

การใช้ผงหมึกเหลือใช้ทดแทนสารตั้งต้นผง Fe_2O_3 เพื่อการสังเคราะห์

$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาแคลไซน์

Using waste toner instead of Fe_2O_3 powder as a precursor for synthesizing

$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite by the calcination method

อังทีณี กิตติรวีโชติ (Aungtinee Kittiravechote) E-mail: aungtinee.ki@bsru.ac.th¹

สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล (Sunisa Jitsoontornchaiyakul) E-mail: sunisa.ji@bsru.ac.th²

อนุวัฒน์ หัสดี (Anuwat Hassadee) E-mail: anuwat.ha@bsru.ac.th^{3*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

(Program of General Science, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University)

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอัจฉริยะ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

(Programs of Smart Technology, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University)

³สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

(Program of Physics, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University)

*Corresponding Author. E-mail : anuwat.ha@bsru.ac.th

(Received: 23 January 2024 ; Revised: 13 May 2024 ; Accepted: 14 May 2024)

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ จากผงหมึกเหลือใช้โดยวิธีการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้น NiO ZnO และผงหมึกเหลือใช้ตามสัดส่วนโดยโมล ($\text{NiO} : \text{ZnO} : \text{ผงหมึกเหลือใช้}$ คือ 0.5 : 0.5 : 1) ที่อุณหภูมิห้อง และ $1,100^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง เมื่อทำการทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ $1,100^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกของ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ แบบคิวบิกสปินเนล โดยมีค่าคงที่แลตทิซ (a) เท่ากับ $8.21 \text{ \AA}$ และมีขนาดผลึกเฉลี่ย (D_{XRD}) เท่ากับ 11.87 nm และเมื่อทำการทดสอบสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุด้วยเครื่องทดสอบความเป็นแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) พบว่า $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง มีสมบัติแม่เหล็กแบบชั่วคราว โดยมีค่าการอิ่มตัวทางแม่เหล็กของวัสดุ (M_s) เท่ากับ 16 emu/g ค่าคงค้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ (M_r) เท่ากับ 0.03 emu/g และค่าลบล้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ (H_c) เท่ากับ 7 Oe จากสมบัติทางโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแม่เหล็กของ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าเป็นสมบัติที่ดีในกลุ่มของวัสดุแม่เหล็กแบบชั่วคราว ดังนั้นจึงสามารถนำผงหมึกเหลือใช้มาเป็นสารตั้งต้นทดแทน Fe_2O_3 ได้

คำสำคัญ : ผงหมึกเหลือใช้ ; Fe_2O_3 ; นิกเกิลซิงค์เฟอร์ไรต์ ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ; แคลไซน์

Abstract

$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite was synthesized using the calcination method, employing waste toner as a precursor along with NiO and ZnO, in a molar ratio ($\text{NiO} : \text{ZnO} : \text{waste toner} = 0.5 : 0.5 : 1$). The synthesis was conducted at room temperature and $1,100^\circ\text{C}$ for 2 hours. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed the formation of a cubic spinel crystal structure of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite at $1,100^\circ\text{C}$ for 2 hours, with a lattice constant (a) of $8.22 \text{ \AA}$ and an average crystallite size (D_{XRD})

of 11.87 nm. Vibrating sample magnetometer (VSM) analysis indicated that the $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite exhibited temporary magnetic properties, with a saturation magnetization (M_s) of 16 emu/g, a remanent magnetization (M_r) of 0.03 emu/g, and a coercivity (H_c) of 7 Oe. The results suggest that the synthesized $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite possesses desirable properties for temporary magnetic applications, indicating that waste toner can effectively substitute for Fe_2O_3 in the synthesis process.

