



การสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็ก $MgFe_2O_4$ ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย โดยใช้อุณหภูมิต่ำ

อาจารย์ ทองอ่อน และ จิตรกร กรพรม*

ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ธีระชัย บงการณ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สุปรีย์ พิณจสุนทร

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 5388 5632 อีเมล: chittakorn_kor@g.cmru.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.11.007

รับเมื่อ 28 มีนาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 13 พฤษภาคม 2565 ตอรับเมื่อ 31 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 22 พฤศจิกายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ $MgFe_2O_4$ (MF) ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งอย่างง่าย โดยใช้ไกลซีนเป็นเชื้อเพลิง ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ำของแม่เหล็กแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์เคลือบที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Technique; XRD) พบว่าผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ทุกตัวอย่างแสดงโครงสร้างสปีเนล แบบคิวบิก และที่อุณหภูมิเคลือบ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบเฟสสารแปลกปลอมของ Fe_2O_3 ปรากฏขึ้นในผล XRD สำหรับผงผลึก แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ เคลือบที่อุณหภูมิ 550–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงผลึกแสดงโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิกที่บริสุทธิ์ และแสดงค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิกเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาคของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์เคลือบที่อุณหภูมิระหว่าง 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงลักษณะค่อนข้างกลมและเกาะกลุ่มกัน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 122 ± 31 ถึง 310 ± 85 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 500–800 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบสมบัติแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน พบว่า ผงผลึก แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ ที่เคลือบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อนที่ดีที่สุด และแสดงค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s , ~39.37 emu/g) และค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r , ~8.83 emu/g) สูงที่สุด ขณะที่ค่าสนามแม่เหล็กกลบล้างมีค่าต่ำ (H_c , ~69 Oe) ดังนั้นผลลัพธ์ในงานวิจัยนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาผงผลึก แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ เฟอร์โรแมกเนติกเพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คำสำคัญ: แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ วิธีการเผาไหม้ของแข็ง โครงสร้างเฟส สมบัติแม่เหล็ก

การอ้างอิงบทความ: อาจารย์ ทองอ่อน, จิตรกร กรพรม, ธีระชัย บงการณ และ สุปรีย์ พิณจสุนทร, “การสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็ก $MgFe_2O_4$ ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย โดยใช้อุณหภูมิต่ำ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 241-205896, ม.ค.-มี.ค. 2567.



The Synthesis of MgFe_2O_4 Magnetic Powders by Simplified Solid-State Combustion Technique with Using Low Calcination Temperature

Arjaree Thongon and Chittakorn Kornphom*

Department of General Sciences and Physics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand

Theerachai Bongkarn

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

Supree Pinitsoontorn

Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 5388 5632, E-mail: chittakorn_kor@cmru.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.11.007

Received 28 March 2021 ; Revised 13 May 2022 ; Accepted 31 May 2022; Published online: 22 November 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research focused on the synthesis of magnesium ferrite MgFe_2O_4 (MF) powders by a simplified solid-state combustion method using low calcination temperatures. The effect of calcination temperatures on the crystal structures, microstructure, and magnetic properties of the MF powders were studied. An investigation was conducted on the crystal structure of the MF powders calcinated at different temperatures of 500–800 °C for 2 h while X-ray diffraction (XRD) technique was used to assess the physical properties of the samples. It was found that all MF powders showed the cubic spinel structure. At a calcination temperature of 500 °C for 2 h, an impurity phase of Fe_2O_3 appeared in the XRD result. For the MF powders calcined at 550–800 °C for 2 h, the powders showed high purity of the cubic spinel structure (100% pure). The microstructure of the MF powders with calcination temperatures between 500–800 °C for 2 h showed an almost spherical shape and an agglomerated form. The average particle size increased from 122 ± 31 to 310 ± 85 nm when the calcination temperature increased from 500–800 °C. From the investigation of magnetic properties at 300 K, the MF powders calcinated at 650 °C for 2 h exhibited the best properties of soft ferromagnetic materials, with the highest values of the situated magnetization (M_s , ~39.37 emu/g) and remnant magnetization (M_r , ~8.83 emu/g), while the similar calcination condition showed the low coercivity (H_c , ~69 Oe). Thus, this study yields useful results for the development of ferromagnetic powders used in microelectronic devices.

