

อิทธิพลการเจือคอปเปอร์และแมงกานีสต่อโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็ก ของอนุภาคนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์

The effect of copper and manganese on structural magnetic properties of
cobalt ferrite nanoparticle

อนุชิต ฮันเย็ก^{1*}

Anuchit Hunyek^{1*}

บทคัดย่อ

อนุภาคนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์ ดังสูตร $\text{Co}_{0.9}\text{Me}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (เมื่อ Me: Cu, Mn) ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล ใช้กาว PVA เป็นคิเลตตั้งเองเจนต์ โดยแทนที่โคบอลต์ (Co^{2+}) ด้วยคอปเปอร์ (Cu^{2+}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) เผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ วิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD และหาขนาดผลึกโดยใช้สมการเชอเรอร์ ข้อมูลจาก XRD ของทุกตัวอย่าง พบพีกที่แสดงเฟสของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ในทุกตัวอย่าง โดยมีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 32-45 นาโนเมตร ขณะที่ค่าคงที่แลตทิซและความหนาแน่นของรังสีเอกซ์หาโดยใช้โปรแกรมคำนวณตามวิธีการของเรียทเวลด์ พบว่ามีความผกผันกันเนื่องจากอิทธิพลของรัศมีไอออนิก ส่วนภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการกระจายขนาดที่แคบลง เมื่อมีการเจือด้วยคอปเปอร์และแมงกานีส และการวิเคราะห์กราฟฮีสเทอรีซิสลูปที่วัดด้วย VSM พบว่าการเจือ Cu^{2+} ทำให้แมกนีไทเซชันอิมตัวต่ำลง แต่ค่าลบด้านทางแม่เหล็กและค่าสัดส่วนของค่าแมกนีไทเซชันคงค้างต่อแมกนีไทเซชันอิมตัวมีค่าสูงขึ้น ขณะที่การเจือด้วย Mn^{2+} ทำให้แมกนีไทเซชันอิมตัวมีค่าสูงถึง 80.07 emu/g เนื่องจากความเป็นสปินแม่เหล็กของ Mn^{2+} สูงกว่า Cu^{2+}

คำสำคัญ: โคบอลต์เฟอร์ไรต์ โซล-เจล การเจือ

Abstract

Cobalt ferrite nanoparticles with formula of $\text{Co}_{0.9}\text{Me}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (where Me: Cu, Mn) was synthesized by using PVA glue sol-gel method. The cobalt ion are replaced by copper (Cu^{2+}) and manganese (Mn^{2+}). Metal nitrate were then mixed with PVA glue and sintered at 700 °C in air. Phase identification was performed by XRD techniques and crystallite sizes were obtained by using Scherrer's formula. The XRD data of all sample indicated that single phase of cobalt ferrites nanoparticles with crystallite sizes in the range of 32-45 nm. Lattice parameters (a) and X-ray density (d_x) were calculated by Rietveld refinement. Results inversely displayed between lattice parameters and X-ray density due to difference elements ionic radius. The SEM image showed a narrow size distribution, when doped copper and manganese. The hysteresis loops are measured by VSM; this showed saturation magnetization of

¹ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 77110

¹ Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Prachuap Khiri Khan 77110, Thailand

* Corresponding author. E-mail: ahunyek@gmail.co.th, anuchit.hun@rmutr.ac.th

Cu^{2+} doping was decreased. On the other hand, the coercivity and squareness were increased, the Mn^{2+} doping effect to high saturation magnetization are 80.07 emu/g because spin magnetic of Mn^{2+} higher Cu^{2+} .

Keywords: cobalt ferrite, sol-gel, doping

บทนำ

อนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์ (ferrite nanoparticles) มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่น่าสนใจ สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น แท่งแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กเหลว ตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ระบบนำส่งยาสู่เป้าหมาย ระบบเซนเซอร์ทางชีวภาพ และตัวบันทึกข้อมูลความหนาแน่นสูง (Chinnasamy *et al.*, 2003; Mohamed *et al.*, 2010) เฟอร์ไรต์มีสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปเป็น MeFe_2O_4 โดย Me เป็นไอออนบวกของธาตุโลหะทรานซิชัน เช่น Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+} เป็นต้น โครงสร้างของเฟอร์ไรต์เหล่านี้เป็นแบบอินเวิร์สสปินเนล (inverse spinel) (Huixia *et al.*, 2014) ที่ Fe^{3+} ถูกบรรจุอยู่ในเตตระฮีดรอลไซต์ (A-sites) เพียงอย่างเดียว ส่วนออกตะฮีดรอลไซต์ (B-sites) ถูกบรรจุด้วย Me^{2+} และ Fe^{3+} อยู่ด้วยกัน

