

3. วิจารณ์ผลการทดลอง

copper ferrite จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากเฟสที่เป็น cubic ไปเป็น tetragonal ได้โดย การเกิด tetragonal distortion อธิบายได้จากอัตราส่วนของ c/a กรณียของ cubic cell จะทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเปลี่ยนแปลงการกระจายของ copper ions บน A และ B sublattices ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลง tetragonal distortion ของ copper ferrite ก็จะไปสู่การเปลี่ยนแปลง สมบัติแม่เหล็ก (magnetic properties) เป็นอย่างมาก เช่น coercive force (H_{ci}) และ saturation magnetization (M_s) เร็วๆ นี้ copper ferrite เป็นตัวอย่างของเฟอร์ไรต์ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้น ให้มี โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์และสมบัติแม่เหล็กที่สามารถปรับให้มีการกระจายของแคตไอออน (cation) ของ Cu และ Fe ไอออน ใน A และ B sublattices [19]

copper ferrite (CuFe_2O_4) อาจจะอธิบายว่า มีการจัดของไอออนของออกซิเจนแบบ cubic close – packed โดยมีไอออนของ Cu^{2+} และ Fe^{3+} อยู่ในตำแหน่งของผลึก (crystallographic site) ที่ ต่างกัน 2 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งเหล่านี้จะมีการจัดของออกซิเจนอะตอมแบบ tetrahedral และ octahedral (คือ A และ B ตามลำดับ) ดังนั้น สมมาตรที่อยู่ภายใน (local symmetry) ของทั้งสอง ช่องจะแตกต่างกัน การกระจายของแคตไอออนในโครงสร้างอาจแทนโดย $(\text{Cu}_\delta\text{Fe}_{1-\delta})^{\text{A}}[\text{Cu}_{1-\delta}\text{Fe}_{1+\delta}]^{\text{B}}\text{O}_4$ โดยที่ δ เป็น inversion parameter และ $\delta = 0$ และ 1 จะบอกถึงกรณี ของอินเวอร์สและนอร์มอล ตามลำดับ [16] แม้ว่าสปินเนล เฟอร์ไรต์ (spinel ferrites) ส่วนใหญ่เป็น cubic แต่ CuFe_2O_4 สามารถจะมีหน่วยเซลล์ที่มีสมมาตรเป็น tetragonal ถ้าสารตัวอย่างค่อยๆ เย็น ลงจากอุณหภูมิสูง สารดังกล่าวจะเป็น ferrimagnetic ที่มี Neel temperature, $T_N = 780 \text{ K}$ [16]

จากการที่สมบัติของเฟอร์ไรต์ขึ้นกับการกระจายของอนุภาคใน sublattices ดังกล่าวข้างต้น แล้ว ยังขึ้นกับขนาด(size)และรูปร่าง(shape)ของอนุภาคอีกด้วย ซึ่งก็ได้มีการทำวิจัยมากมาย เกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเฟอร์ไรต์ (MFe_2O_4) ซึ่งเชื่อว่ามีสมบัติแม่เหล็กที่แตกต่าง จากเฟอร์ไรต์ ที่มีขนาดใหญ่ (bulk) เป็นอย่างมาก [11] ในการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 เพื่อให้ได้เป็น อนุภาคนาโน อาจสังเคราะห์ได้หลายวิธีดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น เช่น high-energy ball milling [16] , วิธีให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในสถานะที่เป็นของแข็ง [13] , วิธี sonochemical method [15] และอื่น ๆ แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสังเคราะห์ 3 วิธีซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม คือ วิธีรีฟลักซ์ (reflux method), วิธี solvothermal, วิธี microwave-hydrothermal ซึ่งรายละเอียดผล การทดลองมีดังนี้