Keywords: MgFe_2O_4 , Solid-State Combustion Technique, Phase Formation, Magnetic Properties

Please cite this article as: A. Thongon, C. Kornphom, T. Bongkarn, and S. Pinitsoontorn, "The synthesis of MgFe_2O_4 magnetic powders by simplified solid-state combustion technique with using low calcination temperature," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–10, ID. 241-205896, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างมาก เพื่ออำนวยความสะดวกและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ทำให้มีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ออกมามากมาย เทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งหนึ่งที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความต้องการเครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงมาก และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น เช่น วงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก ไมโครเซนเซอร์ ไมโครชิป ไมโครมอเตอร์ และอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลขนาดเล็ก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้วัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้า และแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพสูงมีความจำเป็นอย่างมาก ในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ วัสดุแม่เหล็กขนาดเล็กที่มีค่าคงที่แมกนีไทเซชันสูง (High Magnetic Constant Materials) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ ในด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก โดยวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น เซนเซอร์ (Sensor) และอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Memory Devices) [1]–[3]

วัสดุเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างแบบสปินเนล (Spinel Structure) สูตรทั่วไป คือ AFe_2O_4 ที่มีองค์ประกอบของ A เป็น Mg, Ni และ Co เช่น MnFe_2O_4 (MF), ZnFe_2O_4 (ZF) และ CoFe_2O_4 (CF) [4] ซึ่งวัสดุเหล่านี้จัดเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าคงที่แมกนีไทเซชันสูง และได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีสมบัติทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ พร้อมกับคุณสมบัติทางความร้อนและทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ (MgFe_2O_4 ; MF) เป็นวัสดุเฟอร์ไรต์ชนิดหนึ่ง ที่แสดงสมบัติเพอร์โรแมกเนติกแบบอ่อน ที่มีโครงสร้างแบบ สปินเนล แสดงค่าคงที่แมกนีไทเซชันและความต้านทานสูง นอกจากนี้มีค่าสนามแม่เหล็กกลับล้างต่ำ (Magnetic Coercive Field; H_c) จึงได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยเฉพาะอุปกรณ์เก็บข้อมูล [3]

กระบวนการการสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์เป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งลักษณะผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่ได้ต้องมีบริสุทธิ์และขนาดอนุภาคต้องเล็ก โดยที่อนุภาคมีขนาดเล็กระดับนาโนสมบัติแม่เหล็กของผงผลึกจะดีมาก [3]–[9] ดังนั้นเทคนิคการสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ใน ค.ศ. 2013 Chen และคณะ [6] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผงผลึกนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธี Ultrasonic Wave-assisted Aqueous Solution พบว่า ผงผลึกแสดงค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) สูงมีค่าประมาณ 54.8 emu/g และผงผลึกที่เตรียมได้มีขนาด 20 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามกระบวนการเตรียมต้องใช้เครื่อง Ultrasonic ที่มีความถี่สูงมาก ซึ่งมีราคาแพงมากอีกทั้งใช้ระยะเวลาในการเตรียมนานและเตรียมได้ปริมาณน้อย ต่อมา ใน ค.ศ. 2014 Manikandan และคณะ [7] ศึกษาการเตรียมผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีผสมออกไซด์ ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าผงผลึกที่เตรียมได้มีขนาดประมาณ 8 ไมโครเมตร และมีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) และค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) ประมาณ 20.35 emu/g และ 9.32 emu/g ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวใช้อุณหภูมิแคลไซน์และระยะเวลาเผาาน อีกทั้งขนาดอนุภาคของผงผลึกมีขนาดใหญ่ ต่อมา ใน ค.ศ. 2015 Shaban และคณะ [8] สังเคราะห์ผงผลึกด้วยวิธี EDTA-based Sol-gel Reaction พบว่า กระบวนการใช้อุณหภูมิการแคลไซน์ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงผลึกที่ได้แสดงโครงสร้างผลึกแบบผสมระหว่างแบบคิวบิกกับเทตระโกนอล และผงผลึกมีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร สำหรับค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) และค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) มีค่าประมาณ 29 และ 5.6 emu/g ตามลำดับ และใน ค.ศ. 2020 Naaz และคณะ [9] สังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธี Co Precipitation Route ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผงผลึกแสดงโครงสร้างผลึกสปินเนลแบบคิวบิก และมีขนาดผงผลึกประมาณ 100 นาโนเมตร สำหรับค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) ค่าแมกนีไทเซชัน