โคบอลต์เฟอร์ไรต์ จัดเป็นโครงสร้างแบบอินเวิร์สสปินเนล ที่มีฮิสเทรีซิสลูปแคบ เนื่องจากเกิดการแมกนีไทซ์และดีแมกนีไทซ์ได้ง่ายตามสนามแม่เหล็กภายนอก ค่าลบล้างทางแม่เหล็กสูง ความเสถียรทางกายภาพและทางเคมีดี (Mozaffari *et al.*, 2014) สามารถเจือด้วยธาตุทรานซิชันเพื่อนำไปสู่คุณสมบัติใหม่ๆ ที่น่าสนใจมากขึ้น โดยการเจือคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ในการสังเคราะห์โคบอลต์เฟอร์ไรต์ โดย Balavijayalakshmi และคณะ (2012) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation method) ใช้สารตั้งต้นในกลุ่มคลอไรด์ เผาที่อุณหภูมิ

900 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดผลึกที่คำนวณด้วยสมการของเชอเรอร์ (Scherrer's formula) ดังสมการที่ (1) มีค่าอยู่ในช่วง 37-52 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณสารเจือที่เข้าไปกีดขวางการเติบโตของเกรนในโครงสร้างแม่เหล็กแบบสปินเนล ส่งผลให้สมบัติทางแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดผลึก โดยค่าแมกนีไตเซชันอิ่มตัว และค่าลบล้างทางแม่เหล็กลดลง เมื่อปริมาณของ Cu^{2+} เพิ่มขึ้น

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta_B} \quad (1)$$

เมื่อ λ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

β full width at half maximum (FWHM)

ขณะที่ Mozaffari และคณะ (2014) ได้ผสมนิกเกิลไอออน (Ni^{2+}) ลงในโคบอลต์เฟอร์ไรต์ ใช้สารตั้งต้นในกลุ่มไนเตรต เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล มีกรดซิตริก (citric acid) เป็นคีเลตตั้งเเจลเจนต์ เผาที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วคำนวณขนาดผลึกด้วยสมการของเชอเรอร์ได้เป็น 30 นาโนเมตร ค่าแมกนีไตเซชันอิ่มตัว และค่าลบล้างทางแม่เหล็กลดลง เมื่อสัดส่วนของนิกเกิลเพิ่มขึ้น

จากผลการวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นการเจือด้วยไอออนของธาตุทรานซิชัน ทำให้ค่าแมกนีไตเซชันอิ่มตัว และค่าลบล้างทางแม่เหล็กลดลง ดังนั้นการสังเคราะห์โคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่เจือคอปเปอร์และแมงกานีส ซึ่งมีสภาพเป็นไดอะแมกนีติกและ

นอนแมกนีติก (Mozaffari *et al.*, 2014) ตามลำดับเข้าไปแทนที่โคบอลต์ตามสัดส่วน $\text{Co}_{0.9}\text{Me}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (Me: Cu, Mn) ด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาต่ำ แต่มีประสิทธิภาพสูง ในการสังเคราะห์สาร ที่ต้องการความบริสุทธิ์มาก (Sajja *et al.*, 2014) ใช้กาบน้ำที่ผลิตจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA glue) ซึ่งหาซื้อได้ตามร้านค้าทั่วไปและราคาถูกเป็นเลิศตั้งเอเจนต์และใช้สารตั้งต้นในกลุ่มไนเตรท เพื่อปรับปรุงสมบัติแม่เหล็กของโคบอลต์เฟอร์ไรต์จะทำให้ได้เฟสของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่สมบูรณ์ มีค่าลบล้างทางแม่เหล็กและสัดส่วนของค่าแมกนีโตเซชันคงค้างต่อแมกนีโตเซชันอิ่มตัว (squareness) เปลี่ยนแปลงไป