ผลการวิเคราะห์โดย XRD

จากการวิเคราะห์โดย XRD พบว่า CuFe_2O_4 ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้าง 2 แบบ คือ cubic (space group $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$) [11] และ tetragonal (space group $\text{I4}_1/\text{amd}$) [11] สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์ (reflux) ทำการสังเคราะห์ที่ pH 9 และ pH 11 ใช้เวลา 1, 3, 5 ชั่วโมง แต่พบว่าที่ 1 ชั่วโมงไม่ได้เฟสที่ต้องการ แต่ได้ Cu_2O และ FeO แทน แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการรีฟลักซ์เป็น 3 และ 5 ชั่วโมง จะได้เฟสของ CuFe_2O_4 ซึ่งมีโครงสร้างเป็น cubic และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C , 3 ชั่วโมง ยังได้เฟสที่เป็น cubic และมีสิ่งเจือปนอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700°C จะได้ CuFe_2O_4 ที่มีโครงสร้างเป็น tetragonal และยังมีสิ่งเจือปน เช่น Fe_2O_3 ปนอยู่ และเมื่อเผาต่อไปที่อุณหภูมิ 900°C จะได้เฟสที่บริสุทธิ์ของ CuFe_2O_4 ที่มีโครงสร้างเป็น tetragonal โดยไม่มีสิ่งเจือปน (รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1–2.12) สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธี solvothermal โดยใช้สารตั้งต้นคือ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และใช้ เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวทำละลาย และมีการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7–12 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าจะได้ CuFe_2O_4 โครงสร้างแบบ cubic แต่ยังมีสิ่งเจือปนอยู่ (คือ Cu) แต่เมื่อนำไปเผาต่อไปที่ 450°C และ 600°C เวลา 3 ชั่วโมง ปรากฏว่า ยังได้เฟสที่เป็น cubic เช่นเดิม แต่มีสิ่งเจือปนที่เป็น CuO และ Fe_2O_3 แต่เมื่อนำไปเผาต่อไปที่ 800°C ในเวลาเท่ากัน จะได้เฟสที่บริสุทธิ์ของ CuFe_2O_4 ที่มีโครงสร้างเป็น tetragonal (รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.33–2.37)

สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธี solvothermal แต่ใช้ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารตั้งต้นผลการทดลองไม่ค่อยแตกต่างจากเมื่อใช้สารตั้งต้นเป็น $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ โดยเมื่อยังไม่ได้ทำการเผาจะได้เฟสที่เป็น cubic และมีสิ่งเจือปนเช่น Cu, Cu_2O ปนอยู่ แต่เมื่อเผาในช่วงอุณหภูมิ 300°C – 600°C จะยังได้เฟสที่เป็น cubic เช่นเดิม แต่มีสิ่งเจือปนของ CuO และในบางสภาวะจะมี Fe_2O_3 ปนมาด้วย แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 3 ชั่วโมง จะได้เฟสที่เป็น tetragonal ของ CuFe_2O_4 ซึ่งมีความบริสุทธิ์ (รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.50–2.52) สำหรับการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 โดยวิธี microwave–hydrothermal เป็นการสังเคราะห์ที่ใช้สารตั้งต้นคือ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ในน้ำ ในช่วง pH 6–12 ทำการทดลองเตรียมที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาต่อไปที่ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรากฏว่า ผลที่ได้จะได้ CuFe_2O_4 ที่มีโครงสร้างเป็น cubic ทั้งหมด อาจจะเป็นเพราะว่าใช้อุณหภูมิที่เผาไม่สูงมากนักและเวลาในการเผาสั้นมากกว่าวิธีอื่นๆ ที่ทดลองมา จากการสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธีดังที่กล่าวมา จะเห็นว่า จะสังเคราะห์ได้ CuFe_2O_4 ที่มีโครงสร้างเป็น cubic ที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

แล้วทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น tetragonal ซึ่งเป็นไปได้ว่ามีการ distortion ของโครงสร้างเกิดขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่อื่นๆ ที่เคยมีการศึกษาก่อนหน้านี้ [11, 17]