Keywords : waste toner ; Fe_2O_3 ; nickel zinc ferrite ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ; calcination

บทนำ

สารประกอบแม่เหล็ก Ni-Zn เฟอร์ไรต์ หรือ $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีความสำคัญอย่างมากในการใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง แกนหม้อแปลงไฟฟ้า (Shahane, et al., 2010) จึงมีการนำ $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์มาสู่การวิจัยโดยพบว่าปริมาณที่ส่งผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็กที่ดีที่สุดอยู่ที่ $x = 0.5$ หรือ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ (Hwang, et al., 2020) เนื่องจากให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดชั่วคราว (soft magnetic materials) ที่ดี คือ มีค่าการอิ่มตัวทางแม่เหล็กของวัสดุ (saturation magnetization, M_s) ที่สูง ค่าคงค้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ (remanence, M_r) ที่ต่ำ และค่าลบค้างความเป็นแม่เหล็ก (coercivity, H_c) ที่ต่ำ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานด้านความถี่สูง โดยมีการสังเคราะห์สารแม่เหล็ก $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ หลากหลายวิธี (Chen & Gu, 2012) เช่น วิธีตกตะกอนร่วม โซล-เจล การเผาแคลไซน์ หรือ กระบวนการทางเซรามิกโดยการเผาปิตนิกที่อุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการเผาแคลไซน์เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถผลิตสารตัวอย่างได้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาแคลไซน์จะมีการใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ คือ NiO, ZnO และ Fe_2O_3 ในสัดส่วนโดยโมล โดยในงานวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกผงหมึกเหลือใช้ (waste toner) จากตลับหมึกเครื่องปริ้นเลเซอร์ มาเป็นสารตั้งต้นทดแทนการใช้ Fe_2O_3 เนื่องจากในผงหมึกเหลือใช้มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก (เกศริน มีมล และ อนุวัฒน์ หัสดี, 2561) และปริมาณของการใช้ตลับหมึกชนิดนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์และรักษาสีสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผงหมึกเหลือใช้ในตลับหมึกมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 200 นาโนเมตร) อันจะนำไปสู่มลพิษทางอากาศหากปล่อยเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงได้นำผงหมึกเหลือใช้ดังกล่าวมาทำซ้ำให้เกิดประโยชน์มากขึ้นโดยใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์

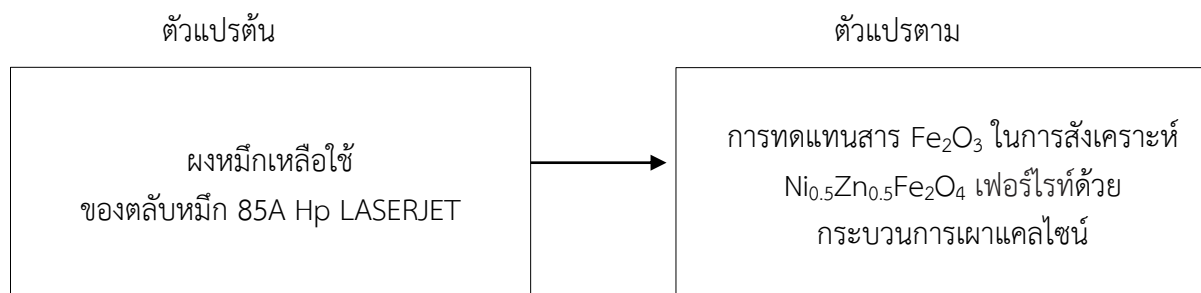
วัตถุประสงค์การวิจัย

- ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแม่เหล็กของผงหมึกเหลือใช้เพื่อทดแทนสาร Fe_2O_3 ในการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ด้วยกระบวนการเผาแคลไซน์

สมมติฐานในการวิจัย

- ผงหมึกเหลือใช้สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นทดแทนสาร Fe_2O_3 ในการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ด้วยกระบวนการเผาแคลไซน์

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ระเบียบวิธีการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์ผง Fe_2O_3 จากผงหมึกเหลือใช้