ค่าง (M) และค่าสนามแม่เหล็กกล้า (H) มีค่าประมาณ 4.520, 2.9829 emu/g และ 93.78 Oe ตามลำดับ ซึ่งเป็นทราบกันว่ากระบวนการสังเคราะห์ผงผลึกด้วยวิธี EDTA-based Sol-gel Reaction และ Co-precipitation Route เป็นกระบวนการสังเคราะห์ผงผลึกที่มีขนาดเล็กและใช้อุณหภูมิแคลไซน์ต่ำ อย่างไรก็ตาม กระบวนการเตรียมมีขั้นตอนทางเคมีที่ซับซ้อนยุ่งยาก ใช้อุปกรณ์การเตรียมค่อนข้างเยอะและใช้เวลาก่อนการเตรียม ทำให้ต้นทุนในการสังเคราะห์สูงตามไปด้วย [8], [9] นอกจากนี้การสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิคต่างๆ นั้น ส่งผลต่อขนาดผงผลึกและสมบัติทางแม่เหล็กอย่างมาก อีกทั้งแต่ละเทคนิคมีกระบวนการและต้นทุนในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วยเหตุนี้กระบวนการสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กโดยใช้ต้นทุนต่ำและขั้นตอนในการสังเคราะห์ที่สะดวกไม่ซับซ้อนใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์ต่ำและสามารถใช้งานได้จริง เป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยจำนวนมาก

เมื่อไม่นานมานี้ Kornphom และคณะ [10]–[12] ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผงผลึกเฟอร์ไรต์เล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วที่มีขนาดเล็กและมีคุณภาพสูงโดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ของแข็ง (Solid-state Combustion) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและต้นทุนต่ำ เทคนิคดังกล่าวอาศัยกลไกในกระบวนการเผาไหม้ของสถานะที่เป็นของแข็ง โดยนำพลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นกับเชื้อเพลิงสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาก่อปฏิกิริยา (ลดอุณหภูมิแคลไซน์) อีกทั้งสามารถสร้างเฟสของของเหลวขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งสูง ส่งผลให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันได้ดีขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแคลไซน์ ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติแม่เหล็กของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย โดยใช้ไกลซีนเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากไกลซีนมีการปลดปล่อยพลังงานสูง ระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ผงผลึก ซึ่งยืนยันได้จากการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อน [10] อีกทั้งกระบวนการเตรียมผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ในงานวิจัยนี้

จะลดขั้นตอนการผสมสารตั้งต้นด้วยการบดด้วยลูกบอลลง ทำให้ลดระยะเวลาและลดการซับซ้อนในการเตรียมสารลง และจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิคและกระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้น ยังไม่มีผู้ทำการศึกษาและวิจัย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วย แมกนีเซียมไนเตรต $Mg(NO_3)_2 \cdot 6(H_2O)$ ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ไอรอนไนเตรต $Fe(NO_3)_3 \cdot 9(H_2O)$ ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ และใช้เชื้อเพลิง คือ ไกลซีน ($C_2H_5NO_2$) นำสารตั้งต้นซึ่งตามอัตราส่วนโดยมวลที่ได้จากการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ผ่านการชั่งมาผสมกับไกลซีนที่เป็นเชื้อเพลิงในอัตราส่วนของสารตั้งต้น 1 กรัมต่อเชื้อเพลิงไกลซีน 4.44 กรัม โดยอัตราส่วนดังกล่าวได้จากการคำนวณการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และออกซิเดชันระหว่างสารตั้งต้นกับเชื้อเพลิงไกลซีน [13] จากนั้นนำสารมาใส่ในถ้วยเซรามิกทนความร้อนสูง (Crucible) ทำการคนสารด้วยแท่งแก้วให้สารที่เป็นของแข็งทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายเนื้อเดียวสีแดง นำสารใน Crucible ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (1,500 องศาเซลเซียส) ควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (High Temperature Furnace) จากนั้นนำผงผลึกที่ผ่านการแคลไซน์ทุกอุณหภูมิไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) โดยเครื่อง XRD X'pert MPD 3,040 Philips โดยใช้ $CuK\alpha$ (1.541 Å) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และใช้มุมในการตรวจวิเคราะห์ที่ 10–70 องศาการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM, Leo 1455VP) โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample Magnetometer; VSM) โดย

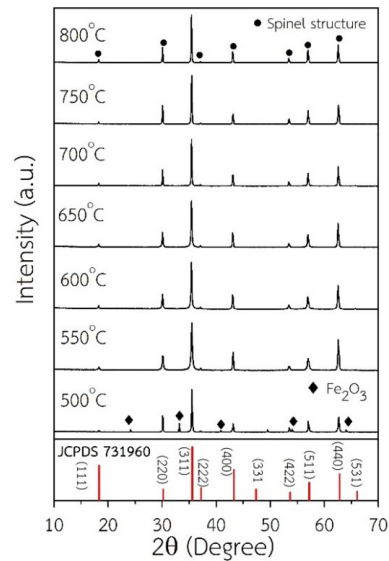
วัดที่อุณหภูมิ 300 และ 500 เคลวิน และใช้สนามแม่เหล็กในการตรวจวัดที่ระหว่าง $-10,000$ ถึง $10,000$ Oe

