



การศึกษาประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิต ที่ใช้ในอุตสาหกรรม
A Study of Magnetic Efficiency from Composite Materials for
Industrial Use

วนัสนันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ
Vanussanun Aitviriyaphan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การศึกษาประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิต ที่ใช้ในอุตสาหกรรม
A Study of Magnetic Efficiency from Composite Materials for
Industrial Use

วนัสนันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ
Vanussanun Aitviriyaphan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อ นามสกุล นายวนันสนันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ช้วน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ช้วน)

..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ขาติภูถ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

วันที่ 3 เดือน กันยายน พ.ศ. 2562

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิต ใช้ในอุตสาหกรรม
ชื่อ สกุล	วันสนันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพทางแม่เหล็กของวัสดุคอมโพสิตที่สังเคราะห์ด้วยวัสดุ BaCO_3 (Barium carbonate, 99.9%), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Iron(III) nitrate, 99.0%) and MoO_3 (Molybdenum trioxide, 99.0%) ที่อัตราส่วน 2:1:1 และละลายด้วยน้ำ Deionized (DI) ที่อัตราส่วน 1:7:5 ด้วยวิธีปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็งและนำวัสดุที่สังเคราะห์ได้นั้นไปผ่านกระบวนการเผาแคลไซต์ (Calcined) วัสดุของเหลวที่เตรียมได้ที่ $500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมาได้นำไปมาเผาผลึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 4, 6 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้น ได้นำวัสดุที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพโดยแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยกราฟฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ด้วยเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงตัวแปรต่าง ๆ ของวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขต่าง ๆ แต่ละชนิดว่ามีผลอย่างไร จากผลการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์วัสดุที่สังเคราะห์ได้ วัสดุเซรามิกตัวอย่างที่ผู้วิจัยสังเคราะห์ได้ที่ผ่านการเผาผลึก $600\text{ }^\circ\text{C}$ ถึง $800\text{ }^\circ\text{C}$ นั้นพิสูจน์ได้ว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กที่จัดอยู่ในกลุ่ม Ferromagnetic ผลการวิเคราะห์ผงด้วย SEM แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ (BFMO) พบว่าลักษณะพื้นฐานของผงมีลักษณะเป็นก้อนพื้นผิวขรุขระขนาดเฉลี่ย 2 ไมครอน

คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิต, วัสดุแม่เหล็ก, BFMO

Thesis title	Parametric Study of Magnetic Properties in Composite Material
Author	Vanussanun Aitviriyaphan
Degree	Master of Engineering
Major program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2019

ABSTRACT

The magnetic properties of Ba_2FeMoO_6 (BFMO) $BaCO_3$ (Barium carbonate, 99.9%), $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Iron(II) nitrate, 99.0%) and MoO_3 (Molybdenum trioxide, 99.0%) have been characterized. A slurry was prepared by mixing the powders with deionized (DI) water at a ratio of 1:7.5: by solid state reaction method through compression. In the case of BFMO, sintering at 800 °C for a 4, 6 and 10 hours. exhibited the largest hysteresis loop at 50 K. In addition, the values of M_s and M_r indicate ferromagnetic behaviour in BFMO ceramics sintered from 600 °C to 800 °C. Finally, the value of magnetization was reduced by using a lower sintering temperature, SEM analysis revealed the physical appearance of sintered BFMO ceramic, and showed the morphology of the BFMO powder was. coarse with an average diameter of 2 microns

Keywords : Composite, Ferromagnetic, BFMO

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ ความกรุณาเมตตาและความช่วยเหลือในทุกด้านจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน และ ดร.ณภัทร อัลเบิร์ต อาจารย์ที่ปรึกษาและกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พองสมุทร ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ประกอบ ชาตฤกษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งทั้งสองท่านให้ความรู้และการถ่ายทอดประสบการณ์ ตลอดจนตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ความรู้และความแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว ที่คอยให้การส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจเป็นแรงผลักดันผู้เขียนทั้งในด้านการเรียน การดำเนินชีวิตมาโดยตลอด ท้ายที่สุด ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

วันสนันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฑ
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
2. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 กรอบงานวิจัย	28
2.3 ระเบียบวิธีวิจัย	28
2.4 การทบทวนวรรณกรรม	28
3. การดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.2 วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์และอัตราส่วนผสมของวัสดุ	35
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ	39
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแมกเนติก	40
4. ผลการวิเคราะห์	
4.1 ผลการศึกษาวัสดุผงและวัสดุเซรามิกส์	42
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผง ($\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$)	70
5. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สมบัติของเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต	78
ภาคผนวก ข อุณหภูมินีล (Neel Temperature) ของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก	80
ภาคผนวก ค สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก	82
ภาคผนวก ง ผลงานการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	98



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 หน่วยวัดปริมาณทางแม่เหล็ก (Magnetic Quantity Unit)	8
2.2 การเปลี่ยนหน่วยของปริมาณทางแม่เหล็ก	10
2.3 ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก	16
2.4 อุณหภูมิคูรีของวัสดุแม่เหล็ก	18
2.5 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน	24
2.6 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน	26
3.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ BaCO_3	35
3.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ $\text{Fe(NO}_3)_3$	35
3.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ MoO_3	36
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ ของอุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง	42
4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ ของอุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	43
4.3 ผลจากการวิเคราะห์จากเครื่อง (EDS)	72
ก-1 สมบัติของเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต	79
ข-1 อุณหภูมิมีนีส (Neel Temperature) ของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก	81
ค-1 สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก	83

สารบัญรูป

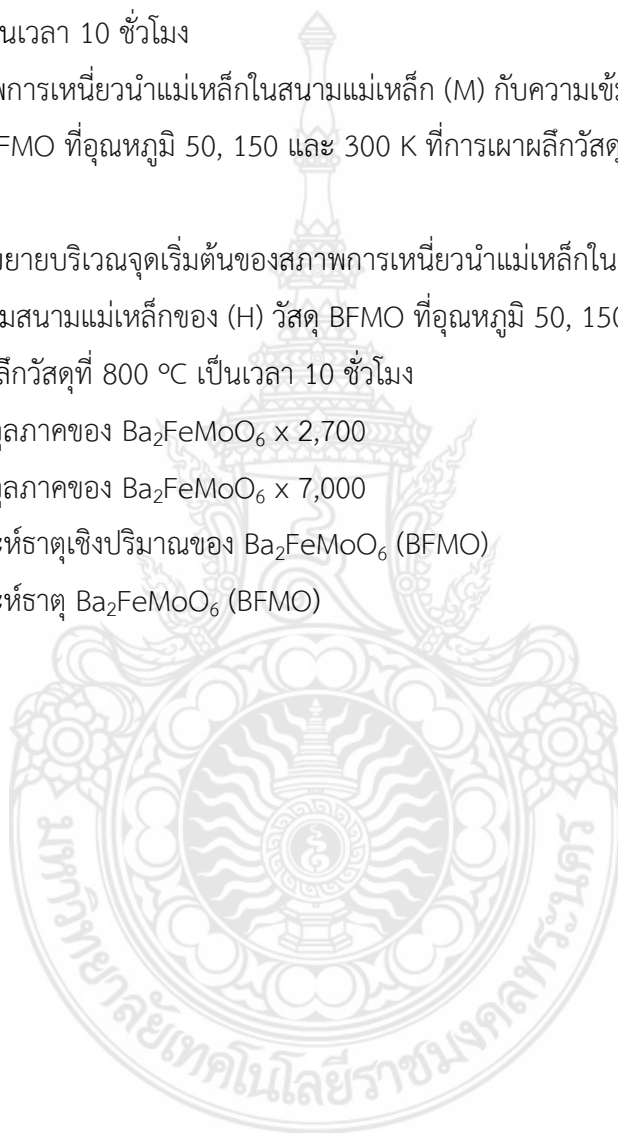
รูปที่	หน้า	
2.1	วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กและการใช้ประโยชน์	4
2.2	วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์	5
2.3	การเปรียบเทียบสภาพการเหนี่ยวนำของวัสดุแม่เหล็กกับสูญญากาศ	7
2.4	สภาพการเกิดสนามแม่เหล็ก	7
2.5	ฮิสเตอร์ิซิสลูป Hysteresis Loop	13
2.6	ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก	13
2.7	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กชนิดไดอะแมกเนติก	14
2.8	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก	14
2.9	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก	15
2.10	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก	16
2.11	การเหนี่ยวนำของวัสดุแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก	19
2.12	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึก	19
2.13	การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของเกรนภายในโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystalline)	20
2.14	พฤติกรรมการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	21
2.15	การเกิดวงรอบฮิสเตอร์ิซิส (Hysteresis Loop) ของวัสดุแม่เหล็ก	21
2.16	สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก	22
2.17	วัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) แม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และ แม่เหล็กกึ่งแข็ง (Semihard Magnets)	22
2.18	การสูญเสียสภาพความเป็นวัสดุแม่เหล็ก	23
2.19	ตัวอย่างการสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กแข็งชนิดเฟอร์ไรต์ (Hard Magnets)	27
2.20	การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโคบอลต์ (Co) สังกะสี (Zn) ไอรอน (Fe)	30
2.21	การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์	31
3.1	ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย	34
3.2	แบเรียมคาร์บอเนต BaCO ₃ Barium carbonate, 99.9%	35
3.3	ไอรอนไนเตรท Fe(NO ₃) ₃ (III) nitrate, 99.0%	36
3.4	โมลิบดีนัม MoO ₃ Molybdenum trioxide, 99.0%	36
3.5	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	37
3.6	วัสดุสังเคราะห์ BFMO ชนิดเหลว	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	38
3.8	38
3.9	39
3.10	40
3.11	41
4.1	43
4.2	44
4.3	44
4.4	45
4.5	45
4.6	46
4.7	46
4.8	47
4.9	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มข้นสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	69
4.53 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	69
4.54 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มข้นสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	70
4.55 โครงสร้างจุลภาคของ $Ba_2FeMoO_6 \times 2,700$	70
4.56 โครงสร้างจุลภาคของ $Ba_2FeMoO_6 \times 7,000$	71
4.57 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของ Ba_2FeMoO_6 (BFMO)	72
4.58 การวิเคราะห์ธาตุ Ba_2FeMoO_6 (BFMO)	73