นำผงหมึกเหลือใช้จากตลับ 85A Hp LASERJET ลงในถ้วยเผาอะลูมินาแล้วนำไปเผาที่เตาเผา รุ่น AAF 1100 ยี่ห้อ CAR BOLITE ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง ในชั้นบรรยากาศปกติ จากนั้นนำสารที่ได้มา บดให้ละเอียดจะได้ผง Fe_2O_3 ตามรูปภาพที่ 1 จากกระบวนการเผาแคลไซน์ข้างต้นจะทำให้ผงหมึกเหลือใช้ กลายเป็น Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 10 โดยมวลเทียบกับปริมาณผงหมึกก่อนเผาแคลไซน์ และอยู่ในเฟสของ โครงสร้างผลึกของ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (α -magnetite) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 โดยมวลเทียบกับปริมาณของผลที่ผ่าน กระบวนการเผาแคลไซน์ที่ $1,100^\circ\text{C}$ (เกศริน มีมล และ อนุวัฒน์ หัสดี, 2561) จากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถ สังเคราะห์ Fe_2O_3 จากผงหมึกเหลือใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมต่อการเป็นสารตั้งต้นในการนำไป สังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอไรต์



รูปภาพที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผง Fe_2O_3

ที่มา : ผู้วิจัย, 2566

ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์ผง $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์

นำผงของสารตั้งต้น NiO , ZnO , Fe_2O_3 โดยสารตั้งต้นผง Fe_2O_3 ได้มาจากขั้นตอนที่ 1 มาซึ่งมวลสารในอัตราส่วน 0.5 : 0.5 : 1 ตามสัดส่วนโดยโมล โดยกำหนดปริมาณของสารตั้งต้นรวมกันในการสังเคราะห์ไว้ที่ 30 กรัม เพื่อเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ($\text{NiO} : \text{ZnO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 4.71 : 5.14 : 20.15 กรัม) เมื่อได้มวลสารที่ต้องการแล้ว นำมาผสมกันโดยผสมด้วยน้ำเปล่า 500 ml แล้วปั่นนาน 10 นาที เพื่อให้สารตั้งต้นทั้ง 3 มีการกระจายตัวเข้ากันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปประเหยแห้งด้วยการให้ความร้อน 200°C เพื่อไล่น้ำออกจนหมด หลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด แล้วนำไปเผาด้วยกระบวนการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง ที่บรรยากาศปกติ จากนั้นนำสารที่ได้จากกระบวนการเผาแคลไซน์แล้วมาบดให้ละเอียดอีกครั้งด้วยโกร่งเซรามิกเพื่อให้ได้ผง $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ (จำนวน 28 กรัม) ตามรูปภาพที่ 2 จากนั้นนำผง $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ไปทดสอบโครงสร้างและขนาดผลึกด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD (X-ray diffractometer, Bruke, D8) และวิเคราะห์ความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องทดสอบความเป็นแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น VSM (vibrating sample magnetometer) ต่อไป



รูปภาพที่ 2 การสังเคราะห์ผง $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์

ที่มา : ผู้วิจัย, 2566

การทดสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, Bruke, D8) พิจารณาค่าของชนิดผลึก ค่าคงที่ของแลตทิซ และค่าขนาดผลึก (Srinivas et al., 2015)

การหาค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing), λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ $\text{Cu}_{\text{K}\alpha} = 1.504 \text{ \AA}$, a คือ ค่าคงที่ของแลตทิซ (lattice constant) และ h, k, l คือ ดัชนีระนาบผลึก

การหาขนาดผลึกตามสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation)