ผลการวิเคราะห์โดย FTIR

การเกิดเป็นโครงสร้างแบบสปีเนลของ CuFe_2O_4 ที่เป็นผลึกนาโน (nano crystalline) นั้นสามารถศึกษาจาก infrared spectra ซึ่ง spectra เหล่านี้ จะถูกบันทึกในช่วง $300 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ spectra ดังกล่าวจะแสดง absorption band ของ V_1 และ V_2 ซึ่งสอดคล้องกับ stretching vibration ของโลหะที่ตำแหน่ง tetrahedral ($M_{\text{tetra}} \longleftrightarrow \text{O}$) และ octahedral ($M_{\text{oct}} \longleftrightarrow \text{O}$) ในช่วงประมาณ $600-550 \text{ cm}^{-1}$ และ $450-385 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของความถี่ของ V_1 และ V_2 อาจเนื่องมาจากความยาวของพันธะที่สั้นกว่าของไอออนโลหะ - ออกซิเจน ในตำแหน่ง tetrahedral และความยาวของพันธะที่ยาวกว่าของพันธะไอออนโลหะ - ออกซิเจนในตำแหน่งออกตะฮีดรัล [11, 20] แต่ในการสังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์หลังจากเผาที่ 90°C จะไม่พบแบนด์ที่เกิดจาก octahedral coordinated metal ion (V_2) เนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือ ซึ่งคาดว่าอาจจะมีตำแหน่งที่ต่ำกว่า 400 cm^{-1} จะพบเพียง V_1 ที่ประมาณ 600 cm^{-1} แต่อย่างไรก็ตามที่สภาวะการทดลองเมื่อทำการ รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ pH 9 และ pH 11 ก่อนนำไปเผา จะพบแบนด์ของตัวทำละลายด้วย คือ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และน้ำที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งจะมีแบนด์ของ O - H stretching ที่ในช่วง 3400 cm^{-1} และมี O - H bending ที่ประมาณ 1600 cm^{-1} และ 1400 cm^{-1} และที่ประมาณ 1100 cm^{-1} คาดว่าจะเป็น C - O stretching (ซึ่งสองแบนด์หลังนี้ยืนยันว่ามีเอทิลีนไกลคอลหลงเหลืออยู่) [20,21] (แสดงในรูปที่ 2.14) แต่สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธี solvothermal ก่อนนำไปเผา จะพบแบนด์ของน้ำที่หลงเหลืออยู่ คือพบ O - H stretching ที่ 3400 cm^{-1} และ O - H bending ที่ประมาณ 1630 cm^{-1} [21] ซึ่งอาจจะเป็นน้ำที่ adsorb บนผิวของอนุภาคและจะพบแบนด์ V_1 ในทุกสภาวะการทดลองที่ประมาณ 600 cm^{-1} แต่สำหรับแบนด์ V_2 นั้น จะพบในบางสภาวะเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงและพบที่ประมาณ 450 cm^{-1} แต่ในบางสภาวะจะไม่ปรากฏให้เห็น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของผู้อื่น ก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน [11,17] (แสดงในรูปที่ 2.38 - 2.42 และ 2.53 - 2.55) สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธี microwave-hydrothermal นั้น เนื่องจากใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ดังนั้น นอกจากจะพบแบนด์ V_1 ที่ 600 cm^{-1} ซึ่งเป็นแบนด์หลักแล้วยังพบแบนด์ของน้ำปนมาด้วย ในทุกสภาวะของการทดลอง คือ จะพบ O - H

stretching ที่ $3200 - 3600\text{ cm}^{-1}$ แล้ว O - H bending ที่ประมาณ 1600 cm^{-1} [21] สำหรับแบนด์ ν_2 ไม่พบ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือดังที่กล่าวมาแล้ว แต่คาดว่าจะเกิดที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่า 400 cm^{-1} เล็กน้อย (แสดงในรูปที่ 2.73 และ 2.74)

