) เขียนใหม่ได้

$$\vec{k}_f \approx \vec{k}_i \quad (2.4)$$

นั่นคือการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นได้ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำจะต้องอยู่ในแนวตั้งของ  $k$ -space เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในกรณีที่การเปลี่ยนสถานะเป็นไปตามสมการ (2.3) ซึ่งเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบ direct - gap ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่โครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะดังนี้คือ ค่า  $\vec{k}$  ต่ำสุดแถบการนำกับ  $\vec{k}$  สูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่  $\vec{k} = 0$  ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอยู่ในรูป

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $A$  เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของโครงสร้างแถบพลังงาน  $E_g$  เป็นค่าพลังงานช่องว่างแถบพลังงาน

จากสมการ (2.5) จะเห็นว่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับความถี่เมื่อความถี่มากกว่า  $V_0$  และสำหรับ  $V < V_0$  สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะเป็นศูนย์

ความสำคัญของการดูดกลืนแสงต่อช่องว่างแถบพลังงานก็คือ ใช้ในการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  เนื่องจากที่ absorption edge คือจุดที่พลังงานโฟตอนมีค่าเท่ากับ  $E_g$  หรือ  $h\nu_0 = E_g$  นั่นเอง [10]

## 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มของ Z. Hong (2009) [1] ได้รายงานผลการเตรียมอนุภาคนาโน CuO ขนาด 3-9 นาโนเมตร (nm) โดยวิธี novel alcoholthermal และวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานด้วย XRD , TEM และ XPS

กลุ่มของ L.K. Yeung (2012) [2] ได้เตรียมอนุภาคนาโน CuO ขนาด 355 นาโนเมตร โดยวิธี aqueous precipitation แล้ววิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM และ TEM

กลุ่มของ R. A. Gaashani (2011) [3] เตรียมอนุภาคนาโน CuO ขนาด 40 นาโนเมตร โดยการสลายตัวทางความร้อน วิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD, TEM

กลุ่มของ J. Morales (2004) [4] ได้เตรียมฟิล์มบางนาโน CuO ขนาด 30-160 nm โดยวิธีไพโรไลซิสเปอริ (spray pyrolysis method) แล้วศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

กลุ่มของ K.L. Liu (2010) [6] ได้รายงานผลการเตรียมอนุภาคนาโน CuO เจือ Fe โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธี sol-gel และ co-precipitation พบว่าการเตรียมอนุภาคนาโน CuO ด้วยวิธี sol-gel เกิดเฟส  $CuFe_2O_4$  ที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กของ CuO

กลุ่มของ S.G. Rejith (2013) [7] ได้ศึกษาผลของสารเจือ Zn ต่อคุณสมบัติทางแสง ความร้อน และแม่เหล็ก ในอนุภาคนาโน CuO โดยวิธี microwave assisted solvothermal พบว่ามีสมบัติไม่เป็นแม่เหล็กเฟอร์โร (antiferromagnetic) ที่อุณหภูมิห้อง และมีแถบพลังงาน (Band gap) เท่ากับ 2.65 eV

กลุ่มของ N. M. Basith (2013) [8] ได้ศึกษาผลของสารเจือ Fe ต่อคุณสมบัติทางแสง และแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง โดยวิธี microwave combustion พบว่า แถบพลังงาน (Band gap) เพิ่มขึ้นจาก 2.8 เป็น 3.4 eV เมื่อปริมาณสารเจือ Fe เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2.0 โมลเปอร์เซ็นต์ และมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง

กลุ่มของ C.C. Vidyasagra [11] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมโดยกระบวนการทางเคมี พบว่าเมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) อนุภาคนาโน CuO มีขนาดประมาณ 35 nm และจากการคำนวณช่องว่างแถบพลังงานโดยเทคนิค

UV-VIS Spectroscopy พบว่ามีแถบช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 3.41 - 3.73 eV

และเมื่อไม่นานมานี้กลุ่มของ J.G. Zhao [12] ได้ทำการศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ CuO เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยการใช้  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เป็นสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า CuO มีลักษณะเป็นแผ่นนาโน เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แผ่นนาโน CuO มีขนาดอยู่ในช่วง 40-50 nm และจากการศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยเทคนิค Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) แผ่นนาโน CuO มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบเฟอร์โร

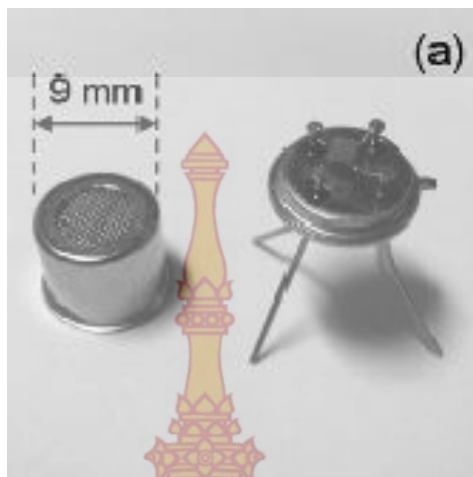
จากตัวอย่างรายงานการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าการการศึกษาศาสตร์ทางแสงและสมบัติแม่เหล็กในวัสดุ CuO และ CuO เจือด้วยโลหะทรานซิชัน นั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สารกึ่งตัวนำ หัวเซ็นเซอร์ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ และ Photovoltaic เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติแม่เหล็กและสมบัติทางแสง ในผงอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เจือร่วมระหว่าง โลหะทรานซิชัน (TM=Ni, Fe) และพาสซีโวโตเมียม (Pr) ด้วยวิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอล

## 7. แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

จากงานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวมาในข้างต้น มีการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบว่า CuO มีแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สารกึ่งตัวนำ p-type, Photovoltaic, หัวเซ็นเซอร์ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์, หัวเซ็นเซอร์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และหัวเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งในการประยุกต์ใช้ CuO ในการสร้างหัวเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์นั้น จะทำให้หัวเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพที่ดีและมีราคาถูกเนื่องจากคุณสมบัติของ CuO สามารถเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะทำการสังเคราะห์ CuO ที่เจือด้วย TM (Ni, Fe) ร่วมกับ Pr ซึ่งในงานวิจัยข้างต้นก็ได้แสดงให้เห็นถึงสมบัติของ CuO ที่เจือด้วย TM (Ni, Fe) แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วง 3.9-4.3 eV ซึ่งเป็นค่าที่สูงซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านโซลาร์เซลล์ด้านการลดความร้อนส่วนเกิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อเตรียม CuO เจือร่วมระหว่าง TM (Ni, Fe)/Pr โดยเตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งมีวิธีการเตรียมที่ง่าย ไม่ยุ่งยากหลายขั้นตอนและให้ความบริสุทธิ์สูง และคาดว่าจะส่งผลให้ช่องว่างพลังงานมีค่ากว้างขึ้นและสมบัติทางแม่เหล็กในผงอนุภาคนาโน CuO สูงขึ้น โดยการศึกษาโครงสร้าง ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยเทคนิค XRD, TEM และ SEM ทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-VIS และศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็กโดยเทคนิค VSM โดยจะทำการสังเคราะห์สารด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล





รูปที่ 2.8 ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส (gas sensor) ที่ได้จากสาร CuO [13]

## 8. การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่างอย่างแพร่หลายในงานด้านเคมี, ฟิสิกส์และเคมีชีวภาพ เพื่อการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลของสารประกอบ และการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี โดยสามารถวิเคราะห์หองค์ประกอบของสารประกอบนั้นๆ ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำผลมาใช้คำนวณหาขนาดของผลึกได้อีกด้วย

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มี 3 แบบหลักๆ ได้แก่ วิธีเลาเอ (Laue method) วิธีผลึกหมุน (Rotation crystal method) และวิธีผง (Powder method) ซึ่งวิธีผงนี้ได้รับความนิยมสูงสุดในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการวิเคราะห์และเตรียมตัวอย่าง เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ดังสมการที่ 2.6 เรียกว่าสมการของแบรกก์ [15]

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.6)$$

เมื่อ  $d$  คือระยะห่างระหว่างระนาบ  $hkl$

$\theta$  คือมุมแบรกก์สำหรับระนาบ  $hkl$

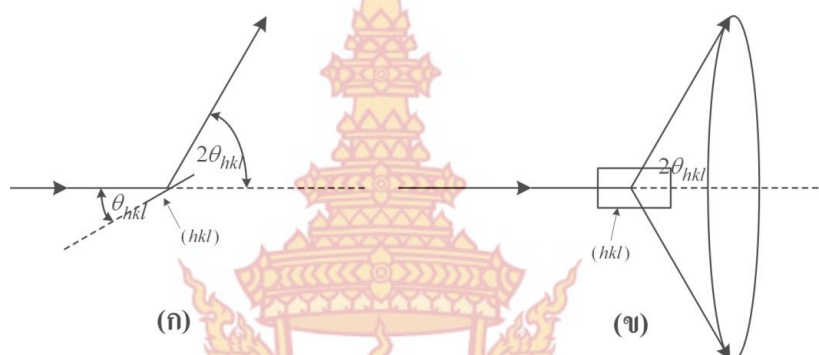
$n$  คือจำนวนเต็มบวก

$\lambda$  คือความยาวรังสีเอกซ์

### 8.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึกผง

ผลึกผงคือเม็ดผลึกขนาดเล็กวางตัวแบบสุ่ม ได้จากการบดก้อนสารให้เป็นผงละเอียด โดยผลึกผงที่ได้อาจมีทั้งผลึกเดี่ยวหรือพหุผลึก ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่างที่นำมาบดและความสะดวกในการบด ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึกผง เกิดขึ้นเมื่อมีการยิงรังสีเอกซ์ความยาว

คลื่นเดี่ยวตกกระทบกับสารตัวอย่างที่เป็นผลึกผิง โดยอาศัยกฎของแบรกก์ที่กล่าวว่าจะมีชั้นหรือระนาบ (hkl) ของอะตอมที่สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบ (hkl) ได้เสมอ โดยรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบสารตัวอย่างจะทำมุม  $\theta_{hkl}$  กับระนาบที่ตกกระทบ และจะพบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบ (hkl) ในทิศในทิศ  $2\theta_{hkl}$  ดังแสดงในรูป 2.9 (ก) และเมื่อระนาบ (hkl) หมุนไปเป็นมุม  $\theta_{hkl}$  รอบแกนแนวรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ จะพบรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl) เป็นลักษณะรูปกรวยซึ่งมีขนาดมุมยอดเท่ากับ  $4\theta_{hkl}$  ดังแสดงในรูป 2.9 (ข) [16]



รูปที่ 2.9 แสดงกรวยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากสารตัวอย่างชนิดผลึกผิง [14]

สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ได้แก่เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุระนาบของสารตัวอย่าง ในการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อใช้วัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ มีได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับรูปแบบและปริมาณสารที่มีอยู่



รูปที่ 2.10 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) [15]