3. ผลการทดลอง

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ที่อุณหภูมิห้อง ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (การเผาสารตั้งต้นที่ผสมกันตามอัตราส่วนทางปริมาณสารสัมพันธ์เพื่อก่อปฏิกิริยาให้ได้ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่บริสุทธิ์) โดยใช้ไกลซินเป็นเชื้อเพลิงในอัตราส่วนสารตั้งต้น 1 ส่วน ไกลซิน 4.44 และ ใช้มุมในการวิเคราะห์ 2θ ระหว่าง 10 – 70 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ทุกตัวอย่างแสดงโครงสร้างสปีเนล (Spinel) แบบคิวบิก (Cubic) ที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 731960 และพบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แสดงโครงสร้างเฟสที่ไม่บริสุทธิ์ โดยพบเฟสของสารประกอบของ Fe_2O_3 ปรากฏขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการก่อเกิดเฟสประกอบของ Fe_2O_3 สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์ เนื่องจากพลังงานในที่ใช้ในการก่อปฏิกิริยาของสารตั้งต้นไม่เพียงพอ จากนั้นคำนวณค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิก จากสมการที่ (1) [10]

$$\% \text{purity phase} = \frac{I_{\text{Spinel}}}{I_{\text{Spinel}} + I_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \quad (1)$$

เมื่อ I_{Spinel} คือ ความเข้มของของพีคกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิกของผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 731960 และ $I_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ คือ ความเข้มของพีคกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบ Fe_2O_3 ที่ได้จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระบุเป็นสัญลักษณ์ (\diamond) ในรูปที่ 1 จากการคำนวณค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิกพบว่า ค่าความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 95.7



รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

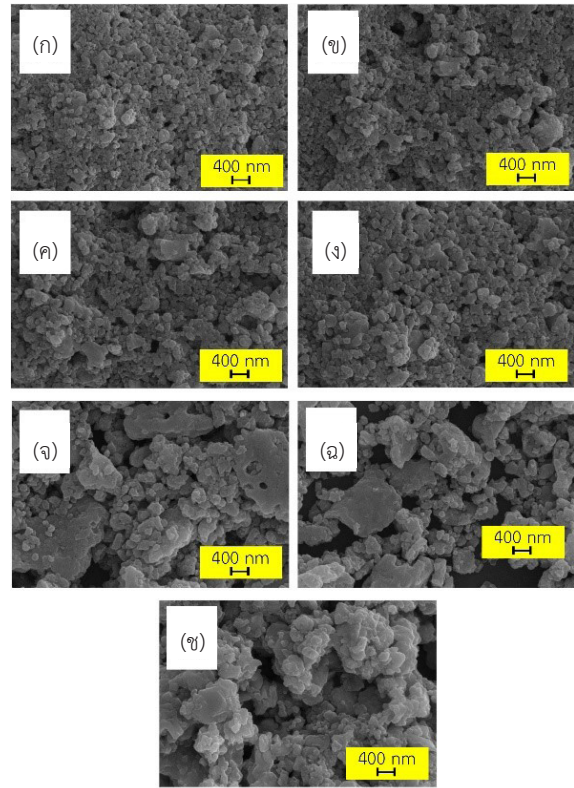
เป็น 100 เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 500–550 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิก ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ได้จากตัวอย่างผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ ≥ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่เตรียมได้ใช้อุณหภูมิแคลไซน์และระยะเวลาเผาต่ำกว่าวิธีวิธีผสมออกไซด์ โดยสามารถลดอุณหภูมิแคลไซน์ได้ประมาณ 550 องศาเซลเซียส และลดเวลาเผาแห้ง 3 ชั่วโมง อีกทั้งลดกระบวนการบดย่อยแบบลูกบอลในวิธีผสมออกไซด์ ที่ต้องบดย่อยผสมสารตั้งต้นด้วยลูกบอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่า ผงผลึกที่สังเคราะห์ได้ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ใกล้เคียงกับวิธี EDTA-based Sol-gel Reaction ซึ่งขั้นตอนการเตรียมที่ซับซ้อนกว่าวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่ายมาก ซึ่งการลดอุณหภูมิแคลไซน์และเวลาการเผาในกระบวนการแคลไซน์นั้น เกิดจากคายพลังงานออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นกับเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำปฏิกิริยารีดอกซ์และออกซิเดชัน