วิธีการศึกษา

สังเคราะห์โคบอลต์เฟอร์ไรต์และโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือ ด้วยวิธีโซล-เจล (Hunyek *et al.*, 2011) โดยการเติมโคบอลต์ไนเตรท ไอรอนไนเตรท และคอปเปอร์ไนเตรท (หรือแมงกานีสไนเตรท) ตามสูตร $\text{Co}_{0.9}\text{Me}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (Me: Cu, Mn) ลงในกาบน้ำ กวนทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียสจนได้ผลิตภัณฑ์ที่แห้งสนิท นำเจลที่แห้งสนิท เมาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผง 3 ตัวอย่าง คือ โคบอลต์เฟอร์ไรต์ปราศจากการเจือ (CFO) โคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือคอปเปอร์ (CCFO) และโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือแมงกานีส (CMFO) นำมาบดละเอียด แล้วนำไปหา XRD pattern ด้วยเครื่อง XRD เพื่อวิเคราะห์เฟส โดยพิกสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถคำนวณขนาดผลึก

(crystallite sizes) โดยใช้สมการของเชอเรอร์ ดังสมการที่ (1) ขณะที่ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice parameters) และความหนาแน่นรังสีเอกซ์ (X-ray density) สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการของเรียทเวลด์ (Rietveld method) ผ่านโปรแกรม PANalytical X'Pert high score plus ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์กราฟฮิสเทอรีซิสลูปที่ได้จากเครื่อง VSM เพื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. วิเคราะห์เฟสที่จากเครื่อง XRD

วิเคราะห์เฟสสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตาม (Figure 1) สามารถเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (JCPDS 22-1086) ว่าเกิดเฟสโคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปีเนลลูกบาศก์ในทุกตัวอย่าง โดยพิกที่มุม 2θ 30.1, 35.4, 37.0, 43.0, 53.4, 56.9 และ 62.6 องศา สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนจากระนาบ (220) (311) (222) (400) (422) (511) และ (440) ตามลำดับ โดยไม่ปรากฏพิกที่แสดงถึงการเจือปนของเฟสอื่นๆ จึงประเมินเบื้องต้นได้ว่า ผลิตภัณฑ์กาบน้ำ มีโครงข่ายแบบสามมิติและความเข้มข้นของเจลเพียงพอสำหรับใช้สังเคราะห์โคบอลต์เฟอร์ไรต์ได้ โดยทำหน้าที่ควบคุมระยะห่างและปริมาตรว่างภายในเจล ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและช่วยปรับปรุงความเป็นผลึกและสร้างองค์ประกอบของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่สมบูรณ์ หากโครงข่ายแบบสามมิติและความเข้มข้นของเจลไม่เหมาะสม จะทำให้ปรากฏเฟสเจือปน อย่างไอรอนออกไซด์หรือฮิมาไตต์ซีน (Hunyek *et al.*, 2012) สอดคล้องกับงานของ Raut

และคณะ (2014) ที่ปรากฏเพียงพีคของโคบอลต์เฟอร์ไรต์เพียงอย่างเดียวแม้จะมีการเจือด้วย Zn^{2+} ลงไปด้วย ขนาดอนุภาคที่คำนวณได้ อยู่ในช่วง 32-45 นาโนเมตรดัง (Table 1) และการเจือทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงและเล็กที่สุดในกรณีการเจือด้วย Cu^{2+} สอดคล้องกับภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Figure 3) ขณะที่ค่าคงที่แลตทิซ (a) และความหนาแน่นรังสีเอกซ์ (d_x) เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (JCPDS 22-1086) สำหรับโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (Space group: Fd_3m) มีค่า เป็น $a = 8.391$ และ $d_x = 5.274$ ตามลำดับ จาก (Figure 2) พบว่าค่าคงที่แลตทิซของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CFO) มีค่าสูงกว่าฐานข้อมูลอยู่ 0.003 และ 0.070 และค่าจะลดลงเมื่อ