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
H	Magnetizing field
I	Electric Current
M	Magnetization
T_c	Curie Temperature
α	Polarizability; Phase Alpha
λ	Wavelength
μ	Magnetic Permeability
μ_B	Bohr Magneton
μ_0	Absolute Permeability
μ_r	Relative Permeability
χ	Magnetic Susceptibility
ϵ	Strain; Permittivity



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความต้องการของเครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆและมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแม่เหล็กสูง (High Magnetic Constant Materials) จึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญต่าง ๆ ดังเช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และสิ่งประดิษฐ์ความจำ (Memory Devices) โดยค่าคงที่ แม่เหล็กสถิต (Static Magnetic Constant) ของวัสดุจะเป็นปัจจัยหลักในการลดขนาดและคงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เหล่านี้ได้โดยทั่วไปวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskites) จัดเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าคงที่แม่เหล็กสูงและนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยวัสดุเพอโรฟสไกต์ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกคือ เฟอร์โรแมกเนติกแบบปกติ (Normal-Ferromagnetic) เช่น $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) และ BaTiO_3 วัสดุกลุ่มนี้เป็นวัสดุที่แสดงไดโพลโมเมนต์ถาวร (Permanent Dipole Moment) และเมื่อวางวัสดุนี้ในสนามแม่เหล็กไดโพลไฟฟ้าจะจัดเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้เกิดการตอบสนองทางแม่เหล็ก และกลุ่มที่สองคือ เฟอร์โรแมกเนติก แบบรีแลกเซอร์ (Relaxor-Ferromagnetic) ซึ่งได้แก่ $\text{PbMg}_{1/3}\text{O}_3$ (PMN), $\text{Pb}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PZN), $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ (PST) และ $(\text{Bi}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ วัสดุออกไซด์กลุ่มนี้มีการตอบสนองทางเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิต่ำและภายใต้สนามไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามค่าคงที่แม่เหล็กของวัสดุทั้งสองกลุ่มนี้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมาก ผลดังกล่าวนี้ทำให้เกิดข้อจำกัดและเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น ในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุ วัสดุแม่เหล็กที่ใช้กันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดต้องมีค่าคงที่แม่เหล็กที่เสถียรเพื่อให้ทำงานได้เป็นปกติภายในสภาวะต่าง ๆ แต่หากวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์มีค่าคงที่แม่เหล็กที่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากแล้ว สิ่งประดิษฐ์จะไม่แข็งแรงทนทานและอาจเสียหายได้นอกจากนี้วัสดุเพอโรฟสไกต์โดยส่วนใหญ่มีตะกั่ว (Lead) เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นสารพิษ ดังนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่แม่เหล็กสูงและไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ จึงเป็นที่ต้องการและได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการนำมาใช้งานจริง