เกิดขึ้น ซึ่งพลังงานที่คายออกมาจะช่วยลดพลังงานการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นลง ทำให้ใช้อุณหภูมิแคลไซน์ต่ำ นอกจากนี้ขั้นตอนการผสมสารตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งก่อนเผาแคลไซน์ เมื่อสารผสมกันจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ทำให้สารตั้งต้นและเชื้อเพลิงละลายเป็นเนื้อเดียวกันง่ายต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้สามารถลดขั้นตอนการบดย่อยแบบลูกบอลลงได้ ทำให้ใช้เวลาในการเตรียมสารสั้นและไม่มีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธี EDTA-based Sol-gel Reaction และวิธี Co Precipitation Route

ตารางที่ 1 ร้อยละความบริสุทธิ์และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	ร้อยละความบริสุทธิ์ (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)
500	95.7	122 ± 31
550	100	135 ± 33
600	100	139 ± 36
650	100	143 ± 22
700	100	208 ± 75
750	100	234 ± 79
800	100	310 ± 85

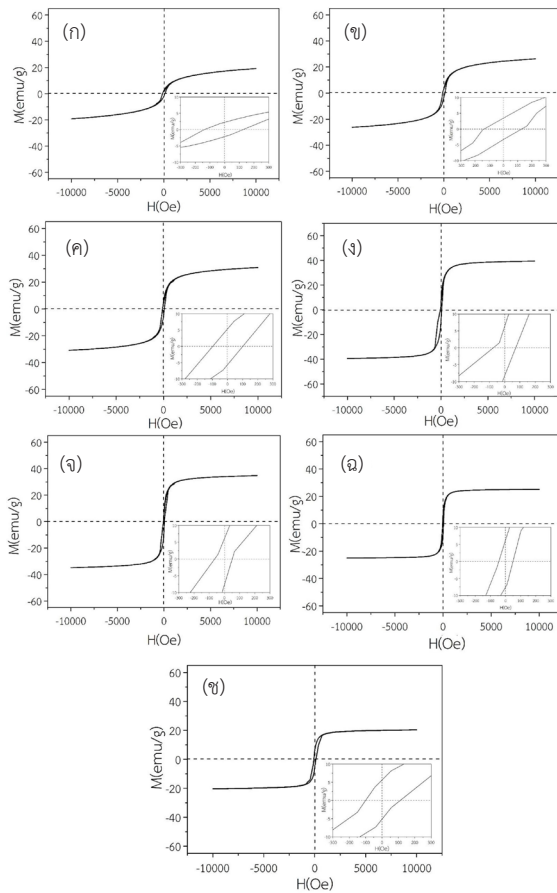
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในรูปที่ 2 (ก)–(ข) พบว่า ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แสดงลักษณะอนุภาคค่อนข้างกลม เกาะกลุ่มกันค่อนข้างหนาแน่น จากการหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธี Linear Intercept เปรียบเทียบกับสเกลบาร์ที่ระบุความยาวที่มีขนาดเท่ากับ 400 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก)–(ข) พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์มีขนาดอยู่ระหว่าง 122 ± 31 ถึง 310 ± 85 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้จะ



รูปที่ 2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ ที่อุณหภูมิ (ก) 500, (ข) 550, (ค) 600, (ง) 650, (จ) 700, (ฉ) 750 และ (ช) 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