มีการเจือคอปเปอร์ (CCFO) และแมงกานีส (CMFO) สามารถอธิบายได้ด้วยรัศมีไอออนิกที่เล็กกว่าของ Cu^{2+} ($0.73 \text{ \AA}$) (Sanpo *et al.*, 2013) และ Mn^{2+} ($0.66 \text{ \AA}$) (Koseoglu *et al.*, 2012) เมื่อเทียบกับของ Co^{2+} ($0.78 \text{ \AA}$) (Adeela *et al.*, 2015) ขณะที่ความหนาแน่นรังสีเอกซ์ (ความหนาแน่นของผลึก) มีค่าผกผันกับค่าคงที่แลตทิซ สอดคล้องกับงานของ Adeela และคณะ (2015) เนื่องจากรัศมีไอออนิกของ Cu^{2+} และ Mn^{2+} ที่มีขนาดเล็กกว่า เข้าไปแทนที่ Co^{2+} ในยูนิตเซลล์ (unit cell) แล้ว จะทำให้ค่าคงที่แลตทิซ ที่หมายรวมถึงระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซ ซึ่งใช้ในการคำนวณหาปริมาตรลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ความหนาแน่นหาได้จากสัดส่วนของมวลต่อปริมาตร)

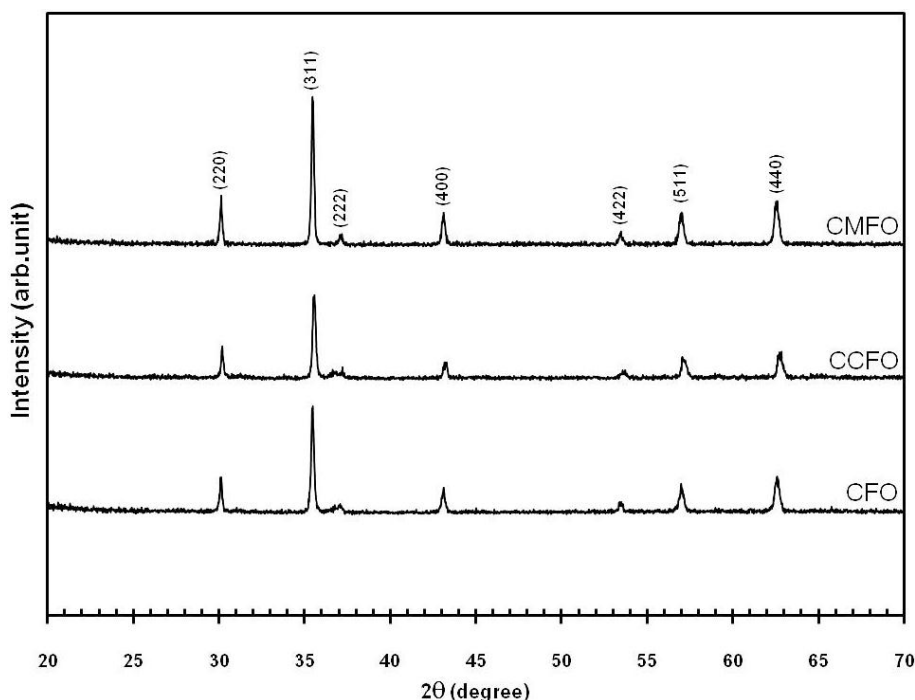


Figure 1 XRD pattern of the samples.

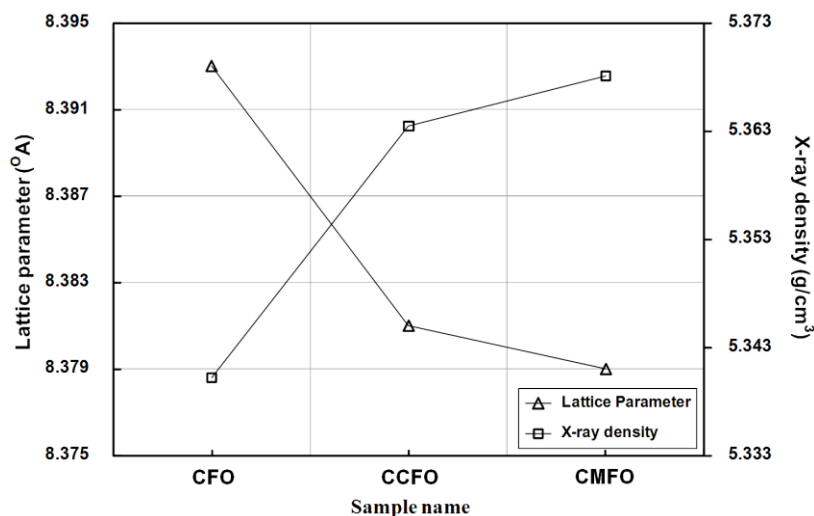


Figure 2 Lattice parameter and X-ray density of samples.

2. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการถ่ายภาพอนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CFO) อนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือคอปเปอร์ (CCFO) และอนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือ

แมงกานีส (CMFO) ที่สังเคราะห์ตามสูตรสัดส่วนข้างต้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้ทราบถึงลักษณะภาพร่างและขนาดอนุภาคที่สามารถสังเกตได้จาก (Figure 3)

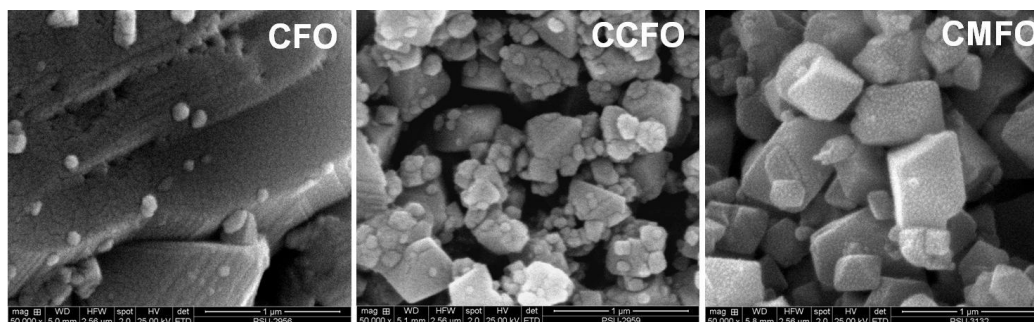


Figure 3 SEM images of the samples.

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายประมาณ 50,000 เท่า พบการยึดเกาะกันของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน ที่เรียกว่า คลัสเตอร์ ลักษณะเป็นรูปทรงเหลี่ยมหลายหน้า สังเกตเห็นการกระจายขนาดอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร ในแต่ละตัวอย่าง และสามารถสังเกต

แนวโน้มการกระจายขนาดแคบลงในตัวอย่างที่เจือคอปเปอร์ (CCFO) และแมงกานีส (CMFO) ต่างกับกรณีที่ปราศจากการเจือ (CFO) ที่สามารถเห็นแนวโน้มขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า บ่งชี้ว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของโคบอลต์เฟอร์ไรต์มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับการเจือ นั่นคือการเจือคอปเปอร์และ

แมงกานีสนำไปสู่การเกาะกันของอนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่น้อยลง ขนาดกลุ่มอนุภาคที่สังเกตได้จาก SEM มีค่าต่ำกว่า 200 นาโนเมตร ต่างจากขนาดผลึกที่คำนวณได้จากพีคของ XRD pattern เนื่องจากการเกาะกันเป็นกลุ่มของผลึก (Aswani *et al.*, 2014) การเกาะกันของอนุภาคมีสาเหตุจากอันตรกิริยาของแม่เหล็กสถิต (Reddy *et al.*, 2015) และผลจากการบิดเชิงกล (Gafoor and Ravinder, 2014) ในแต่ละตัวอย่าง โดยสามารถสังเกตเห็นขอบและพื้นผิวที่

ชัดเจน จากภาพถ่ายซึ่งการก่อตัวของคลัสเตอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคัลเลอติงเอเจนต์ในปฏิกิริยาโซล-เจลเริ่มลดลง (Ahmad *et al.*, 2013)

3. ผลการวัดฮิสเทอรีซิสลูป

กราฟฮิสเทอรีซิสลูปของผงโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CFO) และผงโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือคอปเปอร์ (CCFO) และแมงกานีส (CMFO) วัดด้วยเทคนิค VSM แสดงดัง (Figure 4) และสรุปผลใน (Table1)