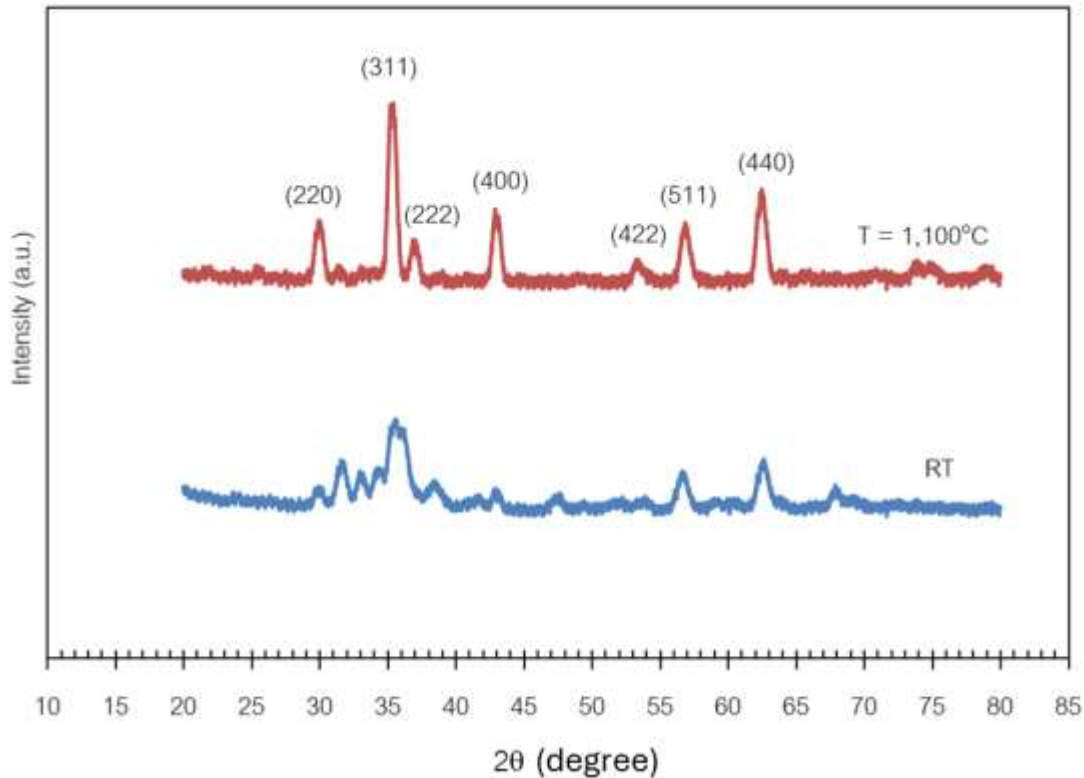
$$D_{XRD} = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

เมื่อ D_{XRD} คือ ขนาดผลึก, λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ $\text{Cu}_K\alpha = 1.504 \text{ \AA}$, β คือ full width half maximum (FWHM), และ θ คือ มุมของแบรกก (Bragg's angle)

ผลการวิจัย

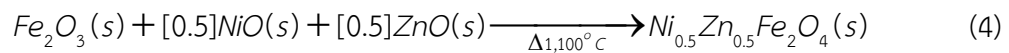
สมบัติทางด้านโครงสร้างผลึก

หลังจากกระบวนการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ในขั้นตอนที่ 2 ด้วยกระบวนการเผาแคลไซน์ นำมาทดสอบสมบัติทางด้านโครงสร้างผลึกด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (220) (311) (222) (400) (422) (511) และ (440) เมื่อพิจารณาระนาบทั้งหมดแล้ว พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ คิวบิกสปินเนล (cubic spinel) ตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS PDF #52-0278 (Verma, et al., 2011) เนื่องจากปรากฏระนาบของผลึก (311) โดยพบว่ามีระนาบผลึก (311) มีค่าขนาดผลึกเท่ากับ 11.68 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rao, et al., 2006 โดยมีค่าคงที่แลตทิซเฉลี่ย (Lattice constant) เท่ากับ $8.21 \text{ \AA}$ โดยใช้หลักการของแบรกก (Bragg 's law) และมีขนาดผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 11.87 nm โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivas et al., 2015 ที่สังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ที่มีขนาด 10.6 nm ดังรูปภาพที่ 3 และ ตารางที่ 1