ได้มีการรายงานการค้นพบออกไซด์เพอโรฟสไกต์ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ (BFMO) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าแม่เหล็กสูงมาก โดยมีค่าประมาณ 10^5 (ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ต่ำกว่า 1 Hz) ซึ่งเป็นค่าที่เทียบเท่ากับค่าคงที่แม่เหล็กของวัสดุ PZT หรือ PMN และที่สำคัญค่าคงที่แม่เหล็กของ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ มีค่าที่

ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ 100-600 K นอกจากนี้แล้ว Ba_2FeMoO_6 ยังเป็นวัสดุที่ไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead-Free) จากคุณสมบัติทางแม่เนติกที่เป็นเลิศดังกล่าวนี้ทำให้ Ba_2FeMoO_6 เป็นวัสดุแม่เนติกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในด้านการศึกษาพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมในด้านของการประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากปัจจุบันนั้นต้นทุนการผลิตวัสดุที่เป็นแม่เหล็กนั้นมีมูลค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากกระบวนการผลิตนั้นมีหลากหลายขั้นตอนนักวิจัยจึงเห็นความสำคัญในส่วนของการผลิตวัสดุที่เป็นแม่เหล็กเพื่อลดต้นทุนในการผลิตวัสดุนั้นและสามารถใช้งานได้จริงวัสดุ Ba_2FeMoO_6 เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เนติกที่เป็นเลิศ ดังนั้นวัสดุ Ba_2FeMoO_6 ชนิดนี้จึงได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยงานวิจัยส่วนมากมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางแม่เนติกให้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงตลอดตามความต้องการเช่น ในส่วนของงานอุตสาหกรรม เช่น ฮาร์ดดิสก์ ทรานสฟอร์เมอร์ ไดนาโม มอเตอร์ ชิ้นส่วนในคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในส่วนของการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติทางแม่เนติกนั้น เป็นส่วนที่ได้รับความสนใจและได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยหนึ่งในวิธีที่คาดว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติทางแม่เนติกของวัสดุเซรามิกส์ได้คือ การทำคอมโพสิต (Composite) ซึ่งเป็นการนำวัสดุชนิดหนึ่งไปเป็นวัสดุเสริม (Reinforcement) ในวัสดุหลัก (Matrix) เพื่อทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติบางอย่างดีขึ้นหรือมีสมบัติพิเศษบางอย่างต่างออกไปในทางที่ต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางแม่เนติกของวัสดุคอมโพสิต Ba_2FeMoO_6 โดยในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อหาสาเหตุหรือจุดเริ่มต้นของการมีค่าคงที่แม่เนติกที่สูงมากของวัสดุชนิดนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติความแม่เนติก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางแม่เนติกของวัสดุที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เตรียมวัสดุแม่เหล็กโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction, SSR)
- 1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุแม่เนติกตัวอย่างภายใต้สภาวะต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้แนวทางในการศึกษาเงื่อนไขการเตรียมวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมในการเพิ่มค่าคงที่แม่เนติกของวัสดุชนิดอื่น ๆ ได้
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ใหม่และเข้าใจถึงกลไกของกระบวนการการเกิดคอมโพสิตและผลของการคอมโพสิตต่อสมบัติทางแม่เนติก