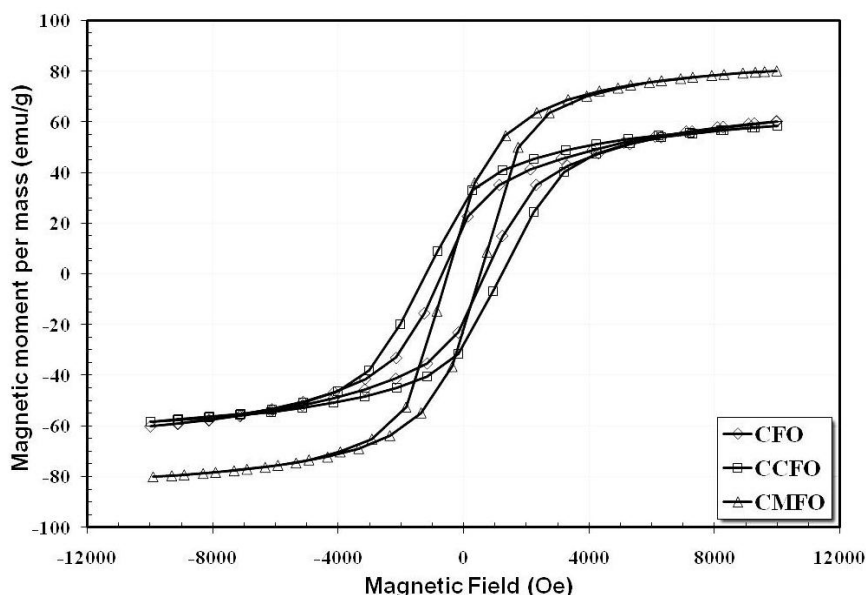


Figure 4 Hysteresis loops of the samples.

Table 1 Crystallite sizes and magnetic properties of the samples.

sample	crystallite size (nm)	saturation magnetization (emu/g)	coercivity (Oe)	squareness
CFO	44.86	60.09	641	0.32
CCFO	32.45	58.22	1156	0.50
CMFO	39.07	80.07	565	0.31

พิจารณาสมบัติเชิงแม่เหล็กของสารตัวอย่าง (Table 1) โดยวิเคราะห์ค่าที่ได้จากกราฟฮิสเทอรีซิส ลูป ของเครื่อง VSM กอปรกับลักษณะพืดจากการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่บอกเฟสแม่เหล็ก และ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าลักษณะของกราฟ ฮิสเทอรีซิส ลูป ที่บอกถึงสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์ริ (Rakshit *et al.*, 2015) จากการเกาะกันเป็นคลัสเตอร์ (cluster) ของแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่สามารถเห็นใน (Figure 3) โดยไอออนชนิดต่างๆ มีผลรวมของ โมเมนต์แม่เหล็กเชิงสปิน (spin magnetic moment) กับโมเมนต์แม่เหล็กเชิงออร์บิทัล (Orbital magnetic moment) หรือเรียกอีกชื่อว่า บอห์รแมกนีตอน (Bohr magneton, μ_B) แตกต่างกัน เมื่อมีการให้ สนามแม่เหล็กภายนอก ไอออนของธาตุแต่ละชนิดใน สารตัวอย่างจะมีการตอบสนองแตกต่างกัน จนมี สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์ริ ที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก สุทธิในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง ของค่าแมกนีโตเซชันอิมิตัวโดยผลจากกราฟแสดงให้ เห็นว่าการเจือ Cu^{2+} ทำให้แมกนีโตเซชันอิมิตัวมีค่าต่ำกว่า โคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่ปราศจากการเจือไม่มากนัก แต่ค่าลบบ้างทางแม่เหล็กและ squareness กลับมีค่า สูงขึ้น ขณะที่การเจือด้วย Mn^{2+} ทำให้แมกนีโตเซชัน อิมิตัวมีค่าสูงถึง 80.07 emu/g สอดคล้องกับงานของ Koseoglu และคณะ (2012) ที่เจือแมงกานีส เนื่องจากความเป็นสปินของ Mn^{2+} สูง (5 B.M.) และ สูงกว่า Cu^{2+} (1 B.M.) ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) (Chakrabarty *et al.*, 2015)

$$\mu_B = \frac{M \times M_s}{5585} \quad (2)$$

เมื่อ μ_B คือ บอห์รแมกนีตอน (หน่วยเป็น B.M.)
 M_s คือ แมกนีโตเซชันอิมิตัว
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสาร

ดังนั้นการเจือไอออนที่มีค่าบอห์รแมกนีตอน แตกต่างกันทำให้เกิดความไม่แน่นอนของโมเมนต์ แม่เหล็กสุทธิ เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่าง A ไซด์กับ B ไซด์ ด้วยออกซิเจนมีการบิดเบี้ยว อันตรกิริยาทาง แม่เหล็กลดลง และเกิดความไม่เป็นระเบียบของสปิน (Jadhav *et al.*, 2015) ซึ่งโดยธรรมชาติ Cu^{2+} จะมี สภาวะแม่เหล็กแบบไดอาแมกนีติก (diamagnetism) หากเป็นการฟอร์มตัวเป็นคอปเปอร์เฟอร์ไรต์ (copper ferrite) จะทำให้ได้ค่าลบบ้างทางแม่เหล็กที่ต่ำ (Muthurani *et al.*, 2010) แต่งานวิจัยนี้แสดงให้เห็น ว่าการเจือคอปเปอร์ทำให้ค่าลบบ้างทางแม่เหล็กของ โคบอลต์เฟอร์ไรต์สูงขึ้น สอดคล้องกับงานของ Balavijayalakshmi และคณะ (2012) ที่เจือคอปเปอร์ใน โคบอลต์เฟอร์ไรต์ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลง ของโครงสร้างโดเมน (domain structure) ขนาด และ anisotropy ของผลึก การเจือด้วย Cu^{2+} ทำให้ได้ค่า ลบบ้างทางแม่เหล็กสูงกว่าการเจือด้วย Mn^{2+} ส่วนค่า squareness ของการเจือ Cu^{2+} บ่งชี้ว่าฮิสเทอรีซิส ลูป กว้างขึ้น

สรุป

จากพืดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ปรากฏ เพียงพืดที่คมชัดของเฟสโคบอลต์เฟอร์ไรต์ แสดงให้ เห็นว่ากาวน้ำ PVA ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะใช้เป็นตัวเคลือบเจือได้ และขนาดผลึกอยู่ในช่วง 32-45 นาโนเมตร บ่งชี้ว่า

การเจือทำให้ขนาดผลึกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารเจือเข้าไปขัดขวางการเติบโตของเกรนแม่เหล็ก โดยการเจือคอปเปอร์และแมงกานีส ทำให้ค่าคงที่แลตทิซลดลงตรงข้ามกับค่าความหนาแน่นรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถสังเกตการกระจายขนาดที่แคบลง เมื่อมีการเจือคอปเปอร์และแมงกานีส ขณะที่กราฟฮิสเทอรีซิสลูป แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าแม่เหล็กอิ่มตัว ค่าลบล้างทางแม่เหล็ก และการเจือคอปเปอร์ทำให้ฮิสเทอรีซิสลูปกว้างขึ้นมากกว่าการเจือแมงกานีส

ในการวิจัยครั้งต่อไปจะศึกษาคุณสมบัติการเชื่อมระหว่างธาตุทรานซิชันหลากหลายชนิด โดยจะนำอิทธิพลของคิเลตติ้งเอเจนต์ชีวภาพ ที่ได้จากผลผลิตทางเกษตรภายในประเทศ เข้ามาเป็นปัจจัยในการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของโคบอลต์เฟอร์ไรต์หรือสารแม่เหล็กชนิดอื่นๆ ด้วยเพื่อเพิ่มการมีทางเลือกสำหรับเทคนิคการสังเคราะห์สารแม่เหล็กที่หลากหลายมากขึ้น

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประจำปี 2558 ภายใต้เลขที่สัญญา Inno002/2558

เอกสารอ้างอิง

- Adeela, N. K. Maaz, U. Khan, S. Karim, A. Nisar, M. Ahmad, G. Ali, X.F. Han, J.L. Duan and J. Liu. 2015. Influence of manganese substitution on structural and magnetic properties of CoFe_2O_4 nanoparticles. *J. Alloys Compd.* 639: 533-540.
- Ahmad, I., T. Abbas, M.U. Islam and A. Maqsood. 2013. Study of cation distribution for Cu-Co nanoferrites synthesized by sol-gel method. *Ceram. Int.* 39: 6735-6741.
- Aswani, T., V.P. Manjari, B. Babu, Sk.M. Begum, G.R. Sundari, K. Ravindranadh and R.V.S.S.N. Ravikumar. 2014. Spectral characterization of undoped and Cu^{2+} doped CdO nanopowder. *J. Mol. Struct.* 1063: 178-183.
- Balavijayalakshmi, J., N. Suriyanarayanan and R. Jayaprakash. 2012. Influence of copper on the magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles. *Mater. Lett.* 81: 52-54.
- Chakrabarty, S., A. Dutta and M. Pal. 2015. Enhanced magnetic properties of doped cobalt ferrite nanoparticles by virtue of cation distribution. *J. Alloys Compd.* 625: 216-223.
- Chinnasamy, M., M. Senoue, B. Jeyadevan, O.P. Perez, K. Shinoda and K. Tohji. 2003. Synthesis of size-controlled cobalt ferrite particles with high coercivity and squareness ratio. *J. Colloid Interface Sci.* 263: 80-83.
- Gafoor, A. and D. Ravinder. 2014. Characterization of nano-structured nickel-cobalt ferrites synthesized by citrate-gel auto combustion method. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 4: 73-79.