## 8.2 การเตรียมตัวอย่างผลึกผง เพื่อใช้ในการศึกษาเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

สารตัวอย่างแบบผลึกผงที่มีปริมาณมากพอ สามารถเตรียมได้สะดวกที่สุดโดยการใส่สารลงใน หลุมสี่เหลี่ยมผืนผ้า (holder) ที่ทำจากแผ่นพลาสติกหรืออลูมิเนียม แล้วกดด้วยแรงพอประมาณเพื่อให้ผงเกาะติดกันโดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน และปาดผิวหน้าให้เรียบได้ระดับ ขนาดของพื้นที่หน้าตัด หลุมบรรจุผงผลึกต้องใหญ่กว่าลำรังสีเอกซ์และความลึกต้องมากพอเพื่อหลีกเลี่ยงการเลี้ยวเบนจาก วัสดุที่อยู่ด้านล่างของผงสารตัวอย่าง นอกจากนี้เทคนิค XRD ยังสามารถใช้คำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size) โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherer equation) ด้วยวิธี X-ray line broadening ซึ่งอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนผ่านระนาบ (hkl) ที่มุม  $\theta$  ต่างๆ และความกว้างที่ตำแหน่ง ครึ่งหนึ่งของความสูง ของยอดกราฟการเลี้ยวเบนหรือ full-width at half-maximum (FWHM) ดัง สมการที่ 2.7

$$D = k\lambda / \beta \cos\theta \quad (2.7)$$

โดยที่ D คือ ขนาดของผลึก

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของผลึก

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$\beta$  คือ full-width at half-maximum

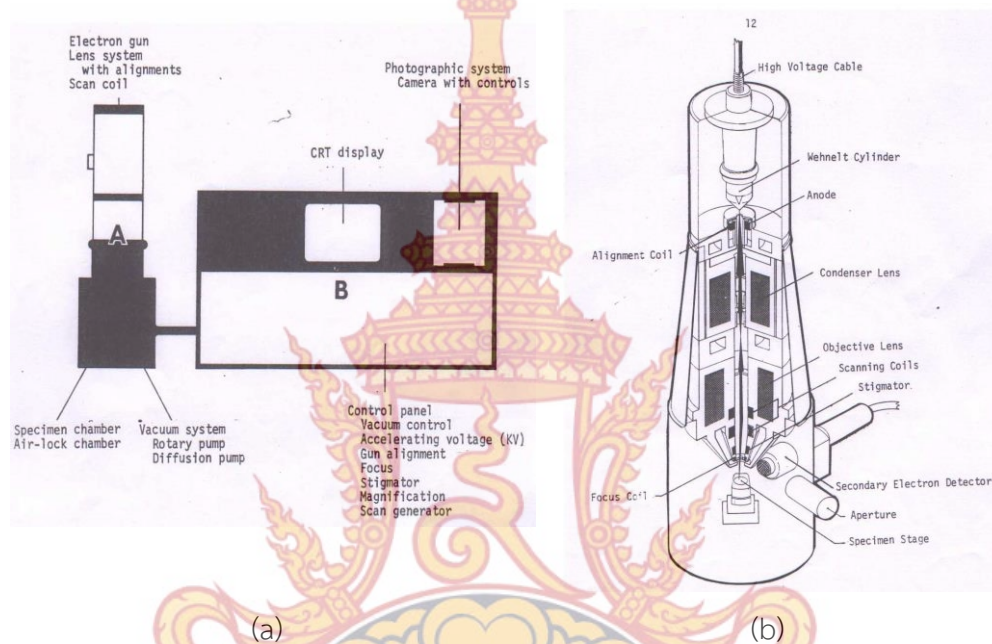
$\theta$  คือ มุมเลี้ยวเบน

## 9. เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคการถ่ายภาพเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ โดยลำอิเล็กตรอนจะถูกส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดนี้มีกำลังแยกไม่สูงเท่ากับ TEM (SEM มีกำลังแยกสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วย SEM ไม่จำเป็นต้องบางเท่ากับกรณีที่ใช้ดูด้วย TEM (เพราะไม่ได้ตรวจวัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่าง เนื่องจากภาพที่ได้เป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้น SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ดี [17]

โครงสร้างส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดประกอบ (SEM) ด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 คือ “column” ภายใน ประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้เคลื่อนที่ไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ภายในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ column และอุปกรณ์รับสัญญาณภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูกจัดวางไว้

อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้ ส่วนภายใน console unit ซึ่งเป็นแผงควบคุมระบบ ควบคุมไฟฟ้า ระบบสุญญากาศ และระบบถ่ายภาพ ประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบ เช่น การควบคุมลำอิเล็กตรอนภายใน column และ SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็น คือระบบทำสุญญากาศ (vacuum system) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (high voltage generator) และระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (water-cooling system) อีกด้วย



รูปที่ 2.11 (a) แสดงส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM (b) แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ [18] ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM มีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 220 โวลต์เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 kV แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวด filament ที่ล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเข้ามาสู่ลวด filament ดังกล่าว ก็จะมีความร้อนสูง ประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง electron gun ซึ่งมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถปรับให้

electron gun ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน column ได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆด้านนอก electron gun นอกจากนี้จะมีปั๊มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electron gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น anode เพื่อจะช่วยปรับลำอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า alignment coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม alignment knobs บนแผงของ console unit เหตุที่ต้องปรับ electron gun ก็เพื่อจะให้ลำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเขวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron)

2. เลนส์ควบคุมลำอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำอิเล็กตรอน (electron magic lens & scan coils) ทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณสี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีหลายขนาดตั้งแต่  $50\ \mu\text{m}$ - $400\ \mu\text{m}$  และสามารถเปลี่ยนขนาดได้ตามที่ต้องการ เลนส์ aperture ทำหน้าที่กำหนดให้ลำอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่าง เป็น aperture พิเศษเรียกว่า objective aperture มีไว้เพื่อกั้นกรวยลำอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบ จุดต่างๆบนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึก มากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำอิเล็กตรอน ปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่าง อุปกรณ์นี้เรียกว่า scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์บภาพ CRT ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์ตัวสุดท้าย ส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่าง คือ ฐานวางตัวอย่างและปั๊มควบคุม โดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometer stage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector & scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกเพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging & photographic devices) ทำหน้าที่เปลี่ยน

สัญญาณที่ได้รับเป็นภาพ อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายสัญญาณและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากชุดของประจุอิเล็กทรอนิกส์จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำเข้าสู่ท่อนำแสง แสงที่ผ่านท่อนำแสงนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไปเป็นอิเล็กทรอนิกส์อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าไปปรากฏในจอภาพ CRT ที่ติดตั้งไว้บน console unit [18]

#### 10. เทคนิคการดูดกลืนแสงของอนุภาค (UV-Visible spectroscopy)

เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของอนุภาค ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและย่านที่ตามองเห็น เมื่อแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและย่านที่ตามองเห็น ผ่านเข้าไปในวัตถุ บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง บางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนผ่านทะลุออกไป และสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap :  $E_g$ ) ได้จากสมการ direct transition ดังนี้

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h\nu$  คือพลังงานโฟตอน

$E_g$  คือช่องว่างแถบพลังงาน

$B$  คือค่าคงที่ซึ่งให้เท่ากับ 1

โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  แล้วลากส่วนของเส้นตรงให้แนบกับส่วนที่มีความต่อเนื่องกันมากที่สุดของกราฟลงมาตัดแกน  $x$  ซึ่งเป็นค่าของ  $h\nu$  ที่ค่า  $(\alpha h\nu)^2$  (แกน  $y$ ) เป็นศูนย์ ค่าจุดตัดบนแกน  $x$  ที่อ่านได้ ก็คือช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  [19] ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ใช้เครื่อง UV-VIS spectroscopy ตั้งอยู่ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-160A วิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm

#### 11. เทคนิค Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

เทคนิค VSM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่าง ในการตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กของสาร เมื่อมีการให้สนามที่ไม่คงที่ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคนี้จะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อปริมาตรหรือค่าแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไป (applied field) ซึ่งข้อมูลที่ต้องการนำไปใช้ในการวิเคราะห์คือค่าแมกนีไทเซชัน ดังนั้นจึงต้องมีการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างทุกครั้งและนำมาหารกับค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่วัดได้ จึงจะได้ค่าแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไป เครื่อง VSM จะแสดงค่า

โมเมนต์แม่เหล็กในหน่วยของ e.m.u ( $1\text{e.m.u}=0.001\text{ A}\cdot\text{m}^2$ ) ที่ค่าสนามแม่เหล็กความเข้มต่างๆ จากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้ในลักษณะของค่าสัญญาณที่ต่างกันจึงใช้ตรวจสอบว่าสารตัวอย่างนั้นเป็นสารแม่เหล็กประเภทใดเช่น เป็นแม่เหล็กแบบไดอา พารา เฟอร์โร หรือ ซูเปอร์พารา เป็นต้น [20] โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง VSM ที่ตั้งอยู่ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ยี่ห้อ Lake Shore รุ่น 7403 ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ยี่ห้อ Lake Shore รุ่น 7403 [20]



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาของบทนี้ส่วนแรกจะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ เจริญไซ และขั้นตอนการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ส่วนที่สองจะกล่าวถึงการศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และปริมาณการเจือศึกษาด้วยเทคนิค XRD, SEM, UV-VIS และ VSM ตามลำดับ

#### 1. สารเคมีและอุปกรณ์

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

| สารเคมี  | ความบริสุทธิ์ (%) | มวลโมเลกุล (g/mol) | บริษัท          |
|--|-------------------|--------------------|-----------------|
| $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 99.00             | 290.79             | KANTO CHEMICAL  |
| $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 99.50             | 241.60             | Carlo erba      |
| $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 99.90             | 435.01             | SIGMA - ALORICH |
| $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 99.99             | 404.00             | Nanto Chemical  |
| KOH  | 85.00             | 56.11              | VWR, PROLABO    |

อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

- เตาเผาแบบกล่อง (Box furnace)
- เครื่องซังไฟฟ้าความละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง
- Magnetic Stirrer
- Magnetic bars
- ปีกเกอร์ ขนาด 100 และ 1000 ml
- ซ้อนตักสาร
- Parafilm
- เครื่องมือวิเคราะห์ XRD, SEM, UV-VIS และ VSM

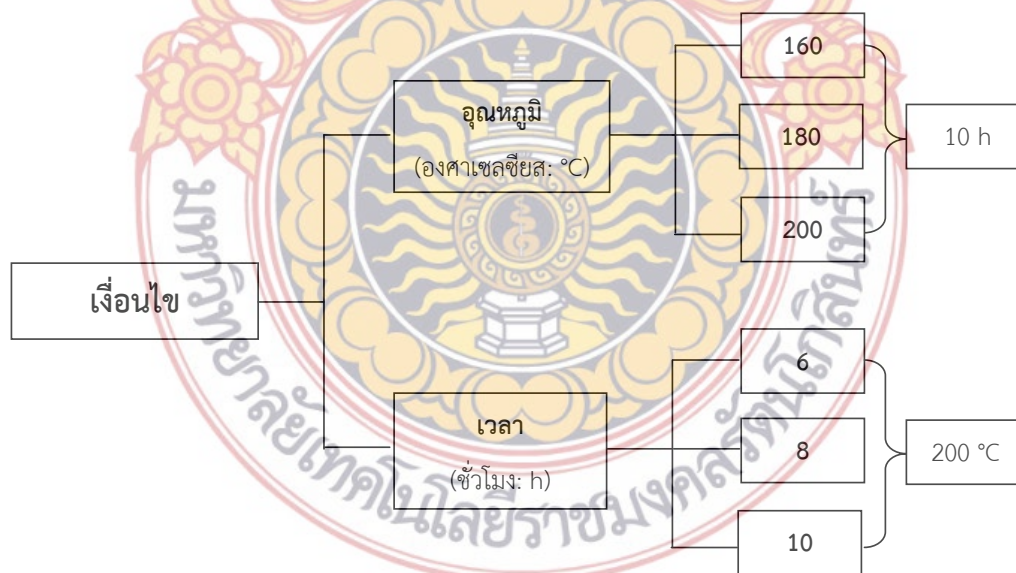


## 2. การสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

การสังเคราะห์อนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เริ่มด้วยการคำนวณปริมาณสารตั้งต้นตามสูตรโครงสร้าง CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ที่มีปริมาณ Fe และ Pr ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยเงื่อนไขการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