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนกับชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีวัสดุที่เป็นแม่เหล็กเป็นส่วนประกอบ

1.4.4 ก่อให้เกิดประโยชน์ทางการศึกษาอันนำมาซึ่งองค์ความรู้ใหม่และสามารถผลิตผลงานที่สามารถตีพิมพ์ในวารสารชั้นนำได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ Ba_2FeMoO_6 (BFMO) ที่รายงานในบทนี้จะประกอบด้วยความรู้ทั่วเกี่ยวกับ ชนิดของแม่เหล็ก หลักการทำงานของวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กประกอบและองค์ประกอบทางเคมี ผลของควมถี่ อุณหภูมิและปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กรวมทั้งหรือจุดเริ่มต้นของการมีค่าคงที่แม่เหล็กรวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติของวัสดุที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กประกอบ

2.1.1 สมบัติทางแม่เหล็กของเซรามิกส์ (Magnetic Properties of Ceramics) [1]

วัสดุแม่เหล็กมีรูปร่างรูปทรงที่แตกต่างกันไป เช่น แท่ง ก้อน แผ่น รูปเกือกม้าและรูปทรงอื่น ๆ ตามการใช้งานในแต่ละประเภทประโยชน์ของวัสดุแม่เหล็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ลำโพง ฮาร์ดดิสก์ ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ไดนาโม มอเตอร์ และในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตามความจำเป็น

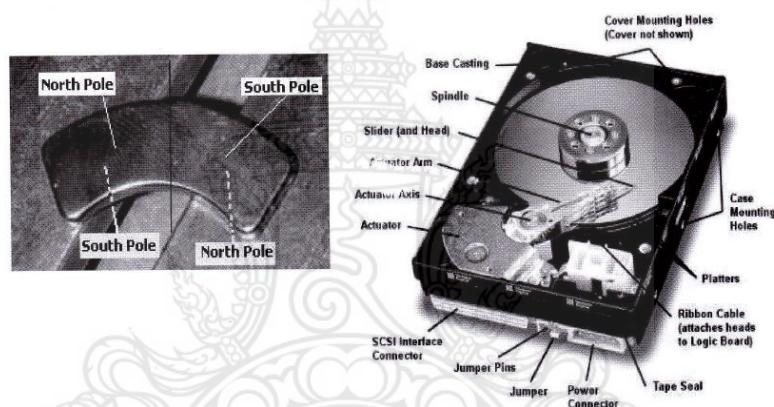


รูปที่ 2.1 วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กและการใช้ประโยชน์ [1]

การเติบโตทางเศรษฐกิจของวัสดุแม่เหล็กนั้นเพิ่มสูงขึ้นมากจากอดีตจนถึงปัจจุบันและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นอีกในอนาคตเนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน และชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม มีความจำเป็นที่ต้องใช้ชิ้นส่วนแม่เหล็ก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้

2.1.2 วัสดุเซรามิกที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Ceramic Materials) [1]

แถบแม่เหล็กที่ผลิตจากเซรามิกส์บรรจุในฮาร์ดดิสก์ (Harddisk) สามารถใช้บันทึกข้อมูลโดยการใช้วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กเก็บข้อมูลที่เป็นต้องบันทึกจะถูกเก็บและเรียกอ่านได้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของไดโพลโมเมนต์ในแต่ละโดเมน (Domain) ของโครงสร้างผลึกโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเมื่อวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กดังกล่าววางอยู่ในสนามแม่เหล็กหรือวางอยู่ในทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือ (North Pole) และขั้วใต้ (South Pole) ในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ นอกจากนี้บริเวณหัวอ่านหรือหัวบันทึกข้อมูล (Head Recorder , Read Rrite Head) มีอุปกรณ์ช่วยในการเก็บและบันทึกข้อมูลที่เรียกว่าหัวแอกชูเอเตอร์ (Head Actuator) ทำให้การเก็บบันทึกข้อมูลทำได้ง่ายและสะดวกเนื่องจากเป็นวัสดุที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเคลื่อนที่ได้สะดวก