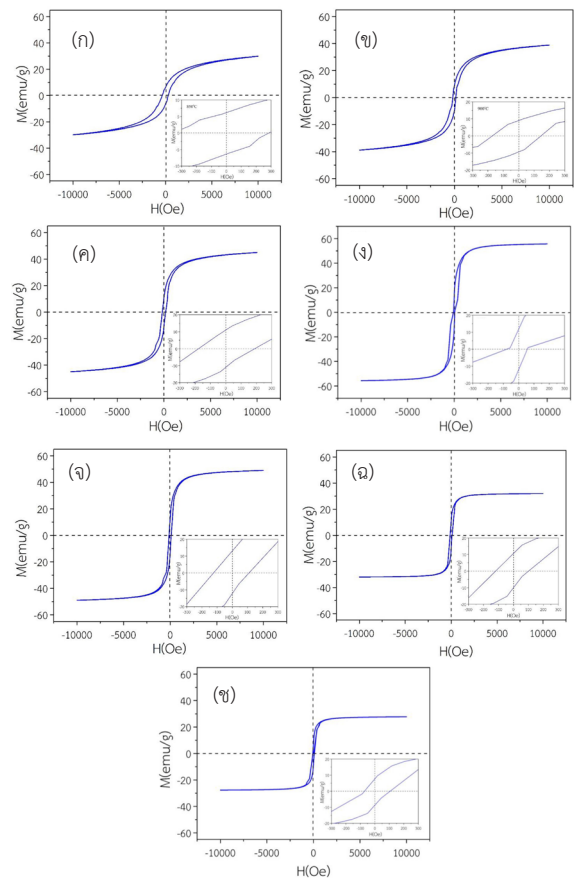
เห็นว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ระหว่าง 700–800 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคผงผลึกมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 (จ)–(ช) ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคเฉลี่ยมีค่าสูงมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ผงผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง เกิดจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ผงผลึกมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ และขนาดผลึกขนาดใหญ่ที่ใหญ่ขึ้น [14]

การวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample Magnetometer; VSM) โดยตรวจวัดที่อุณหภูมิ 300 และ 50 เคลวิน ตามลำดับ ภายใต้สนามแม่



รูปที่ 3 สภาพความเป็นแม่เหล็กของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน (ก) 500, (ข) 550, (ค) 600, (ง) 650, (จ) 700, (ฉ) 750 และ (ช) 800 องศาเซลเซียส

เหล็กที่ $-10,000$ ถึง $10,000$ Oe ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 จากภาพแสดงวงวน M-H ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก พบว่าผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แสดงลักษณะของสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแบบอ่อนในทุกตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (Remnant Magnetic; M_r) และค่าสนามแม่เหล็กกลับล้าง (Magnetic Coercive Field; H_c) ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์โดยตรวจวัดที่อุณหภูมิ 300 และ 50 เคลวิน แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา



รูปที่ 4 สภาพความเป็นแม่เหล็กของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวัดที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน (ก) 500, (ข) 550, (ค) 600, (ง) 650, (จ) 700, (ฉ) 750 และ (ช) 800 องศาเซลเซียส

ค่า M_s และ M_r ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่ตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ พบว่า มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจนถึง 650 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ค่า M_s และ M_r มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2 ขณะที่ค่า H_c ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่ตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ พบว่า มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจนถึง 700 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ค่า H_c มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับค่า M_s , M_r และ H_c ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส โดยตรวจวัดที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน พบว่าค่า M_s , M_r และ H_c ของทั้งสองอุณหภูมิ



มีแนวโน้มไปในรูปแบบเดียวกันแต่พบว่า ค่า M_s , M_r และ H_c มีค่าสูงกว่าที่ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ดังแสดงในตารางที่ 3 เนื่องจากการเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก (Magnetic Dipole Moment) เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กทิศทาง การเรียงตัวจะเกิดความเป็นระเบียบมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการวัดต่ำ จึงเป็นผลทำให้สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรแข็งแกร่งมากกว่าที่วัดด้วยอุณหภูมิสูง ดังนั้นค่า M_s , M_r และ H_c ที่ตรวจวัดที่อุณหภูมิต่ำมีค่าสูงกว่าที่วัดด้วยอุณหภูมิต่ำสูง

ตารางที่ 2 สมบัติแม่เหล็กของผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	H_c (Oe)
500	19.18	2.43	139
550	26.22	3.74	130
600	30.82	6.26	100
650	39.37	8.83	69
700	34.78	6.62	51
750	25.10	6.45	53
800	20.53	5.62	105

ตารางที่ 3 สมบัติแม่เหล็กของผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัดที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน

อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	H_c (Oe)
500	29.86	6.33	300
550	38.85	9.26	150
600	44.97	10.89	174
650	55.64	13.17	75
700	48.98	12.44	105
750	31.94	10.55	115
800	27.72	8.87	120

จากผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเผาไหม้

ของแข็งแบบง่ายพบว่า ที่เงื่อนไขการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ผงฟลักแสดงสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรเล็กทริกแบบอ่อนที่ดีที่สุด โดยมีค่า M_s และ M_r สูงที่สุด โดยมีค่าเป็น 39.37 และ 8.83 emu/g ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกพบว่า มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก การก่อตัวของเฟสแปลกปลอม ขนาดของอนุภาค การเกาะกลุ่มก่อนขนาดใหญ่ของผงฟลัก และความยาวพันธะระหว่าง Fe^{3+} กับ O^{2-} เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สันนิษฐานว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติแม่เหล็ก ได้แก่ เฟสแปลกปลอมของ Fe_2O_3 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่ำ (500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ส่งผลให้สมบัติแม่เหล็กต่ำ สำหรับที่อุณหภูมิแคลไซน์สูง 700–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อนุภาคผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์มีการเกาะกลุ่มเป็นก้อนขนาดใหญ่ นำไปสู่ขนาดผงฟลักที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลทำให้สมบัติแม่เหล็กต่ำลง ดังนั้นผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์ผงฟลักที่ดีที่สุด เนื่องจากผงฟลักมีขนาดเล็กและมีขนาดที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้พบว่า สมบัติแม่เหล็กของผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ที่เตรียมด้วยวิธี EDTA-based Sol-gel reaction (M_s ~29 emu/g และ M_r ~5.6 emu/g) [8] ขณะที่เมื่อเทียบกับวิธีผสมออกไซด์ [7] พบว่า มีค่า M_s สูงกว่าค่อนข้างมาก (M_s วิธีผสมออกไซด์ ~29 emu/g) และ ค่า M_r มีค่าใกล้เคียงกัน (M_r วิธีผสมออกไซด์ ~9.32 emu/g) สำหรับค่า H_c มีค่าต่ำกว่าวิธีผสมออกไซด์ค่อนข้างมาก (H_c วิธีผสมออกไซด์ ~335 Oe) จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิแคลไซน์ ระยะเวลาการเผา และ ค่า M_s ของผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า การสังเคราะห์ผงฟลักแมกนีเซียมเฟอร์ไรด์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่ายแสดง M_s ที่สูงที่สุด และใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์ และระยะเวลาการเผาแซ่ต่ำกว่าบ้างวิธี และเป็นที่น่าประหลาดใจว่าวิธีการ EDTA-based Sol-gel Reaction [8] และ Co Precipitation

Route [9] เป็นการสังเคราะห์ด้วยใช้กระบวนการทางเคมีเป็นหลัก ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสารที่ซับซ้อนและยุ่งยาก อีกทั้งใช้วัสดุอุปกรณ์ค่อนข้างเยอะและราคาสูง ดังนั้นการสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย เป็นวิธีที่ประหยัดเวลา ใช้อุณหภูมิต่ำขั้นตอนไม่ซับซ้อน อีกทั้งผงผลึกที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กและมีสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิแคลไซน์ ระยะเวลาการเผาแห้ง และค่า M_s ของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการสังเคราะห์ ผงผลึก MF	อุณหภูมิ แคลไซน์ (°C)	ระยะเวลา การเผาแห้ง (h)	M_s (emu/g)
การเผาไหม้ของแข็ง แบบง่าย	650	2	39.37
EDTA-based Sol-gel Reaction [8]	600	2	29.00
ผสมออกไซด์ [7]	1100	8	20.35
Co Precipitation Route [9]	500	3	24.50

4. อภิปรายผลและสรุป

การสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็ง โดยใช้ไกลซีนเป็นเชื้อเพลิงในการสังเคราะห์ในอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อไกลซีนเป็น 1 กรัม ต่อ 4.44 กรัม และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ทุกตัวอย่างแสดงโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิกที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 731960 นอกจากนี้พบว่า ที่อุณหภูมิแคลไซน์ระหว่าง 550–800 องศาเซลเซียส ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แสดงโครงสร้างเฟสที่บริสุทธิ์ จากการคำนวณค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างสปีเนลแบบคิวบิก เพิ่มขึ้นจาก 95.7 เป็น 100 เมื่อใช้อุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 500–800 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคของผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แสดงลักษณะค่อนข้างกลมมีการเกาะกลุ่มหนาแน่นและเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิ

แคลไซน์สูงขึ้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 122 ± 31 ถึง 310 ± 85 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 500–800 องศาเซลเซียส โดยผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนที่ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่ต่ำสุดโดยมีค่า M_s , M_r และ H_c เท่ากับ 39.37, 8.83 emu/g และ 69 Oe ตามลำดับ สรุปได้ว่าวิธีการเตรียมผงผลึกแม่เหล็กแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งแบบง่าย โดยใช้ไกลซีนเป็นเชื้อเพลิง เป็นหนึ่งกระบวนการที่สามารถสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กแบบเฟอร์โรที่บริสุทธิ์ และมีคุณภาพสูง อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์มีขั้นตอนง่าย ใช้เวลาในการเตรียมน้อยและอุณหภูมิในการแคลไซน์ต่ำ ซึ่งสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียม นำไปสู่การลดต้นทุนในการสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ได้ ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์ผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็งเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำกระบวนการสังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการสังเคราะห์ผงผลึกแม่เหล็กแบบเฟอร์ไรต์ต่อไป รวมทั้งสามารถนำผงผลึกแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่สังเคราะห์ได้พัฒนาต่อยอดประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ประจำปี 2565