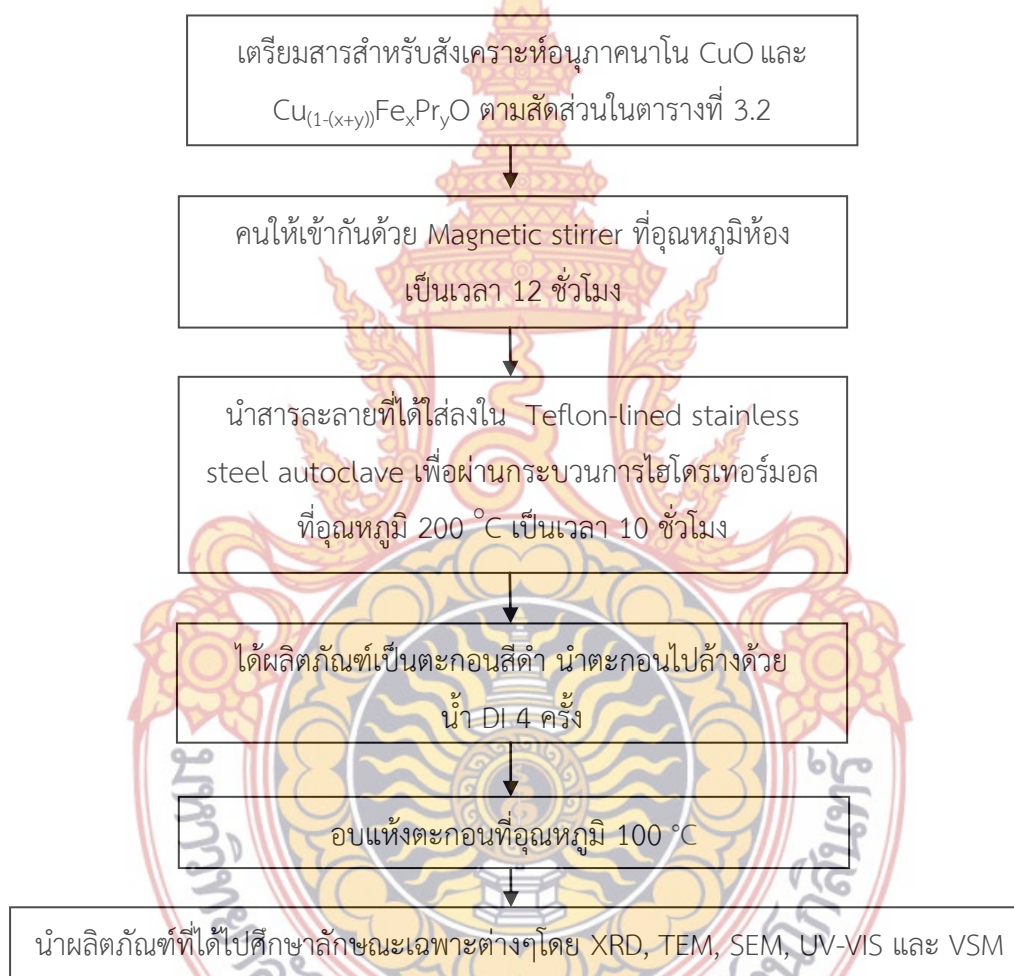
ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนโมลของสารเจือที่ใช้สังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$

| ชุดที่ | สาร  | ปริมาณสาร (g)  |  |  |          |
|--------|--|--|--|--|----------|
|        |  | $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | DI water |
| 1      | CuO  | 1.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 40       |
| 2      | $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$                 | 0.9200   | 0.0000   | 0.1440   | 40       |
| 3      | $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ | 0.9200   | 0.0334   | 0.1080   | 40       |
| 4      | $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ | 0.9200   | 0.0669   | 0.0720   | 40       |
| 5      | $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ | 0.9200   | 0.1003   | 0.0360   | 40       |
| 6      | $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$                 | 0.9200   | 0.1338   | 0.0000   | 40       |



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

จากเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO บริสุทธิ์ สำหรับผงอนุภาคนาโน  $Cu_{(1-(x+y))}TM_xPr_yO$  จึงเลือกใช้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยเริ่มทำการเตรียมเหมือนกันกับ CuO บริสุทธิ์ แล้วนำตะกอนที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มาล้างเบสด้วยน้ำ DI แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อไล่น้ำออก สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีดำ จากนั้นนำผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติพื้นฐาน แม่เหล็ก และ สมบัติทางแสง ด้วยเทคนิค XRD, TEM, SEM, VSM และ UV-VIS โดยกระบวนการสังเคราะห์ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

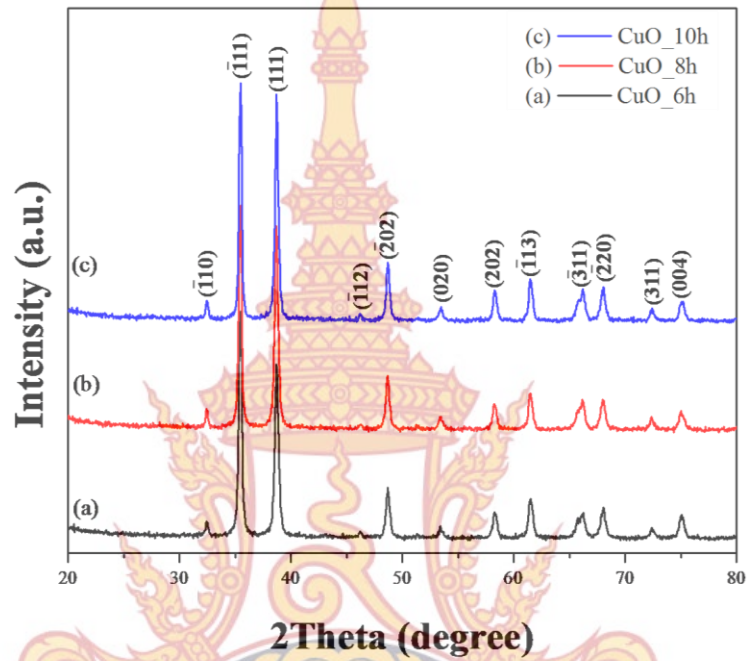
โครงสร้างของบทนี้จะประกอบด้วยผลการทดลองจากการวิเคราะห์อนุภาคผงนาโน CuO และอนุภาคผงนาโน CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ด้วยเทคนิค XRD, SEM-EDX ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหลักกว่ามีผลต่อสมบัติทางแสง และสมบัติแม่เหล็กในผงอนุภาคที่เตรียมได้

#### 1. ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานโดยเทคนิค XRD

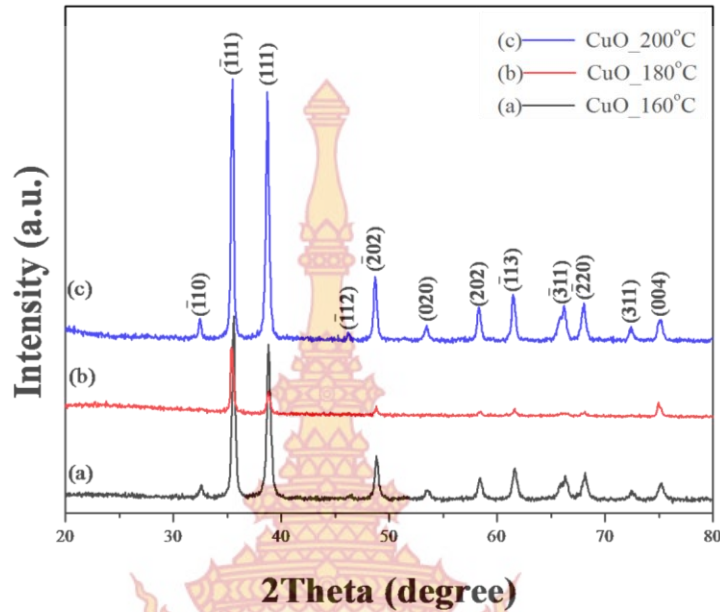
##### 1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐาน ของผงอนุภาคนาโน CuO

การศึกษากาการเกิดเฟสและโครงสร้างของผงอนุภาคนาโน CuO มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr โดยตรวจสอบจากการเกิดเฟสบริสุทธิ์ของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมได้ จากเงื่อนไขอุณหภูมิที่เลือกศึกษาคือที่อุณหภูมิ 160 °C, 180 °C และ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง และเงื่อนไขเวลา 6, 8 และ 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 °C แสดงดังภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 จากภาพที่ 4.1 พบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 32.48, 35.46, 38.70, 46.19, 48.66, 53.43, 58.32, 61.47, 66.21, 68.09, 72.39 และ 75.10 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (110), (111), (111), (112), (202), (020), (202), (113), (311), (220), (311) และ (004) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพีคมาตรฐานของ CuO (JCPDF 45-0937) และมีโครงสร้างแบบมอนอคลินิก (monoclinic) โดยไม่พบเฟสปลอมปนในทุกเงื่อนไขเวลา ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าความเข้มจากการเลี้ยวเบนและกระเจิงของรังสีเอกซ์ค่อนข้างต่ำและในกรณีอุณหภูมิ 180 °C และพบว่ามีบางเฟสหายไปที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 32.48, 46.19, 53.43 และ 66.21 องศา จากการศึกษาลักษณะเฟสโครงสร้างของ CuO ทั้งเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลา พบว่าการเตรียมผงอนุภาคนาโน CuO ที่ถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ดีที่สุด อาจเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเฟส CuO ได้ดีกว่าเงื่อนไขอื่นๆ ที่ทำการทดลอง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 ซึ่งความเข้มของรังสีเอกซ์

ที่เลี้ยวเบนและกระเจิงค่อนข้างสูง และไม่พบเฟสปลอมปน ดังนั้นเพื่อลดเงื่อนไขของการเกิดเฟสปลอมปน ในการศึกษาผลของสารเจือ Fe และ Pr ในผงอนุภาคนาโน CuO งานวิจัยนี้จึงเลือกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 °C และใช้เวลาในการแคลไซต์ 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโน CuO เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเงื่อนไขของเวลาเท่ากับ 6, 8 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโน CuO เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่ใช้เวลาในการเท่ากับ 10 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 160 °C, 180 °C และ 200 °C ตามลำดับ

### 1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐาน ของผงอนุภาคนาโน CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr

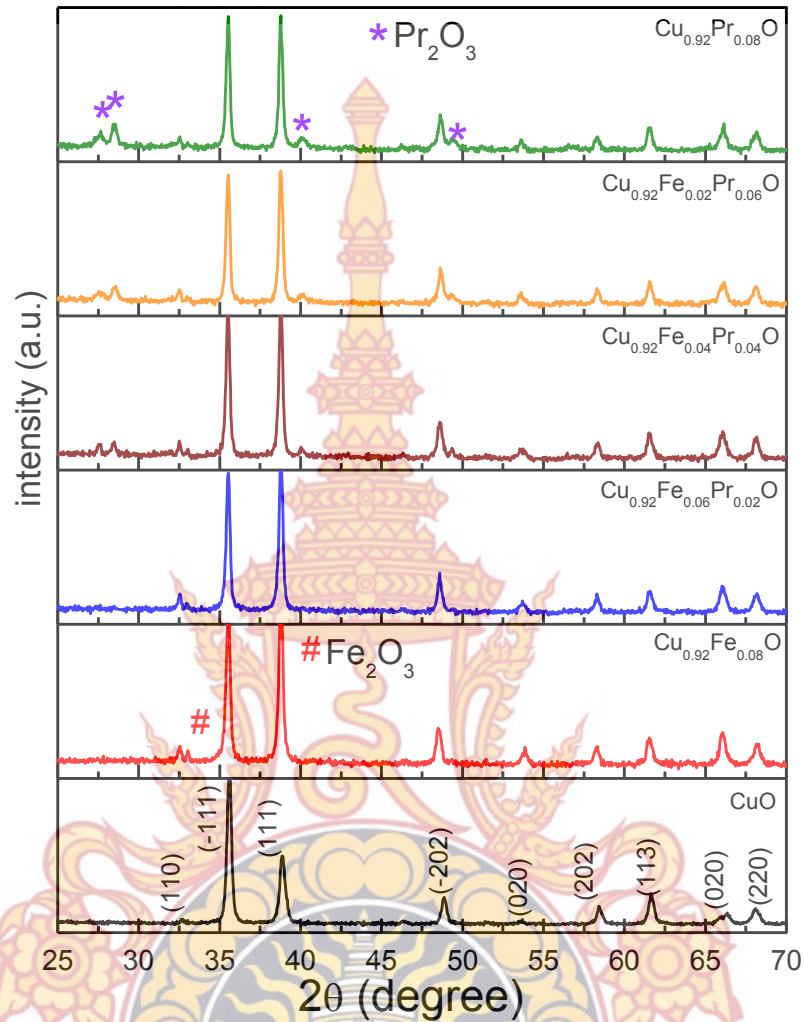
จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคนาโน CuO ด้วยวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันทำให้ได้โครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็ก (magnetic properties) และสมบัติทางแสง (optical properties) เนื่องจากถ้าอนุภาคผงของ CuO เมื่อถูกเตรียมให้มีสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อสมบัติทางแสง และสมบัติแม่เหล็กเป็นอย่างมาก ดังรายงานการวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นเพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานด้วยเทคนิค XRD ของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ( $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$  และ  $0.08$  โดยที่  $x+y = 0.08$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโน CuO บริสุทธิ์ที่ไม่มีการเจือธาตุใดๆ จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงผลการวิเคราะห์ได้ในภาพที่ 4.3 โดยภาพที่ 4.3 นี้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม เพื่อเปรียบเทียบกับผงอนุภาคนาโน CuO เพื่อมองเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนของผงอนุภาคที่เตรียมได้ทั้งหมดสามารถแบ่งผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้เป็น 3 กลุ่มด้วยกัน โดยกลุ่มที่ 1 ได้แก่ผงอนุภาคนาโน CuO ที่เจือด้วย Fe ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นผงอนุภาคนาโน CuO ที่เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ) ส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นผงอนุภาคนาโน CuO เจือด้วย Pr ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ ) แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะมีการเปรียบเทียบโครงสร้างของผงอนุภาคนาโน ที่

เจือ Fe และ Pr จะต้องทราบผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD ของอนุภาคนาโน CuO ก่อน ซึ่งจากการทดลองพบว่า อนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง เกิดพีคหลักขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 32.53, 35.49, 38.72, 46.22, 48.71, 53.39, 58.32, 61.54, 66.26 และ 68.04 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (110), (111), (111), (112), (202), (020), (202), (113), (311), (220), (311), และ (220), ตามลำดับ สอดคล้องกันกับพีคมาตรฐานของอนุภาคผง CuO (JCPDF 45-0937) โดยที่ค่าคงที่แลตทิซ *a*, *b* และ *c* มีค่าเท่ากับ 4.682(4), 3.423(3) และ 5.128(4) อังสตรอม (Å) ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังไม่ปรากฏพีคของสารอื่นปลอมปน แสดงว่าการเตรียมผงอนุภาคนาโน CuO ที่เงื่อนไขของเวลาและอุณหภูมินี้ทำให้ได้ CuO ที่บริสุทธิ์ และเมื่อนำข้อมูลจาก XRD ไปหาขนาดของผลึกโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ พบว่าขนาดผลึกของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมได้เท่ากับ 44.31 นาโนเมตร (nm) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันกับที่มีรายงานการวิจัยก่อนหน้านี้โดยกลุ่มของ J. Zhao [2015] สำหรับอนุภาคนาโนกลุ่มที่ 1 CuO เจือด้วย Fe ด้วยอัตราส่วนโมลเท่ากับ 0.08 (ผงอนุภาคนาโน Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.08</sub>O) ค่าคงที่แลตทิซ *a*, *b* และ *c* มีค่าเท่ากับ 4.704(8), 3.404(6) และ 5.128(8) อังสตรอม (Å) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่แลตทิซ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการเข้าไปแทนที่ ในอะตอมของ Cu (135 pm) ด้วย Fe (140 pm) ซึ่งมีรัศมีอะตอมที่ใหญ่กว่า นอกจาก Fe ที่เข้าไปแทนที่แล้ว ปริมาณ Fe ที่เหลือจากการแทนที่ จะฟอร์มตัวกันเป็นเฟสเจือปน Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เกิดขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 33.04 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อนำค่า FWHM (Full Width at a Half Maximum) ค่าความสูงของพีคหลักที่ระนาบ (111) และ (111) คำนวณขนาดของผลึกโดยใช้สมการของเชอร์เรอร์ได้เท่ากับ 36.65 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามผลของการศึกษาโครงสร้าง XRD ของ กลุ่มที่ 2 ที่เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr โดยที่ผลรวมโดยโมลยังคงเท่าเดิมเป็น 0.08 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Fe ลดลงเป็น 0.07, 0.06, 0.04 และ 0.02 (Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.07</sub>Pr<sub>0.01</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.06</sub>Pr<sub>0.02</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.04</sub>Pr<sub>0.04</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.02</sub>Pr<sub>0.06</sub>O) จะเห็นได้ว่าค่าคงที่แลตทิซ *a*, *b* และ *c* ยังมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าค่าคงที่แลตทิซของ CuO แต่อย่างไรก็ตามยังมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่แลตทิซเมื่อเจือ Fe เท่ากับ 0.08 ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.1 และความเข้มข้นของเฟสปลอมปน Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากการเข้าไปแทนที่ใน อะตอมของ Fe มีค่าลดลง และปริมาณเฟสปลอมปน มีค่าลดลงด้วยเนื่องมาจาก ปริมาณของ Fe ที่เจือเข้าไปมีปริมาณลดลง จากผลของ XRD สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้จากสมการเชอร์เรอร์ โดยจะมีค่าเท่ากับ 41.02, 36.99, 37.72 และ 44.60 nm สำหรับผงอนุภาคนาโน Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.07</sub>Pr<sub>0.01</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.06</sub>Pr<sub>0.02</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.04</sub>Pr<sub>0.04</sub>O, Cu<sub>0.92</sub>Fe<sub>0.02</sub>Pr<sub>0.06</sub>O ตามลำดับ เมื่อเจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr จะเห็นว่าขนาดผลึกใหญ่ขึ้นอาจเนื่องมาจาก เมื่อเจือด้วย Fe อย่างเดียวการเกาะร่วมตัวกันจะเกิดได้ดีกว่า แต่เมื่อเจือร่วม การกระจายตัวกันอาจมีได้มากกว่า อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Fe

ค่าคงที่แลตทิสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก การแทนที่ Cu (135 pm) ด้วย Fe (140 pm) ที่มีรัศมีอะตอมที่ใหญ่กว่า และในทางกลับกัน เมื่อปริมาณสารเจือ Fe ลดลง ส่วนสารเจือ Pr เพิ่มขึ้น ก็มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่แลตทิสน้อยมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสารเจือ Pr (185 pm) ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ใน Cu (135 pm) ได้เนื่องจากมีขนาดรัศมีอะตอมที่แตกต่างกันมาก แต่อย่างไรก็ตามสารเจือ Pr ที่เจือเข้าไป นั้นไปก่อให้เกิดเฟสปลอมปน  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 27.38, 28.49 และ 40.09 องศา และความสูงของพีคของ  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ เจือ Pr เท่ากับ 0.08 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และจะเห็นว่าค่าคงที่แลตทิส  $a$ ,  $b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 4.682(4), 3.423(3) และ 5.128(4) อังสตรอม (Å) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าคงที่แลตทิสของ ผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมได้ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าสารเจือ Pr ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ใน Cu ได้ และเมื่อศึกษาขนาดผลึกของอนุภาคผง  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  มีค่าเท่ากับ 47.44 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับ ขนาดของผลึกผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมได้ โดยที่ขนาดผลึก ค่าคงที่แลตทิส ของผงอนุภาคที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

จากการศึกษาองค์ประกอบเฟสของผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จะเห็นว่า สารเจือ Fe เท่านั้นที่สามารถเข้าไปแทนที่ในอะตอมของ Fe ได้เนื่องจากมีรัศมีอะตอมที่ใกล้เคียงกัน โดยที่สารเจือ Pr ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในอะตอมของ Cu ได้เนื่องจากมีขนาดรัศมีอะตอมที่แตกต่างกันมาก แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดเฟสปลอมปนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  จะส่งผลอย่างไรต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาครวมทั้ง สมบัติ แม่เหล็ก และสมบัติทางแสง จะได้ศึกษากันอีกในหัวข้อต่อไป





ภาพที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) จาก มุม  $2\theta$  เท่ากับ 20-70 องศา ของผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับพีคหลักของผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$



**ตารางที่ 4.1** แสดงขนาดผลึกและค่าคงที่แลตทิซของผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลา 10 ชั่วโมง

| ตัวอย่าง   | ขนาดผลึก<br>(nm) | ค่าคงที่แลตทิซ (Å) |          |          |
|--|------------------|--------------------|----------|----------|
|  |                  | a                  | b        | c        |
| $\text{CuO}$   | 44.31            | 4.682(4)           | 3.423(3) | 5.128(4) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$                 | 36.65            | 4.704(8)           | 3.404(6) | 5.128(8) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ | 36.99            | 4.695(8)           | 3.414(6) | 5.128(9) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ | 37.72            | 4.690(9)           | 3.415(7) | 5.128(9) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ | 44.60            | 4.692(1)           | 3.414(8) | 5.130(1) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$                 | 47.44            | 4.683(5)           | 3.425(4) | 5.133(5) |