ผลการวิเคราะห์โดย SEM และ TEM

ได้มีการสำรวจ morphology ของผงเฟอร์ไรต์โดย SEM ในสารตัวอย่าง CuFe_2O_4 ที่สังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์และจากภาพ SEM (รูปที่ 2.15–2.22) จะแสดง morphology ของสารและขนาดของอนุภาคโดยประมาณ ก่อนการเผาจะเห็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะต่ำกว่า 100 nm (รูปที่ 2.17 และ 2.20) แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิและที่สภาวะที่รีฟลักซ์ 5 ชั่วโมง จะมีลักษณะของอนุภาคที่จับตัวเป็นก้อนใหญ่และเป็นแผ่นซ้อนๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ สำหรับในการสังเคราะห์โดยวิธี solvothermal ที่ pH ต่างๆ เมื่อยังไม่ได้เผาอนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่า 100 nm แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (300°C , 450°C , 600°C , 800°C) จะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจนและเมื่ออุณหภูมิ 600°C และ 800°C สังเกตพบว่า อนุภาคเริ่มหลอมรวมกันและมีลักษณะของความเป็นผลึกดีขึ้น และจากการศึกษาโดยเทคนิค TEM ในบางสภาวะก็ให้ผลที่สอดคล้องกันดี สำหรับในการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 โดยวิธี microwave-hydrothermal เมื่อศึกษา morphology ของสารโดยใช้ TEM จากรูปจะเห็นว่า ผลผลิตที่ได้ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมขนาดนาโนเมตรจำนวนมากและจากการวัดขนาดของอนุภาคจำนวน 500 อนุภาค พบว่ามีกราฟเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ ทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่ 450°C เวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายของอนุภาคเป็นแบบ normal distribution โดยค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคทั้งหมด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่า ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้น เมื่อ pH เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผา (ที่ 450°C , 1 ชั่วโมง) หลังเผาจะมีขนาดใหญ่กว่า สำหรับขนาดของอนุภาคของ CuFe_2O_4 ที่สังเคราะห์โดยวิธี microwave-hydrothermal ยังได้คำนวณโดยใช้ฟังก์ชันของ XRD spectra (311) โดยคำนวณจากสมการ Scherrer's equation[22]

$$B = \lambda k / L \cos\theta$$

โดยที่ λ , θ , L , k และ B หมายถึง wave length ของ Cu $K\alpha$ radiation (0.1542 nm), Bragg's angle, ค่าเฉลี่ยขนาดของผลึก, ค่าคงที่ (0.89) และค่าความกว้างที่กึ่งกลางของฟังก์ชัน (FWHM) ในหน่วยเรเดียน ตามลำดับ จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคจะเพิ่มความ pH ของสารละลายและหลังเผา

จะมีขนาดใหญ่กว่าก่อนเผา (ตารางที่ 2.9) และค่าที่ได้จะต่างจากที่หาจาก TEM เล็กน้อย อาจเนื่องจากค่า k ใน Scherrer equation และการวัดค่า FWHM และอื่นๆ จาก SAED patterns ของอนุภาคที่สังเคราะห์โดยวิธี solvothermal (รูปที่ 2.65 และ 2.66) และที่สังเคราะห์โดยวิธี microwave-hydrothermal ที่สภาวะต่างๆ (รูปที่ 2.75–2.82) จะประกอบด้วยจุดสว่างๆ (bright spots) ที่เรียงเป็นวงกลม โดยอิเล็กตรอนจะสะท้อนและกระจายจากระนาบของผลึกของ unit cells ซึ่งเป็นของผลผลิตทำให้เกิดจุดสว่าง (bright spot) โดยวงแหวน (ring) จะมีลักษณะที่ค่อนข้างแพร่ (diffuse) และกรวง (hollow) แสดงให้เห็นถึงการที่ผลผลิตที่ได้เป็นผลึกที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีการจัดตัวที่ต่างๆ กัน มีการคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ (interplanar spaces) โดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนและเปรียบเทียบกับ JCPDS standard [18] จะพบว่า SAED patterns ของ CuFe_2O_4 ที่สังเคราะห์โดย solvothermal คือ ระนาบ (220), (311), (400), (511), (440) ทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่ 450°C และที่สังเคราะห์โดยวิธี microwave-hydrothermal แล้วเผาที่ 450°C คือระนาบ (111), (220), (311), (400), (422), (511), (440) ซึ่งจะเหมือนกันหมดในทุกสภาวะและสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จาก XRD สำหรับกรณีการสังเคราะห์โดย solvothermal เมื่อนำไปเผาที่ 800°C จากการ interpret SAED pattern ที่สอดคล้องกับรูป TEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของสารที่ได้จะประกอบด้วยผลึกเดี่ยว ซึ่งจากรูปจะเห็นเป็นจุดสว่างหลายๆ จุดและมีการ index ตำแหน่งของจุดให้เห็น (รูปที่ 2.67) [23, 24]