- Huixia, F., C. Baiyi, Z. Deyi, Z. Jianqiang and T. Lin. 2014. Preparation and characterization of the cobalt ferrite nano-particles by reverse coprecipitation. *J. Magn. Magn. Mater.* 356: 68-72.
- Hunyeek, A., C. Sirisathitkul and P. Harding. 2011. Formation of cobalt ferrites from aqueous solutions of metal nitrates containing PVA: effects of the amount of PVA and annealing temperature. *J. Ceram. Soc. Jpn.* 119: 541-543.
- Hunyeek, A., C. Sirisathitkul, P. Harding and D.J. Harding. 2012. Structural and magnetic properties of cobalt ferrite synthesized using sol-gel techniques. *Mater Sci-Poland.* 30: 278-281.
- Jadhav, P., K. Patankar, V. Mathe, N.L. Tarwal, J.H. Jang and V. Puri. 2015. Structural and magnetic properties of $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2-2x}\text{Cu}_x\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrites prepared via solution combustion route. *J. Magn. Magn. Mater.* 385: 160-165.
- Koseoglu, Y., F. Alan, M. Tan, R. Yilgin and M. Ozturk. 2012. Low temperature hydrothermal synthesis and characterization of Mn doped cobalt ferrite nanoparticles. *Ceram. Int.* 38: 3625-3634.
- Mozaffari, M., J. Amighian and E. Darsheshdar. 2014. Magnetic and structural studies of nickel-substituted cobalt ferrite nanoparticles, synthesized by the sol-gel method. *J. Magn. Magn. Mater.* 350: 19-22.
- Muthurani, S., M. Balaji, S. Gautam, K.H. Chae, J.H. Song, D.P. Padiyan and K. Asokan. 2010. Magnetic and humidity sensing properties of nanostructured $\text{Cu}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ synthesized by auto combustion technique. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11: 5850-5855.
- Mohamed, R.M., M.M. Rashad, F.A. Haraz and W. Sigmund. 2010. Structure and magnetic properties of nanocrystalline cobalt ferrite powders synthesized using organic acid precursor method. *J. Magn. Magn. Mater.* 322: 2058-2064.
- Rakshit, R., M. Pal, M. Mandal and K. Mandal. 2015. Charge transfer mediated magnetic response of cobalt ferrite nanoparticles. *Mater. Lett.* 151: 64-67.
- Raut, A.V., R.S. Barkule, D.R. Shengule and K.M. Jadhav. 2014. Synthesis, structural investigation and magnetic properties of Zn^{2+} substituted cobalt ferrite nanoparticles prepared by the sol-gel auto-combustion technique. *J. Magn. Magn. Mater.* 87-92: 358-359.
- Reddy, Ch.V., C. Byon, B. Narendra, D. Baskar, G. Srinivas, J. Shim and S.V.P. Vattikuti. 2015. Investigation of structural, thermal and magnetic properties of cadmium substituted cobalt ferrite nanoparticles. *Superlattices Microstruct.* 82: 165-173.
- Sajjia, M., M. Oubaha, M. Hasanuzzaman and A.G. Olabi. 2014. Developments of cobalt ferrite nanoparticles prepared by the sol-gel process. *Ceramics International.* 40: 1147-1154.
- Sanpo, N., C.C. Berndt, C. Wen and J. Wang. 2013. Transition metal-substituted cobalt ferrite nanoparticles for biomedical applications. *Acta Biomater.* 9: 5830-5837.