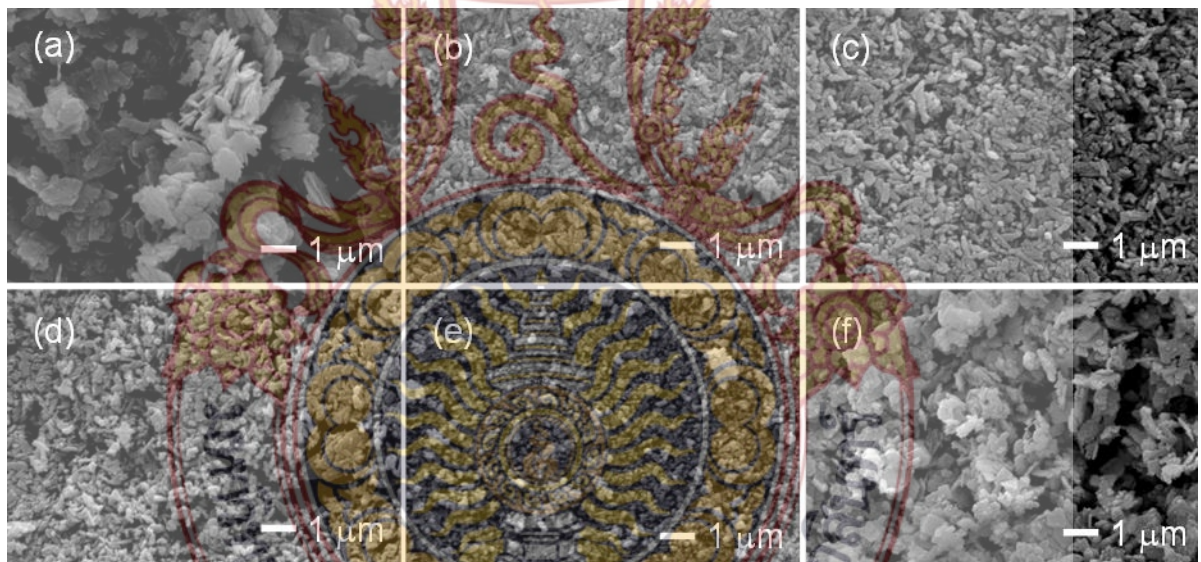
จากตารางเราจะเห็นได้ว่าค่าคงที่แลตทิซของอนุภาคผงผลึกที่เตรียมได้มีขนาดเปลี่ยนไปเนื่องจากการการเจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ซึ่งอาจมีผลต่อสมบัติทางแสงและสมบัติแม่เหล็กในผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะทางจุลภาค เปลี่ยนไปเล็กน้อยแค่ไหน ต้องศึกษาด้วยเทคนิค SEM และศึกษาองค์ประกอบของสารเจือด้วยเทคนิค EDS



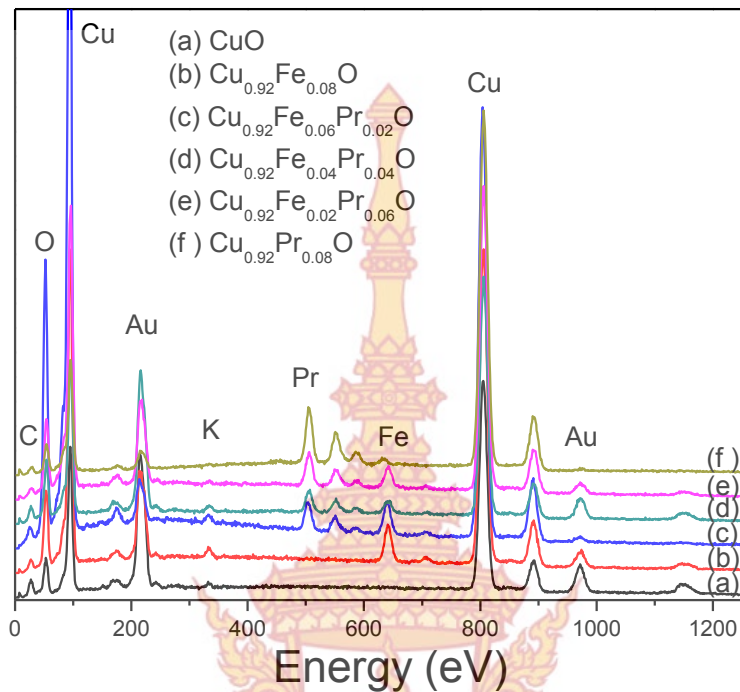
## 2. การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยเทคนิค SEM

### 2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาค CuO โดยเทคนิค SEM

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ศึกษาผลของการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของอนุภาคนาโน ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือ Fe และ สารเจือ Pr เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของ ผงอนุภาคนาโน CuO และ CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ต้องศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ซึ่งแสดงได้ในภาพที่ 4.4 จากภาพถ่าย SEM พบว่าผงอนุภาค CuO แสดงการกระจายตัวของ อนุภาคนาโน CuO อย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดแผ่นที่มีขนาดเล็ก ขนาดประมาณ  $1\ \mu\text{m}$  โดยทั่วไปจากการรายงานการวิจัยที่ผ่านมาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของผงอนุภาค CuO ที่เตรียมได้ขนาดระดับ นาโนเมตร จะส่งผลต่อสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง โดยการศึกษาสมแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงในผงอนุภาคนาโน ของผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จึงมีลักษณะทางกายภาพที่น่าสนใจ ซึ่งจะได้อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยอุณหภูมิ  $200\ ^\circ\text{C}$  และเวลา 10 ชั่วโมงตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบของธาตุหลัก Cu, Fe และ Pr เมื่อศึกษาด้วยเทคนิค EDS

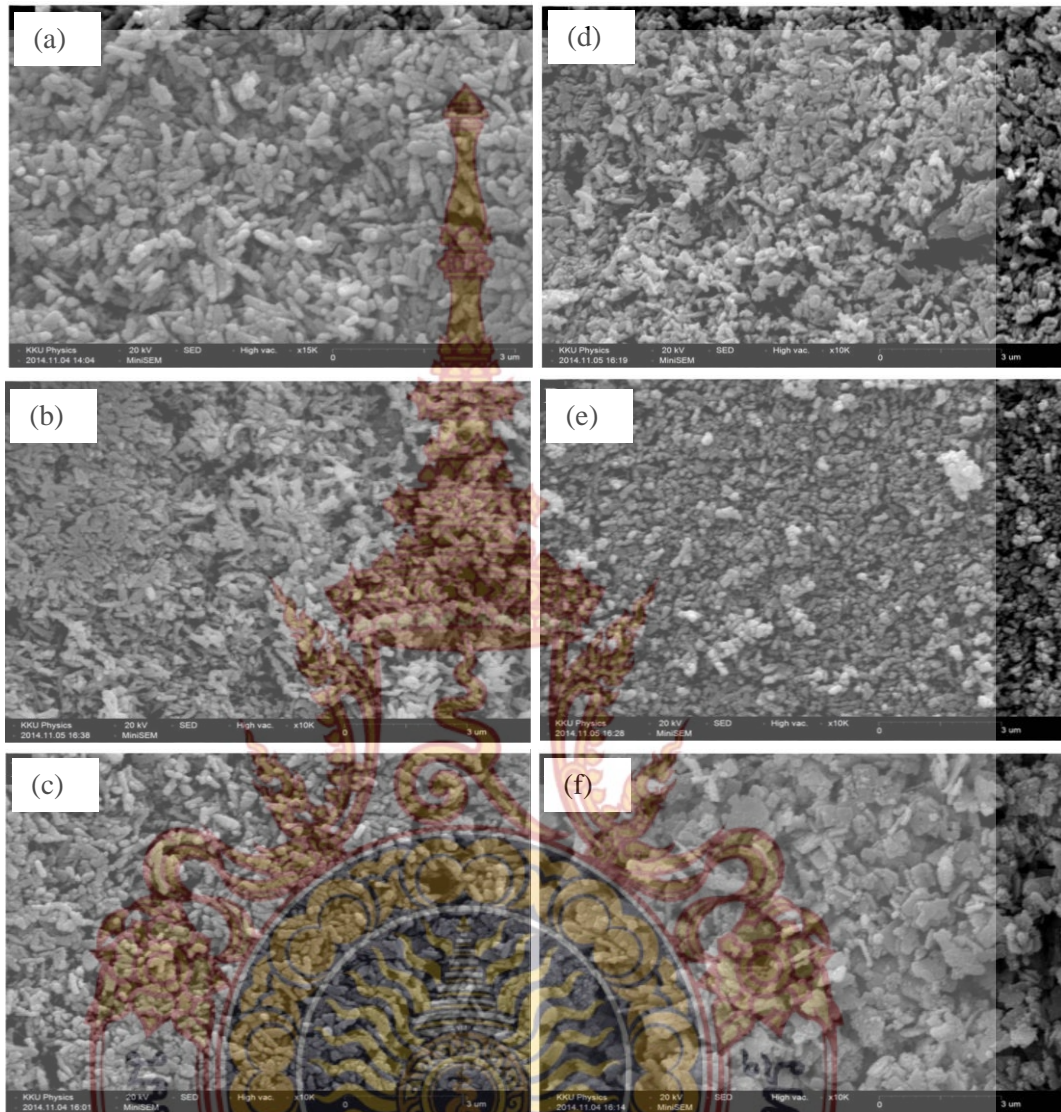
## 2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาค $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค SEM

หัวข้อที่ผ่านมากเป็นการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย เทคนิค SEM ของผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$  ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของสารเจือ Fe และ Pr และ Fe/Pr ที่เจือร่วมในผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$  ต้องศึกษาผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ด้วยเทคนิค SEM ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เมื่อ  $x=0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.07$  และ  $0.08$  ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ) ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จากรูปพบว่าเมื่อมีการเจือ Fe เท่ากับ 0.08 ( $\text{CuO Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ) ลักษณะของผลึกที่ได้มีรูปร่างเป็นเม็ดเล็ก ๆ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีการจับกันเป็นก้อนมากขึ้นเนื่องจากผลของการดึงดูดกัน ด้วยสมบัติของ Fe และเมื่อปริมาณสารเจือ Fe ลดลงขนาดเม็ดเล็ก ๆ นั้นมีขนาดเล็กลงตามไปด้วยและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยเมื่อมีขนาดของผลอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อ สารเจือ Fe เท่ากับ 0.02 ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ ) ในทางกลับกันเมื่อปริมาณสารเจือ Fe ลดลงส่วนปริมาณสารเจือ Pr นั้นเพิ่มขึ้น ทำให้ผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นแผ่นอนุภาคนาโนสำหรับอนุภาคผง Pr ที่เจือเข้า

ไปด้วยปริมาณ 0.08 ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ ) ซึ่งจะทำให้ได้ผงที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกับผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$  ดังแสดงในภาพที่ 4.6

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานของโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD และการศึกษาภาพถ่ายเชิงลึกด้วยเทคนิค SEM จะเห็นได้ว่าทั้งโครงสร้างพื้นฐานของผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพและการเกิดสารเจือที่ต่างกันไป ซึ่งอาจจะส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการนำผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$  ไปประยุกต์ใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุที่ใช้งานด้านแม่เหล็ก และการใช้งานด้านแสง โดยการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง ของ ผงอนุภาคนาโน ที่เตรียมได้จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป





ภาพที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคนาโน (a)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ , (b)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ , (c)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ , (d)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ , (e)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ (f)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$

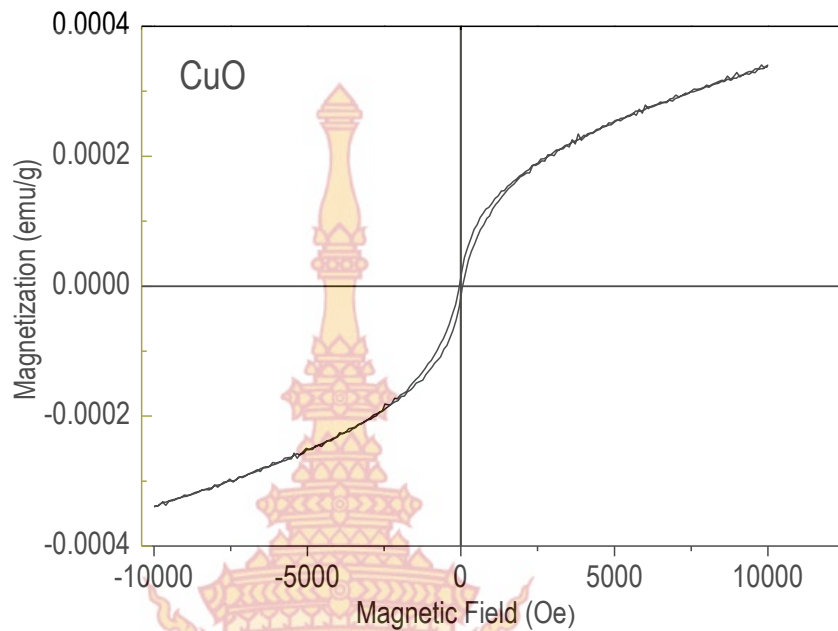
### 3. การศึกษาสมบัติแม่เหล็ก โดยเทคนิค VSM