สมบัติแม่เหล็ก (magnetic property)

สมบัติแม่เหล็กสามารถวัดได้จาก vibrating sample magnetometer ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับสาร Cu – ferrite ที่สังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และในรูปที่ 2.23–2.32 ซึ่งแสดง hysteresis curves ในสนามแม่เหล็กที่มี 10 kG ของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์ สำหรับทุกสารตัวอย่างจะแสดง S shape ที่เป็นปกติ (normal S-shape) ขนาดและรูปร่างของ hysteresis curves สำหรับสารแม่เหล็ก พบว่ามีความสำคัญมาก [12] จากการสังเคราะห์โดยวิธีรีฟลักซ์ เมื่อพิจารณาค่า H_{ci} (coercive force) และค่า M_r (remanent magnetization) ก่อนเผาและหลังเผา จะพบว่าหลังเผาที่อุณหภูมิ 900°C ค่า H_{ci} และ M_r จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าหลังเผาอนุภาคมีความเป็นผลึกที่ดีขึ้นกว่าเดิมมาก และรูปร่างของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่สำหรับค่า M_s (saturation magnetization) ซึ่งควรจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าลดลง ในบางสภาวะสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากลักษณะของสารเฟอร์ไรต์นั้นจะถูกอิทธิพลจากการเข้าไป

แทนที่ของแคตไอออนในช่องว่าง (interstitial sites) ของโครงสร้างสปีเนล แม้ว่าโครงสร้างสปีเนลส่วนใหญ่ของเฟอร์ไรท์จะเป็น cubic แต่มีข้อยกเว้น เช่น ในกรณีของ CuFe_2O_4 ซึ่งอาจจะมี unit cell เป็น tetragonal หรือ cubic ขึ้นกับสถานะของการให้ความร้อน กรณีของ tetragonal phase จะเสถียรที่อุณหภูมิห้องและเป็นอินเวอร์ส สปีเนลโดยที่ไอออนของ Fe^{3+} จะเข้าไปครอบครองทั้ง tetrahedral A sites และ octahedral B sites ในปริมาณที่เกือบจะเท่ากัน และไอออนของ Cu^{2+} จะเข้าไปครอบครองเฉพาะ B sites (octahedral sites) เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิด tetragonal distortion ซึ่งเกิดร่วมกับ Jahn – Teller effect จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า Ms ที่ 900°C มีค่าอยู่ในช่วง 25 – 30 emu/g ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น ที่ได้ทำการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 โดยวิธีรีฟลักซ์ แล้วนำไปเผาต่อไปที่ 900°C (โดยที่สารตัวอย่างมีค่าอัตราส่วน lattice parameter ของ $c/a \sim 1.426 - 1.487$) ปรากฏว่าจะได้ค่า Ms ที่สูงสุด 24.1 emu/g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองนี้ [11] ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะมีค่าต่ำกว่าที่มีการรายงานในเอกสารอ้างอิง ซึ่งเป็นไปได้ว่าสาเหตุมาจากเกิดการ distortion ของโครงสร้างไปอย่างมายนั่นเอง นั่นคือการ distortion ของโครงสร้าง CuFe_2O_4 ที่เกิดขึ้น โดยการครอบครองของ cupric ions (Cu^{2+}) ใน octahedral sites แต่ถ้า cupric ions เข้าไปครอบครองใน tetrahedral sites ผลที่ได้จะทำให้เฟอร์ไรท์มีการเกิด tetragonal distortion ที่น้อยลง และจะมีค่า magnetic moment ที่มากขึ้นกว่าเดิม และในกรณีที่มีสิ่งเจือปนอยู่ด้วยเช่น Fe_2O_3 และ CuO อาจทำให้สมบัติแม่เหล็กของสารเหล่านี้ลดลง ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มสมบัติแม่เหล็กในการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 ต้องพยายามสังเคราะห์ CuFe_2O_4 ให้มีโครงสร้างเป็น cubic แทนที่จะเป็น tetragonal [11]