รูปที่ 2.2 วัสดุเซรามิกส์ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ [1]

2.1.3 หลักการทำงานของวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก

วัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับค่าไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) หรือ แมกเนติกโมเมนต์ (Magnetic Moment, μ_m) ดังสมการ

$$\mu_m = IAU_n \quad (2.1)$$

I คือกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์,A), A พื้นที่ (ตารางเมตร, m^2), และ U_n คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยสภาพการนำแม่เหล็กหรือแมกเนไตเซชัน (Magnetization, M) คือค่าแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M = n_{at}\mu_{av} \quad (2.2)$$

โดยที่ n_{at} คือ จำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและ μ_{av} คือค่าแมกเนติกไดโพลโมเมนต์เฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยอะตอม ค่าแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ทั้งหมด (Total Magnetic Dipole Moment)

= $M \times \text{Volume} = MAI$ ตามแต่ลักษณะรูปร่างของวัสดุแม่เหล็กค่าแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ทั้งหมด (Total Magnetic Dipole Moment) = กระแสไฟฟ้าโดยรวม (Total Current) \times พื้นที่หน้าตัด (Cross Sectional Area) = $I_m A$

I_m คือกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยความยาวของขั้วตัวอย่างสนามแม่เหล็กเนื่องจากสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetization Field or Magnetic Field Intensity, H) ในหน่วย แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) เกิดจากการให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขดลวดตัวนำแล้วเกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก

$$H = \frac{B_0}{\mu} n l = \text{Total Conduction Current Per Unit Length} \quad (2.3)$$

2.1.4 การเหนี่ยวนำการเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Permeability, μ)

สภาพการเหนี่ยวนำให้เป็นวัสดุแม่เหล็ก (μ) เกิดขึ้นเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุแม่เหล็กแล้วเกิดสภาพเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) สัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H), μ_0 มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร (Henry/m) และสภาพการเหนี่ยวนำเป็นวัสดุแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับสภาพการเหนี่ยวนำของสุญญากาศเรียกว่าสภาพการเหนี่ยวนำการเป็นวัสดุแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) ดังสมการ

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.5)$$

2.1.5 ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility, χ_m)

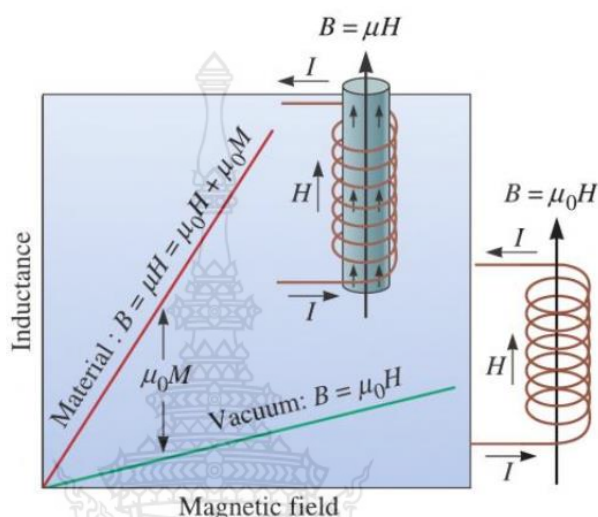
ความว่องไวของการเป็นวัสดุแม่เหล็กสัมพันธ์กับสภาพการนำแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กโดยกำหนดให้ตัวกลางต้องมีสมบัติเหมือนกันทั้งระบบในทุกทิศทาง (Isotropy) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$M = \chi_m H \quad (2.6)$$

ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็กมีความแตกต่างกันอยู่กับวัสดุแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 5 ชนิด เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) เฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) พาราแมกเนติก (Paramagnetic) และแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่าสภาพการเหนี่ยวนำเป็นวัสดุแม่เหล็ก (μ) แตกต่างกันดังสมการ