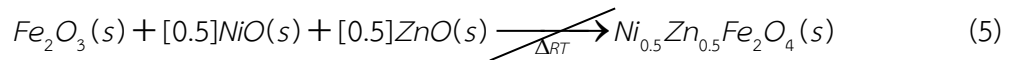


รูปภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง
ที่มา : ผู้วิจัย, 2566

ในกระบวนการเปลี่ยนเฟสของสารตั้งต้นเป็น $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ตามสมการที่ 4



เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของการสังเคราะห์ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิห้องไม่สอดคล้องกับค่ามาตรฐาน จึงกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิห้องยังไม่สามารถเปลี่ยนเฟสของสารตั้งต้นทั้ง 3 ตัว คือ NiO ZnO และ Fe_2O_3 (ที่มาจากผงหมึกเหลือใช้) ให้เป็น Ni-Zn เฟอร์ไรต์ ดังสมการที่ 5



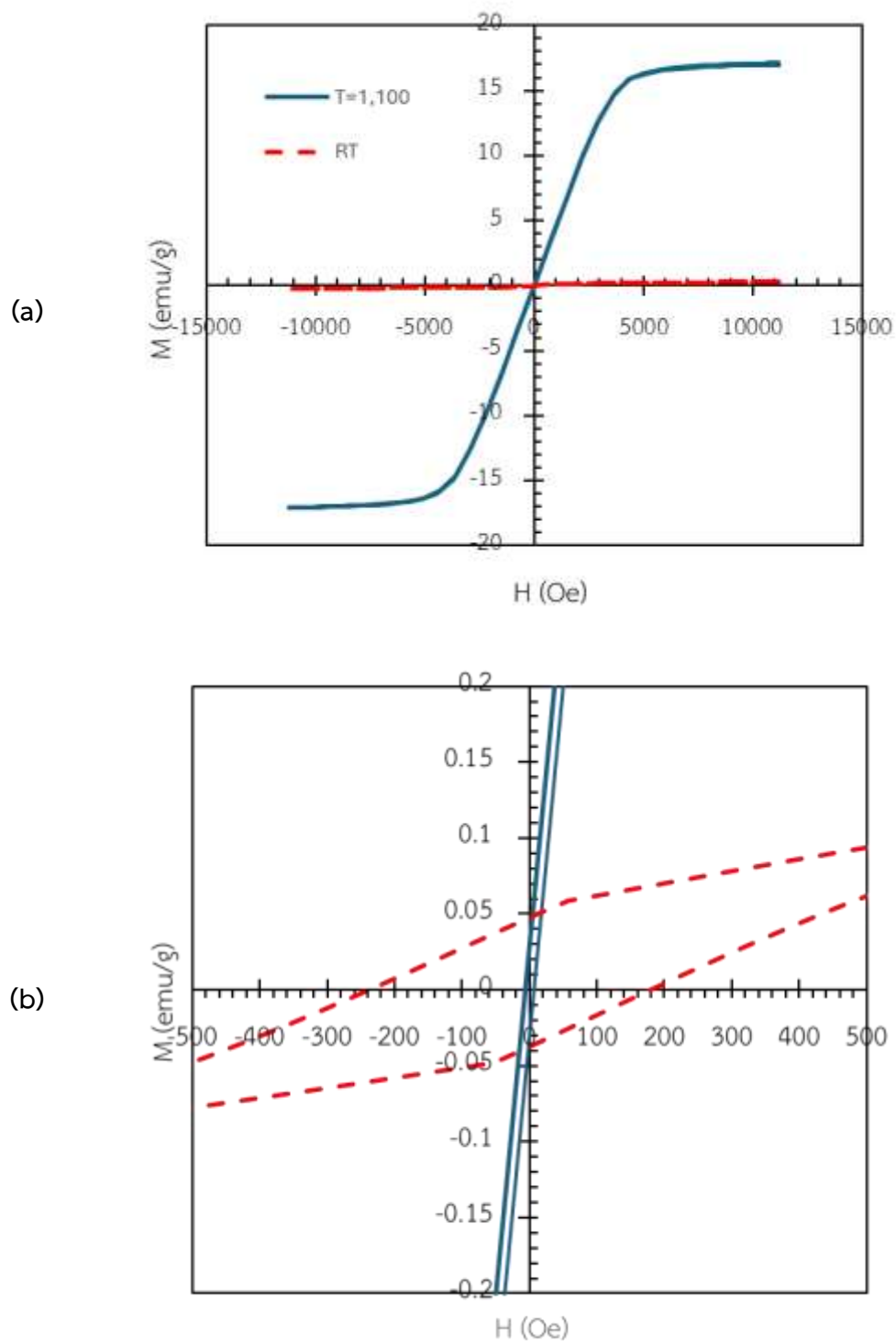
ตารางที่ 1 สมบัติทางด้านโครงสร้างผลึกของ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง

มุม 2θ (degree)	ระนาบ (Plane) (hkl)	ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant, Å)	ขนาดผลึก (Crystallite size, nm)
30.0	(220)	8.22	11.71
35.4	(311)*	8.21	11.68
37.0	(222)	8.21	12.23
43.0	(400)	8.21	12.54
53.4	(422)	8.20	12.00
56.9	(511)	8.21	11.43
62.5	(440)	8.20	11.49
$\bar{x}$		8.21	11.87
S.D.		0.01	0.41

*เป็นระนาบที่บ่งบอกถึงโครงสร้างผลึกแบบ spinel cubic

สมบัติทางด้านแม่เหล็ก

จากการทดสอบสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM พบว่า $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ เเผาที่อุณหภูมิ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง จะเกิดวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) โดยมีขนาดวงที่แคบ แสดงให้เห็นว่า $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็นแบบชั่วคราว (soft magnetic) เนื่องจากมีขนาดของวงที่แคบ โดยมีค่าลบล้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, H_c ที่ต่ำมาก น้อยกว่า 10 Oe โดยในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 7 Oe และยังมีค่าอิ่มตัวความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, M_s ที่สูง เท่ากับ 16 emu/g และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าคงค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, M_r ที่น้อยมาก โดยมีค่าอยู่ที่ 0.03 emu/g ดังรูปภาพที่ 4 และตารางที่ 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choudhary, et al., 2021 ที่มีวง M-H ที่แคบ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิห้อง (RT) จะพบว่าการปรากฏของวงฮิสเทอรีซิสจะไม่ชัดเจน เนื่องจากมีปริมาณของค่าอิ่มตัวความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, M_s ที่ต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ยังไม่ปรากฏสมบัติทางแม่เหล็กของ Ni-Zn เฟอร์ไรต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่อธิบายว่ายังไม่ปรากฏโครงสร้างของ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรต์ โดยผลการทดสอบสมบัติแม่เหล็กที่ได้มาจากสารตั้งต้นทั้งสาม อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิห้องสารตัวอย่างยังคงปรากฏฮิสเทอรีซิสอันเนื่องมาจากอิทธิพลของสารตั้งต้น Fe_2O_3 ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีพฤติกรรมแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetism)



รูปภาพที่ 4 วงฮิสเทอรีซิสของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง

(a) รูปภาพเต็ม

(b) ภาพขยายข้อมูลของวงฮิสเทอรีซิส เพื่อวิเคราะห์หา M_r และ H_c

ที่มา : ผู้วิจัย, 2566

ตารางที่ 2 สมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง (RT) และอุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (°C)	ค่าอิ่มตัวความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, M_s (emu/g)	ค่าคงค้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, M_r (emu/g)	ค่าลบล้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ, H_c (Oe)
RT (สารตั้งต้นต่าง ๆ)	0.3	0.05	250
1100 ($Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ เฟอร์ไรท์)	16	0.03	7