สำหรับการสังเคราะห์ CuFe_2O_4 โดยวิธี solvothermal นั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่า Hci และ Mr มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ 450°C และ 800°C (ตารางที่ 2.4, 2.6 และรูปที่ 2.47 – 2.49 และ 2.68 – 2.70) แต่จะเพิ่มมากขึ้นที่ 800°C เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่และความเป็นผลึกดีขึ้นมาก แต่จะเห็นค่า Ms จะมีแนวโน้มลดลงอย่างมากที่ 800°C ก็อาจจะเนื่องจากการจัดตัวของโครงสร้างที่เกิดการ distortion เป็น tetragonal และเป็นอินเวอร์ส สปีเนลจึงทำให้ค่า Ms ลดลง ดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตาม การที่มีสิ่งเจือปน เช่น CuO และ Fe_2O_3 ในโครงสร้างผลึกเมื่อมีการเผาที่ต่ำกว่า 800°C ก็อาจทำให้สมบัติแม่เหล็กของสารเหล่านี้ลดลงได้เช่นเดียวกัน สำหรับการสังเคราะห์โดยวิธี microwave-hydrothermal นั้น จากการทดลองพบว่า เมื่อ pH เพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนเผากับหลังเผา (450°C) อนุภาคหลังเผาจะมีขนาดใหญ่มากกว่าก่อนเผา (ตารางที่ 2.8, 2.9 และรูปที่ 2.91) ดังนั้นจะเห็นว่า ค่า Hci และ ค่า Mr จะมีค่าเพิ่มตามขนาดของ

อนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และความเป็นผลึกของสารที่ดีขึ้น แต่สำหรับค่า Ms จะเพิ่มตาม pH เมื่อก่อนเผา และเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนเผากับหลังเผา มีแนวโน้มที่ลดลงเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 2.92, 2.93 และ ตารางที่ 2.10) อาจเป็นไปได้ว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงการจัดตัวของแคตไอออนในผลึก หรือมีสิ่งเจือปน เช่น CuO หรือ Fe_2O_3 เจือปนอยู่ด้วย อย่างไรก็ตามจากการสังเคราะห์ในทั้ง 3 วิธีที่กล่าวมา สามารถสังเคราะห์ CuFe_2O_4 ที่มีขนาดนาโนเมตรและไมโครเมตรและมีความบริสุทธิ์สูง ที่มีสมบัติแม่เหล็กที่ดีได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแพทย์และระดับอุตสาหกรรมต่อไป

การนำไปประยุกต์ใช้

สารแม่เหล็กชนิดสปีเนลเฟอร์ไรท์ ที่มีขนาดนาโนเมตร และไมโครเมตร เป็นสารที่มีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้มากมาย ได้แก่ การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เช่น magnetic storage media, noise fillters, electric motors, electric guitar pickups, loudspeakers, automotive และ electronic sensors, actuators, hall effect sensors, magnetron, reed switches, TWT amplifiers, communication, vehicle signage, shelf and bin marking craft, hobby, toys, industrial automation equipment, transformers, rotating transformers, pulse transformers, adsorptive materials, catalysts นอกจากนี้ยังใช้ใน biomedicine และ biotechnology เพื่อเพิ่ม contrast แก่ magnetic resonance imaging และใช้เป็น drug carriers เพื่อใช้สมบัติแม่เหล็ก (magnetic property) นำยาไปยัง specific sites [3,4,12]