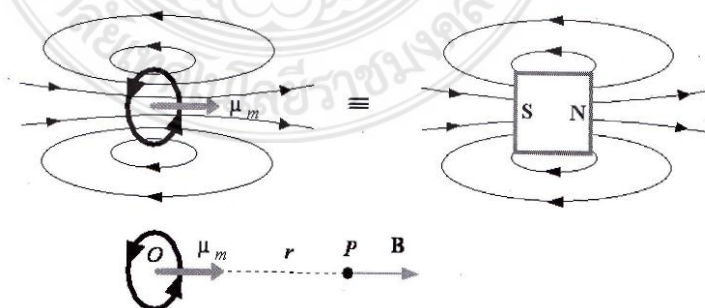
$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.7)$$

จากรูป 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสภาพการเหนี่ยวนำของวัสดุแม่เหล็กกับสุญญากาศ โดยการนำขดลวดตัวนำมาวางแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของความเข้ม



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบสภาพการเหนี่ยวนำของวัสดุแม่เหล็กกับสุญญากาศ [3]

สนามแม่เหล็กในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าแล้วทำให้ขดลวดดังกล่าวมีสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Induction, B) เกิดขึ้นแต่ขดลวดดังกล่าวไม่มีวัสดุแม่เหล็กสอดอยู่ด้านในของขดลวดส่งผลให้ความซาบซึมได้อย่างสมบูรณ์ (Absolute Permeability, μ) ของการเป็นวัสดุแม่เหล็กคือสุญญากาศดังนั้นความซาบซึมได้อย่างสมบูรณ์มีค่าเทียบเท่ากับสภาพสุญญากาศ (μ_0) สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) จึงมีค่าเท่ากับ $\mu_0 H$ แต่สำหรับขดลวดตัวนำที่มีวัสดุแม่เหล็กสอดอยู่ในขดลวดตัวนำ ค่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) จะไม่ใช่สุญญากาศแต่จะมีค่าสูงกว่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ μH



รูปที่ 2.4 สภาพการเกิดสนามแม่เหล็ก

แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กตามเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เรียกว่าการสปิน (Spin) ในสองทิศทางคืออิเล็กตรอนสปิน (Electron Spin) รอบตัวเองและ

อิเล็กตรอนโคจร (Orbiting Electron) รอบนิวเคลียส ซึ่งหากเปรียบเทียบก็คล้ายกับว่าทิศทางสนามแม่เหล็กคือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามเส้นแม่เหล็กระหว่าง ขั้วใต้ (South Pole) และขั้วเหนือ (North Pole) ทำให้เกิดสภาพการเหนี่ยวนำวัสดุแม่เหล็กแมกเนไตเซชัน (M)

สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) ค่าการเหนี่ยวนำ (Inductance, L) ของแกนวัสดุแม่เหล็กทอรอยด์ (Toroidal) ที่มีสายไฟพันรอบ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{l} \quad (2.8)$$

$$L = \frac{N \Phi}{I} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l} = \frac{\text{Total flux}}{\text{Current}} \quad (2.9)$$

ตารางที่ 2.1 หน่วยวัดปริมาณทางแม่เหล็ก (Magnetic Quantity Unit) [1]

ปริมาณแม่เหล็ก Magnetic Quantity	สัญลักษณ์	การนิยาม Definition	หน่วยเอสไอ (SI Unit)
สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) หรือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction)	B	$F = qV \times B$	เทสลา (Tesla, T) หรือเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Webers.m ⁻²)
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)	Φ	$\Delta \Phi = B_{\text{normal}} \Delta A$	เวเบอร์ (Weber, Wb)
แมกเนติกไดโพล โมเมนต์ (Magnetic Dipole Moment)	μ_m	$\mu_m = IA$	แอมแปร์ตารางเมตร (A.m ²)
แมกนีตรอนของบอร์ (Bohr Magnetic)	β	$B = e\lambda/2m_e$	แอมแปร์ตารางเมตรหรือจูลต่อ เทสลา (A.m ² or J.T ⁻¹)
เวกเตอร์แมกเนไตเซชัน (Magnetization Vector)	M	แมกเนติกโมเมนต์ ต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตร	แอมแปร์ต่อเมตร (A.,m ⁻¹)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) หน่วยวัดปริมาณทางแม่เหล็ก (Magnetic Quantity Unit)