ที่ผ่านมาเป็นการศึกษา ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของ ผงอนุภาคนาโน CuO และ ผงอนุภาคนาโน CuO เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr จะเห็นว่ามีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันเมื่อ ศึกษาด้วยเทคนิค SEM โดยขนาดอนุภาคจะเล็กลงและเกาะกลุ่มกันมากขึ้นเมื่อเจือด้วย Fe ที่มี ปริมาณไม่มากกว่า 0.02 แต่เมื่อปริมาณสารเจือ Fe มากกว่า 0.02 จะทำให้ สารเจือ Fe ที่เหลือ ไป เกิดเป็น เฟสปลอมปน  $Fe_2O_3$  และในทำนองเดียวกันเมื่อปริมาณสารเจือ Pr เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้เกิดเป็น เฟสปลอมปน  $Pr_2O_3$  ซึ่งการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพนี้จะมีผลต่อการ เปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็ก และสมบัติทางแสง จะได้แสดงในหัวข้อต่อไป

#### 3.1 การศึกษาสมบัติแม่เหล็กของอนุภาค CuO โดยเทคนิค VSM

เพื่อให้เกิดความชัดเจนต่อผลการเปลี่ยนแปลงแม่เหล็ก เมื่อมีการเจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr ใน หัวข้อนี้จะศึกษาผลของแม่เหล็ก ที่เตรียมได้โดยเทคนิคการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอล ด้วยเงินไขการ เตรียมที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}C$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ผลการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อค่าแมกเนไตเซชันที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงใน ภาพที่ 4.7 จากรูปพบว่าผงอนุภาคนาโน CuO แสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบพารา (paramagnetic) เนื่องจากสภาพความเป็นแม่เหล็กในอนุภาคที่โมเมนต์แม่เหล็กภายในเกิดการหักล้างกัน แต่ยังมีโมเมนต์ แม่เหล็กเหลืออยู่และจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบส่งผลทำให้อนุภาคแสดงสภาวะแม่เหล็กแบบพารา ซึ่งค่าแมกเนไตเซชันมีค่าเท่ากับ  $0.0264 \text{ emu/g}$  ที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $10,000 \text{ Oe}$  และค่า สมบัติแม่เหล็กได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.3

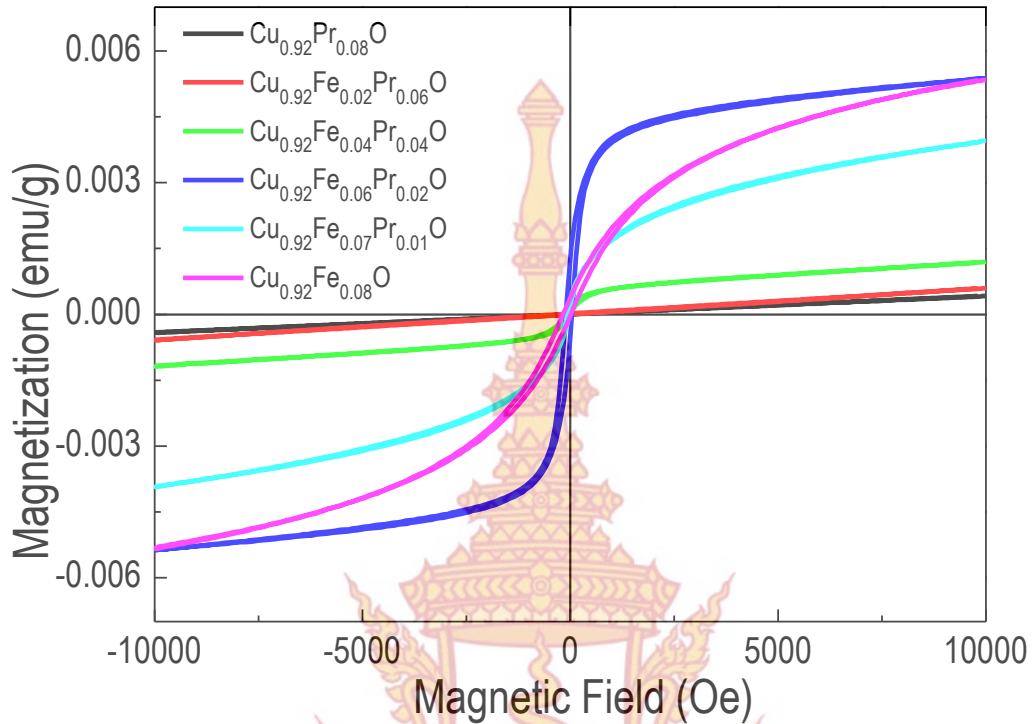


ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กของผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

### 3.2 การศึกษาสมบัติแม่เหล็กของอนุภาค $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค VSM

ผลการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ ) ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อค่าแมกเนไตเซชันที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่า อนุภาค  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  แสดงสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเมื่อมีการเจือ Fe ที่สัดส่วนปริมาณการเจือเป็น  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.07$  และ  $0.08$  และแสดงความเป็นแบบเหล็กแบบพาราเมื่อไม่มีการเจือ Fe หรือสัดส่วนปริมาณการเจือ Pr สูงสุดหรือที่  $y = 0.08$  ค่าแม่เหล็กต่างๆสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งได้แก่ค่า remanence flux density ( $B_r$ ), saturation magnetization ( $M_s$ ) และ coercivity ( $H_c$ ) เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก แม่เหล็กเฟอร์โรก็จะแสดงอำนาจแม่เหล็กขึ้นมา โดยแม่เหล็กเฟอร์โรจะยังสามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่มาเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า  $M_s$  และ  $B_r$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือ Fe เพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ปริมาณการเจือที่  $x = 0.06$  และจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กกลับล้างมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ Fe เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ของผงอนุภาคนาโน โน  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  เตรียมโดยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Saturation magnetization ( $M_s$ ), Remanence flux density ( $B_r$ ) และค่า Coercivity ( $H_c$ ) ของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$

| สารตัวอย่าง  | คุณสมบัติทางแม่เหล็ก |                      |            |
|--|----------------------|----------------------|------------|
|  | $M_s$ (emu/g)        | $B_r$ (emu/g)        | $H_c$ (Oe) |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$                 | 0.0034               | $6 \times 10^{-5}$   | 20         |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ | 0.0030               | $4 \times 10^{-5}$   | 8          |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ | 0.0045               | $7.5 \times 10^{-4}$ | 75         |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ | 0.0010               | $1 \times 10^{-4}$   | 100        |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ | 0.0040               | $2 \times 10^{-5}$   | 285.714    |

หมายเหตุ

- Saturation magnetization ( $M_s$ ) หมายถึง ค่าแมกนีไทเซชันสูงสุดที่จะเกิดได้เมื่อวัสดุอยู่ในสนามแม่เหล็ก

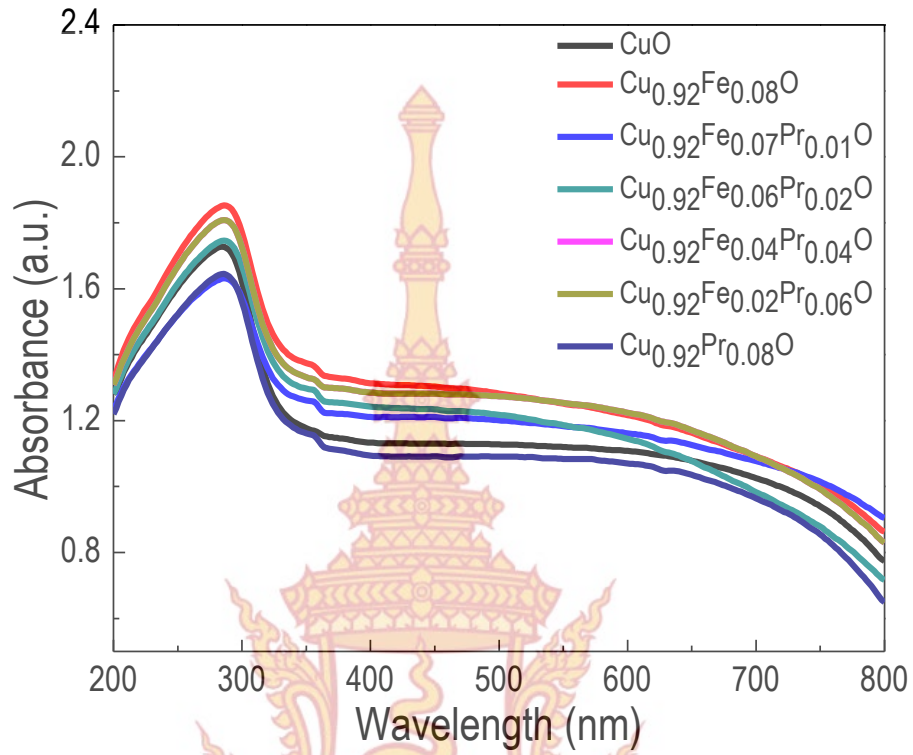


- Remanence flux density ( $B_r$ ) หมายถึง ค่าที่วัสดุสามารถรักษาสภาพแม่เหล็กภายในไว้ได้เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไปเป็นศูนย์
- Coercivity ( $H_c$ ) หมายถึง สนามแม่เหล็กกลับข้าง

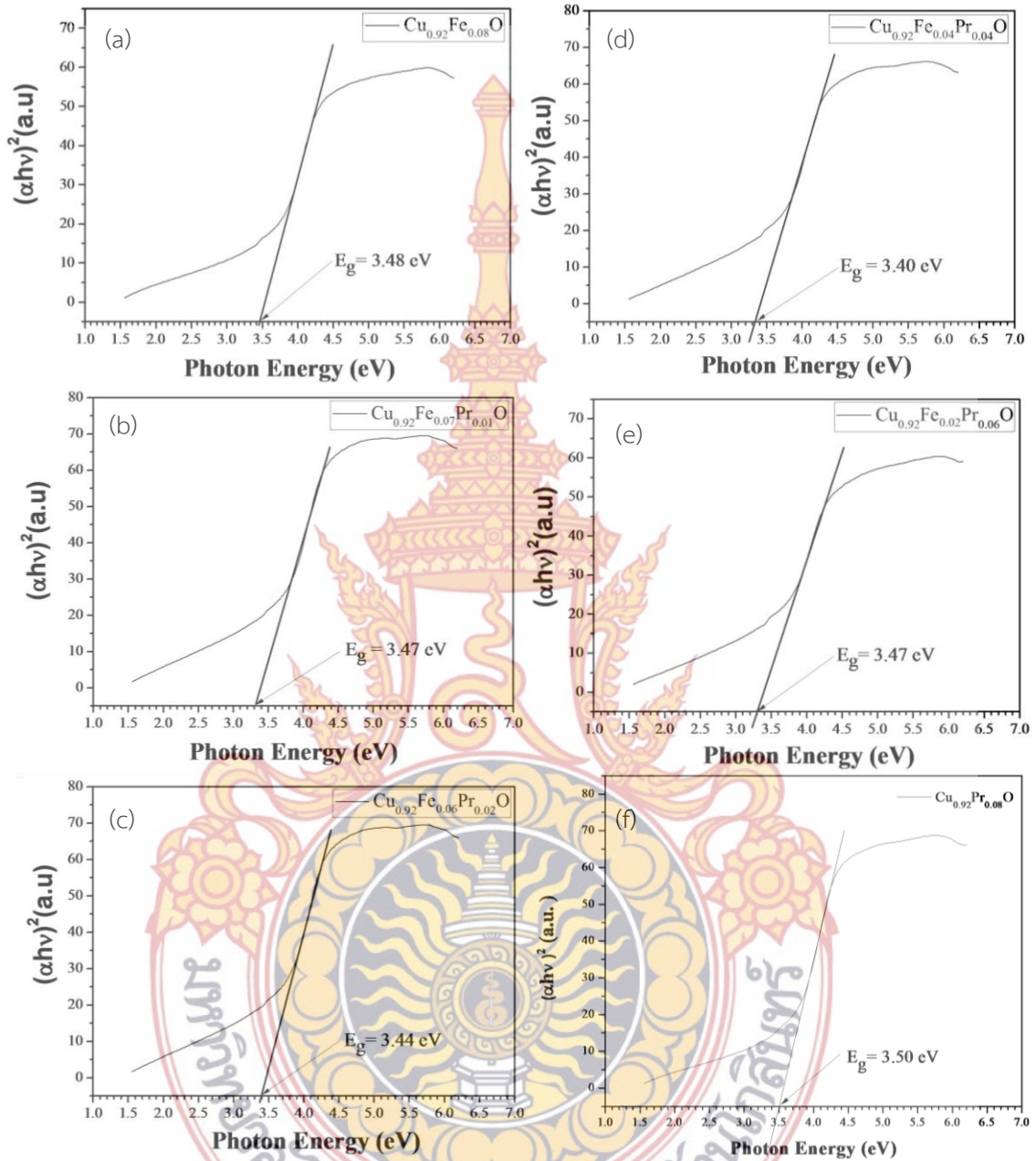
#### 4. การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-Vis