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. S. Xavier, R. A. Candeia, M. I. B. Bernardi, S. J. G. Lima, E. Longo, C. A. Paskocimas, L. E. B. Soledade, A. G. Souza, and Ida M. G. Santos “Effect of the modifier ion on the properties of $MgFe_2O_4$ and $ZnFe_2O_4$ pigments,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 87, no. 3, pp. 709–713, 2007.
- [2] M. Ismael, E. Elhaddad, D. H. Taffa, and M. Wark



- “Synthesis of phase pure hexagonal YFeO_3 perovskite as efficient visible light active photocatalyst,” *Catalysts*, vol. 7, no. 11, pp. 326–339, 2017.
- [3] S. K. Pradhan, S. Bid, M. Gateshki, and V. Petkov “Microstructure characterization and cation distribution of nanocrystalline magnesium ferrite prepared by ball milling,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 93, pp. 224–230, 2005.
- [4] P. Thawong, N. Punlek, S. Pinitsoontorn, and T. Bongkarn, “Effect of the firing temperature on the phase formation, dielectric and ferromagnetic properties of CZFMO ceramics fabricated by the solid-state combustion technique,” *Ferroelectrics*, vol. 552, no. 1, pp. 10–22, 2019.
- [5] C. S. Xavier, R. A. Candeia, M. I. B. Bernardi, S. J. G. Lima, E. Longo, C. A. Paskocimas, L. E. B. Soledade, A. G. Souza and I. M. G. Santos “Effect of the modifier ion on the properties of MgFe_2O_4 and ZnFe_2O_4 pigments,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 87, no. 3, pp. 709–713, 2007.
- [6] D. Chen, D. Y. Li, Y. Z. zhang, and Z. T. Kang, “Preparation of magnesium ferrite nanoparticles by ultrasonic wave-assisted aqueous solution ball milling” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, no. 6, pp. 1337–1340, 2013.
- [7] M. Manikandan, P. Manimuthu, and C. Venkateswaran “Structural and Magnetic properties of MgFe_2O_4 ceramic,” in *AIP Conference Proceedings 1576*, 2014, pp. 194–196.
- [8] I. S. Hussein, A. S. Elkady, M. M. Rashad, A. G. Mostafa, and R. M. Megahid, “Structural and magnetic properties of magnesium ferrite nanoparticles prepared via EDTA-based sol-gel reaction,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 379, no. 15, pp. 9–15, 2015.
- [9] F. Naaz, H. K. Dubey, C. Kumari, and P. Lahiri, “Structural and magnetic properties of MgFe_2O_4 nanopowder synthesized via co precipitation route,” *SN Applied Sciences 2*, vol. 808, 2020.
- [10] C. Kornphom and T. Bongkarn, “The effect of firing temperatures on phase evolution, microstructure, and electrical properties of $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.05}\text{Ti}_{0.95})\text{O}_3$ ceramics prepared via combustion technique,” *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*, vol. 20, no. 4, pp. 479–484, 2014.
- [11] C. Kornphom, N. Vittayakorn, and T. Bongkarn “Lead-free piezoelectric ceramics based on (1-x)BNKLLT-BCTZ binary solid solutions synthesized by the solid-state combustion technique” *Journal of Materials Science*, vol. 51, pp. 4142–4149, 2016.
- [12] C. Kornphom, S. Yotthuan, P. Kidkhunthod, and T. Bongkarn “Stabilization of the morphotropic phase boundary in (1- x) BNT-xBCTS ceramics prepared by the solid-state combustion technique” *Radiation of Physics and Chemistry*, vol. 188, 2021.
- [13] A. Franco Jr., T. E. P. Alves, E. C. de O. Lima, E. da S. Nunes, and V. Zap, “Enhanced magnetization of nanoparticles of $\text{Mg}_x\text{Fe}(3-x)\text{O}_4$ ($0.5 \leq x \leq 1.5$) synthesized by combustion reaction,” *Applied Physics A*, vol. 94, pp. 131–137, 2009.
- [14] A. Ruys, *Processing, structure, and properties of alumina ceramics*, Alumina Ceramics, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2019, pp. 71–121.