อภิปรายผล

การนำผงหมึกเหลือใช้มาเป็นสารตั้งต้นเพื่อทดแทน Fe_2O_3 สามารถสังเคราะห์ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ เฟอร์ไรท์ได้ โดยใช้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง เนื่องจากในผงหมึกเหลือใช้จะมีเหล็กออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากเดิมเป็น Fe_2O_3 และเมื่อนำไปเป็นสารตั้งต้น ร่วมกับ NiO และ ZnO ตามสัดส่วนโดยโมล สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของสารตั้งต้นทั้งสามให้อยู่ในเฟสผลึกของ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ เฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกสปินเนล โดยยืนยันจากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ปรากฏระนาบ (311) โดยมีค่าคงที่แลตทิซ เท่ากับ 8.21 Å มีขนาดผลึกเฉลี่ยในระดับนาโนเมตร คือ 11.87 nm นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดสมบัติแม่เหล็กแบบชั่วคราวที่ดีคือมีค่า M_s ที่สูง และ H_c ที่ต่ำ เท่ากับ 16 emu/g และ 7 Oe ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผงหมึกเหลือใช้ที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100°C นาน 2 ชั่วโมง สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นทดแทน Fe_2O_3 มาตรฐานได้

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

- ควรนำสาร $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ เฟอร์ไรท์ที่สังเคราะห์ไปทดสอบสมบัติทางด้านสภาพพื้นผิว เพื่ออธิบายข้อมูลทางกายภาพ เช่น ขนาดอนุภาค ขนาดเกรน และรูพรุน ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

- ควรนำผงหมึกเหลือใช้ไปทดสอบการเป็นสารตั้งต้นของสารแม่เหล็กชนิดอื่น ๆ เช่น $CoFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $SrFe_{12}O_{19}$ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดแทนสารตั้งต้นของ Fe_2O_3
- ควรเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านโครงสร้างผลึกและด้านแม่เหล็ก และต้นทุนการผลิตของ $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ เฟอร์ไรท์โดยใช้ผงหมึกเหลือใช้ที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์เทียบกับผง Fe_2O_3 ที่เป็นมาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

- เกศริน มีมล และ อนุวัฒน์ หัสดี. (2561). สมบัติทางโครงสร้างและแม่เหล็กของ Fe_3O_4 เฟอร์ไรท์ด้วยวิธีเผาแคลไซน์ของผงหมึกเหลือใช้. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 26(1), 49-57. doi: 10.14456/tstj.2018.4
- Chen, N., & Gu, M., (2012). Microstructure and Microwave Absorption Properties of Y-Substituted Ni-Zn Ferrites. *Open Journal of Metal*, 2012(2), 37-41. doi.org/10.4236/ojmetal.2012.22006

- Choudhary, B.L., Kumari, N., Kumari, J., Kumar, A., & Dolia, S.N. (2021). Relaxation mechanism in $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanocrystalline ferrite at a lower temperature. *Materials Letters*, 304(2021), 130731-130734. doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130731
- Hwang, J., Choi, M., Shin, H.S., Ju, B.K., & Chun, M., (2020). Structural and Magnetic Properties of Ni-Zn Ferrite Nanoparticles Synthesized by a Thermal Decomposition Method. *Appl. Sci.* 2020(10), 6279. doi:10.3390/app10186279
- Rao, B.P., Kumar, A.M., Rao, K. H., Murthy, Y.L.N., Caltun, O.F., Dumitru, I., & Spinu, L., (2006). Synthesis and magnetic studies of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 8(5), 1703-1705.
- Shahane, G.S., Kumar, A., Arora, M., Pant, P.R., & Lal, K. (2010). Synthesis and characterization of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010(322), 1015–1019. doi:10.1016/j.jmmm.2009.12.006
- Srinivas, Ch., Tirupanyam, B.V., Satish, A., Seshubai, V., Sastry, D.L., & Caltun, O.F. (2015). Effect of Ni^{2+} substitution on structural and magnetic properties of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 382(2015), 15–19. doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.008
- Verma, S., Joy, P.A., & Kurian, S., (2011). Structural, magnetic and Mössbauer spectral studies of nanocrystalline $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011(509), 8999–9004. doi:10.1016/j.jallcom.2011.06.047