##### 4.1 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน $\text{CuO}$ และ $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค UV-Vis

ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$  และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ( $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$ ) เติรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยเทคนิค UV-Vis แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคผงทุกตัวอย่างมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยดูดกลืนแสงได้ดีในย่าน UV ที่ช่วงความถี่ต่ำกว่า 400 nm และมีการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 286 nm จากนั้นนำผลการดูดกลืนแสงในภาพที่ 4.9 มาหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap,  $E_g$ ) โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานของโฟตอน  $h\nu$  ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยพบว่าการกราฟมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เมื่อคำนวณตามสมการที่ 2.8 เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานพบว่าอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.43, 3.47, 3.40, 3.44, 3.47 และ 3.48 eV ตามลำดับ โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  สรุปได้ดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาค  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเจือ Fe เพิ่มขึ้น จากผลการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  บ่งบอกได้ว่าทั้งสองตัวอย่างมีความเป็นฉนวนเนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) มีค่าค่อนข้างสูงหรือช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง



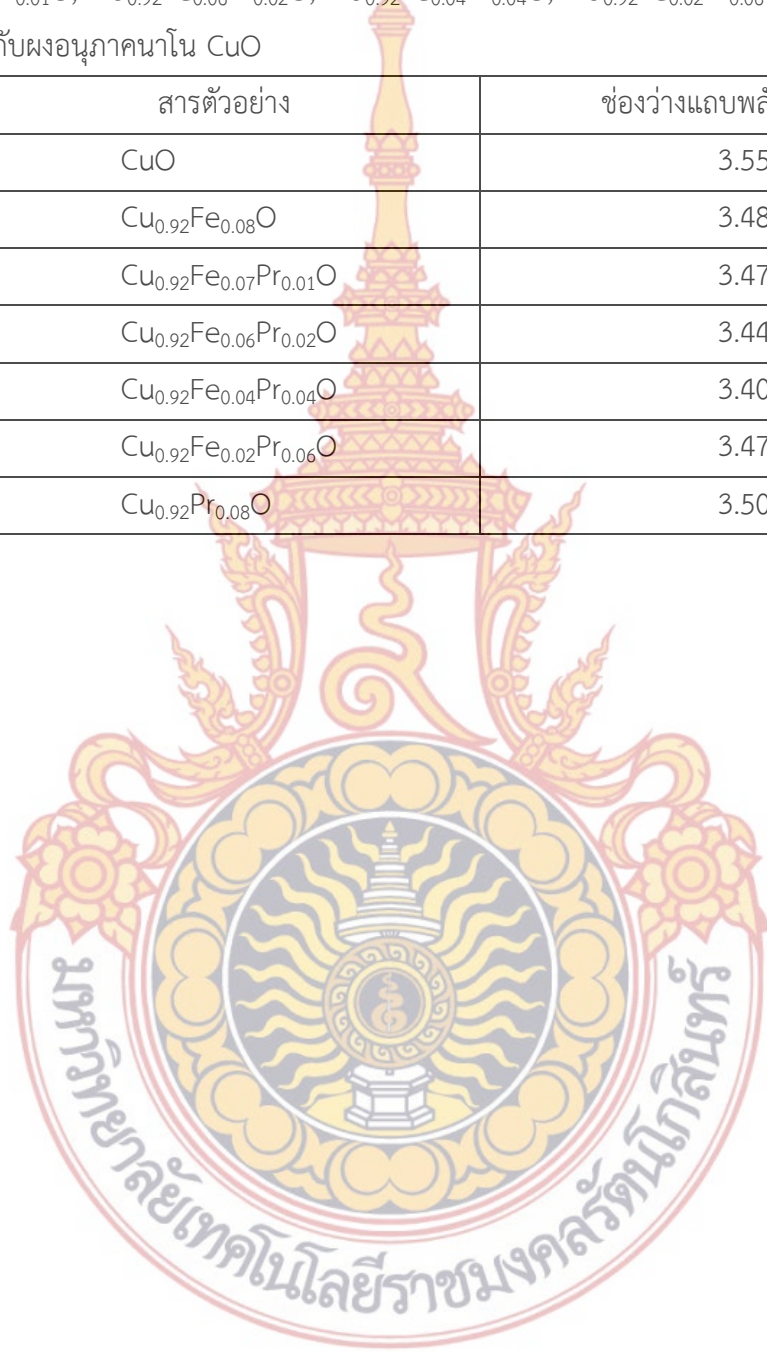
ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-Vis ของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  เปรียบเทียบกับผง อนุภาคนาโน  $\text{CuO}$



ภาพที่ 4.10 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของผงอนุภาคนาโน (a)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ , (b)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ , (c)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ , (d)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ , (e)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ (f)  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$

**ตารางที่ 4.3** ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโน ของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ ,  $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$  และ  $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$  เปรียบเทียบกับผงอนุภาคนาโน  $\text{CuO}$

| สารตัวอย่าง  | ช่องว่างแถบพลังงาน (eV) |
|--|-------------------------|
| $\text{CuO}$   | 3.55                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}\text{O}$                 | 3.48                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}\text{Pr}_{0.01}\text{O}$ | 3.47                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{O}$ | 3.44                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{O}$ | 3.40                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Fe}_{0.02}\text{Pr}_{0.06}\text{O}$ | 3.47                    |
| $\text{Cu}_{0.92}\text{Pr}_{0.08}\text{O}$                 | 3.50                    |



## บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการสังเคราะห์และศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ และอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เจอร์ร่วมระหว่าง Fe และ Pr ได้ดังนี้

### 1. การศึกษาเฟสและโครงสร้างของผงอนุภาคนาโน CuO และ $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค XRD

จากการสังเคราะห์ผงอนุภาคนาโน CuO ที่เงื่อนไขเวลาและอุณหภูมิต่างกันที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และใช้เวลา 6, 8 และ 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 °C แล้วนำไปศึกษาโครงสร้างและลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิค XRD เพื่อหาเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  พบว่าผงอนุภาคนาโน CuO ที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ monoclinic ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDF 45-0937 และไม่พบเฟสปลอมปนในทุกเงื่อนไขเวลา สำหรับเงื่อนไขอุณหภูมิพบว่าความเข้มจากการเลี้ยวเบนและกระเจิงของรังสีเอกซ์ค่อนข้างต่ำ ในกรณีอุณหภูมิ 180 °C และสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะเฟสของ CuO ที่ถูกเตรียมที่ 200 °C ด้วยเวลา 10 ชั่วโมง ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ดีที่สุด และมีความเข้มของการเลี้ยวเบนและกระเจิงของรังสีเอกซ์ค่อนข้างสูง และไม่พบเฟสปลอมปน

ผลการวิเคราะห์เฟสโครงสร้างของผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ด้วยเทคนิค XRD พบว่าผงอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ที่เตรียมได้ มีโครงสร้างแบบ monoclinic สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDF 45-0937 ขนาดผลึกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือ Pr ในปริมาณที่มากขึ้น มีขนาดอยู่ในช่วง 36-47 nm เมื่อมีการเจือ Fe และ Pr เริ่มพบเฟสปลอมปนเกิดขึ้น โดยเฟสปลอมปนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เกิดที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 33.04 องศา เมื่อเริ่มมีการเจือ Fe โดยเห็นได้ชัดเจนที่สุดเมื่อสัดส่วนในการเจือ Fe สูงสุด และพบเฟสปลอมปนของ  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  เกิดที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 27.38, 28.49 และ 40.09 องศา เมื่อเริ่มมีการเจือ Pr โดยเฟสปลอมปนเหล่านี้เกิดจากการที่ Fe และ Pr ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของ Cu ได้อย่างสมบูรณ์ และจากการคำนวณค่าคงที่แลตทิซพบว่า a อยู่ในช่วง

4.683(5) ถึง 4.7045(8) Å , ค่าแลตทิซ b อยู่ในช่วง 3.4110(5) ถึง 3.425(4)Å, และค่าแลตทิซ c อยู่ในช่วง 5.1280(9) ถึง 5.133(5) Å

## 2. การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน CuO และ $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{TM}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค SEM

ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  พบว่าเมื่อมีการเจือ Pr ใน CuO ลักษณะของผลึกที่ได้มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็กๆเกาะกลุ่มกัน และเมื่อเจือ Fe ร่วมกับ Pr ผลึกมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีลักษณะเป็นเม็ดยาวมนเล็กๆ เกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มของผลึกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากซึ่งการจับกลุ่มกันเป็นก้อนของผงอนุภาคนาโนที่เตรียมได้นี้จะส่งผลต่อค่า VSM และสมบัติทางแสง เป็นอย่างมาก

## 3. การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคนาโน CuO และ $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค VSM

จากการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของอนุภาคนาโน CuO และ อนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  พบว่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อค่าแมกเนโตเซชันที่อุณหภูมิห้อง ของอนุภาคนาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  แสดงสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเมื่อมีการเจือ Fe ที่สัดส่วนปริมาณการเจือเป็น  $x = 0.02, 0.04, 0.06$  และ  $0.08$  และแสดงความเป็นแบบเหล็กแบบพาราเมื่อไม่มีการเจือ Fe หรือสัดส่วนปริมาณการเจือ Pr สูงสุดหรือที่  $y = 0.08$  โดยพบว่า remanence flux density ( $B_r$ ) มีค่าในช่วง  $2 \times 10^{-5}$  -  $7.5 \times 10^{-4}$  emu/g ค่า saturation magnetization ( $M_s$ ) มีค่าในช่วง  $0.0010$  -  $0.0045$  emu/g และค่า coercivity ( $H_c$ ) มีค่าในช่วง 8 ถึง  $285.714$  Oe โดยแนวโน้มของค่า  $M_s$ ,  $B_r$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือ Fe เพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ปริมาณการเจือที่  $x = 0.06$  และค่าสนามแม่เหล็กกลับลงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ Fe เพิ่มขึ้น

## 4. การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน CuO และ $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$ โดยเทคนิค UV-Vis

จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน CuO และ  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานพบว่าอนุภาค  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  ที่  $x=0, 0.02, 0.04, 0.06$  และ  $0.08$  มีค่าเท่ากับ 3.43, 3.47, 3.40, 3.44, 3.47 และ 3.48 eV ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าช่องว่างแถบพลังงานพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเจือ Fe เพิ่มขึ้น จากผลการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาค

นาโน  $\text{Cu}_{(1-(x+y))}\text{Fe}_x\text{Pr}_y\text{O}$  บ่งบอกได้ว่าทั้งสองตัวอย่างมีความเป็นฉนวนเนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) มีค่าค่อนข้างสูงหรือช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง

#### 5. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษา สารเจือร่วระหว่าง Fe และ Pr นี้มีการศึกษาผลสารเจือที่เข้าไปในโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD ยังไม่เพียงพอในการเป็นข้อมูลพื้นฐาน โดยน่าจะมีการศึกษาปริมาณสารเจือด้วยเทคนิคอื่นๆ อีก รวมทั้งน่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติ อื่นๆ อีกเช่น สมบัติทางไดอิเล็กตริก และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้วัสดุ  $\text{CuO}$  เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่หลากหลายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางขึ้น



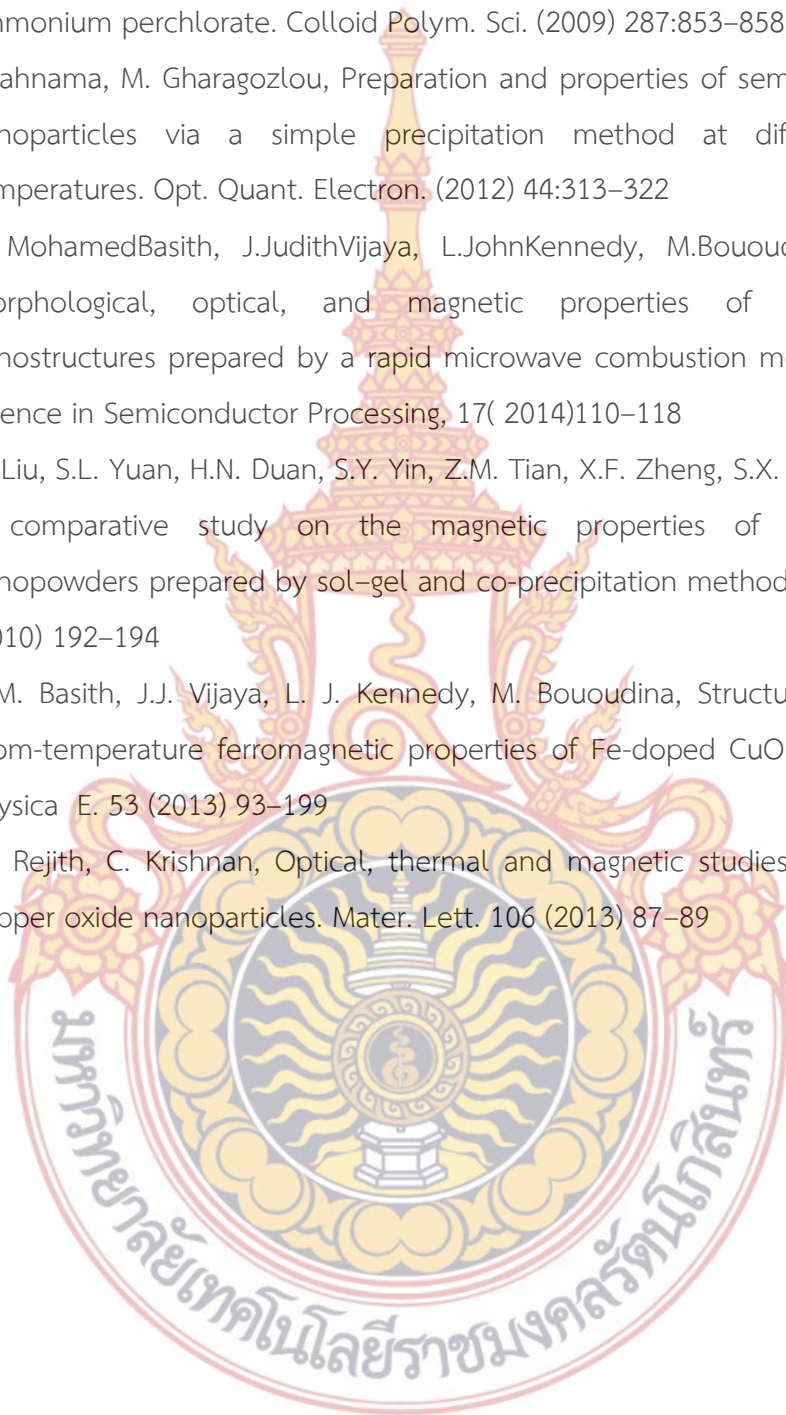
## บรรณานุกรม

- [1] Hui Wang, Jin-Zhong Xu, Jun-jie Zhu, Hong-Yuan Chen, Preparation of CuO nanoparticles by microwave irradiation, Journal of Crystal Growth, Journal of Crystal Growth, 244, 89-94 (2002).
- [2] Qiaobao Zhang, Kaili Zhang, Daguo Xu, Guangcheng Yang, Hui Huang, Fude Nie, Chenmin Liu, Shihe Yang. CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties and applications. Progress in Materials Science 60 (2014) 208–337
- [3] Copper and compounds. National Pollutant Inventory. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม 2558. จาก <http://www.npi.gov.au/resource/copper-and-compounds>
- [4] Copper (II) oxide. สืบค้นวันที่ 24 กรกฎาคม 2557. จาก [http://en.wikipedia.org/wiki/Copper\(II\)\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Copper(II)_oxide)
- [5] Nickel. สืบค้นวันที่ 24 กรกฎาคม 2557. จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>
- [6] Iron. สืบค้นวันที่ 24 กรกฎาคม 2557. จาก <http://en.wikipedia.org/wiki/Iron>
- [7] Praseodymium. สืบค้นวันที่ 24 กรกฎาคม 2558. จาก [en.wikipedia.org/wiki/Praseodymium](http://en.wikipedia.org/wiki/Praseodymium)
- [8] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์และคณะ (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป.
- [9] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท. "315205 Introduction to Material Science. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2558. จาก <http://www.physics.kku.ac.th/315205/?q=node/2>
- [10] การตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดกลืนของแสง. (2551). ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2558. จาก [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf)



- [11] C.C. Vidyasagar, Y. Arthoba Naik, T.G. Venkatesh, R. Viswanatha, Solid-state synthesis and effect of temperature on optical properties of Cu–ZnO, Cu–CdO and CuO nanoparticles. *NANO-MICRO LETTERS*, 4 (2), 73-77 (2012).
- [12] J.G. Zhao, S.J. Liu, S.H. Yang, S.G. Yang. Hydrothermal synthesis and ferromagnetism of CuO nanosheets, *Applied Surface Science*, 257, 9678– 9681 (2011).
- [13] N. Mohamed Basith, J. Judith Vijaya, L. John Kennedy, M. Bououdina. Structural, morphological, optical, and magnetic properties of Ni-doped CuO nanostructures prepared by a rapid microwave combustion method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 17, 110-118 (2014).
- [14] Yoon-Sung Kim, In-Sung Hwang, Sun-Jung Kim, Choong-Yong Lee, Jong-Heun Lee. CuO nanowire gas sensors for air quality control in automotive cabin. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 135, 298-303 (2008).
- [15] ชาญสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน. (2548). ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2558. จาก [/solid/sites/default/files/Chapter4\\_Practical\\_XRD.pdf](#)
- [16] ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. (2550). X-ray Diffractometer(XRD). ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2558 จาก [http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf\\_XRD1.htm](http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm)
- [17] หลักการของ TEM และ SEM. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2558. จาก <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-5.html>
- [18] ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2558. จาก <http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/sem/pong/4.html>
- [19] การตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดกลืนของแสง. (2551). ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2558. จาก [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf)
- [20] Magnetometer Systems. ค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2557. จาก <http://lakeshore.com/products/Vibrating-Sample-Magnetometer/7400-Series-VSM/Pages/Overview.aspx>

- [21] J. Wang, S. He, Z. Li, X. Jing, M. Zhang, Z. Jiang, Self-assembled CuO nanoarchitectures and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate. *Colloid Polym. Sci.* (2009) 287:853–858
- [22] A. Rahnama, M. Gharagozlou, Preparation and properties of semiconductor CuO nanoparticles via a simple precipitation method at different reaction temperatures. *Opt. Quant. Electron.* (2012) 44:313–322
- [23] N. MohamedBasith, J.JudithVijaya, L.JohnKennedy, M.Bououdina, Structural, morphological, optical, and magnetic properties of Ni-doped CuO nanostructures prepared by a rapid microwave combustion method, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 17( 2014)110–118
- [24] K.L. Liu, S.L. Yuan, H.N. Duan, S.Y. Yin, Z.M. Tian, X.F. Zheng, S.X. Huo, C.H. Wang, A comparative study on the magnetic properties of Fe-doped CuO nanopowders prepared by sol–gel and co-precipitation method. *Mater. Lett.* 64 (2010) 192–194
- [25] N. M. Basith, J.J. Vijaya, L. J. Kennedy, M. Bououdina, Structural, optical and room-temperature ferromagnetic properties of Fe-doped CuO nanostructures. *Physica E*. 53 (2013) 93–199
- [26] S.G. Rejith, C. Krishnan, Optical, thermal and magnetic studies on zinc-doped copper oxide nanoparticles. *Mater. Lett.* 106 (2013) 87–89



## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - สกุล นาย สุนัน หนองเหล็ก
2. ตำแหน่ง อาจารย์
3. สังกัด สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล กระทรวงศึกษาธิการ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เบอร์โทร 032-618500 ต่อ 4058 Email: sunan.non@mutr.ac.th

### 4. ประวัติการศึกษา

| ปีที่จบการศึกษา | ระดับปริญญา | ชื่อย่อปริญญา | สาขาวิชา           | สถาบันการศึกษา | ประเทศ |
|-----------------|-------------|---------------|--------------------|----------------|--------|
| 2547            | ปริญญาโท    | วศ.ม.         | วิศวกรรมไฟฟ้า      | สจล.           | ไทย    |
| 2540            | ปริญญาตรี   | วศ.บ          | วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง | มทม.           | ไทย    |

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- 5.1 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Technics)
- 5.2 จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms)
- 5.3 แม่เหล็กไฟฟ้าและสารไดอิเล็กตริก
- 5.4 วัสดุแม่เหล็กคอปเปอร์ออกไซด์

### 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง “คุณสมบัติทางไฟฟ้า และนอน-โอห์มิกของวัสดุแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนตเจือด้วยสทรอนเซียมเตรียมโดยวิธีโพลีเมอร์ไพโรไลซิส” งบประมาณรายได้ปี 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง “โครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และ แม่เหล็ก ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เจือร่วมระหว่าง Fe และ Pr” งบประมาณรายได้ปี 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

6.3 หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง “ผลของคีเลตติ้งเอเจนต์ต่อ โครงสร้างจุลภาค นอน-โอห์มิก สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุ CCTO เตรียมโดยการวิธีโซเจลดัดแปลง” งบประมาณแผ่นดินปี 2560 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์