ปริมาณแม่เหล็ก Magnetic Quantity	สัญลักษณ์	การนิยาม Definition	หน่วยเอสไอ (SI Unit)
ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)	H		แอมแปร์ตารางเมตร (A.m ⁻¹)
ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility)	χ_m	$M = \chi_m H$	ไม่มีหน่วย
ความซาบซึมได้อย่างสมบูรณ์ (Absolute Permeability)	μ_0	$C = [\epsilon_0 \mu_0]^{-1/2}$	เฮนรีต่อเมตร หรือ เวเบอร์ต่อเมตรต่อแอมแปร์
ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability)	μ_r	$\mu_r = B / \mu_0 \mu_r$	ไม่มีหน่วย
ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)	μ	$\mu = \mu_0 \mu_r$	เฮนรีต่อเมตร H.m ⁻¹

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) หน่วยวัดปริมาณทางแม่เหล็ก (Magnetic Quantity Unit)

ปริมาณแม่เหล็ก Magnetic Quantity	สัญลักษณ์	การนิยาม Definition	หน่วยเอสไอ (SI Unit)
สภาพเหนี่ยวนำ (Induction)	L	$L = \Phi_{\text{Total}}/I$	เฮนรี่ (Henries, H)
ความหนาแน่นพลังงานแม่เหล็ก (Magnetic Energy Density)	E_{Vol}	$dE_{\text{Vol}} = HdB$	จูลต่อลูกบาศก์เมตร ($J.m^3$)

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนหน่วยของปริมาณทางแม่เหล็ก [1]

สมบัติทางแม่เหล็ก Magnetic Properties	หน่วยอิลีก โทรแมกเนติก Gaussian and cgs emu	หน่วยเอสไอ SI Units	การเปลี่ยนหน่วย
สภาพเหนี่ยวนำหรือความ หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Inductance or Magnetic Flux Density)	Gauss (G)	Tesla (or Weber (Wb)/m ²)	1 Tesla = 10 ⁴ G, Wb/m ²
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Φ)	Maxwell (Mx), G- cm ²	Wb Volt-second	1Wb = 10 ⁸ G-cm ²
ความแตกต่างฟลักซ์แม่เหล็กหรือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแม่เหล็ก (Magnetic Potential Difference or Magnetic Electromotive Force) (U,F)	Gilbert (Gb)	Ampere (A)	1A = 4 π ×10 ⁻¹ Gb
ความแรงของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength, Magnetizing Force) (H)	Oersted (Oe) Gilbert (Gb)/cm	A/m	1A/M = 4 π ×10 ⁻³ Oe

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) การเปลี่ยนหน่วยของปริมาณทางแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็ก Magnetic Properties	หน่วยอิลีก โทรแมกเนติก Gaussian and cgs emu	หน่วยเอสไอ SI Untis	การเปลี่ยนหน่วย
แมกเนไทเซชัน (Magnetization, M) (เชิงปริมาตร)	emu/cm ³	A/m	1A/m = 10 ⁻³ emu/cm ³
แมกเนไทเซชัน (Magnetization) (เชิงปริมาณ)	G	A/m	1A/m = 10 ⁻³ G
โพลาริเซชันแมกเนติก (Magnetic Polarization or Intensity of Magnetization, J or I)	emu/cm ³	T, Wb/m ²	1Tesla(1/4π)×10 ⁻⁴ emu/cm ³
แมกเนไทเซชัน (Magnetization, σ, M) (เชิงมวล)	emu/g	A - m ² /kg Wb - m/Kg	1or1 Wb- m/Kg = (1/4π)×10 ¹⁰ emua/g
แมกเนติกไดโพลโมเมนต์ (Magnetic Dipole Moment)	emu, erg/G	Wb - m	1Wb - = (1/4π)×10 ¹⁰ emu
ความซบซึ่มได้ของแม่เหล็ก (Magnetic Permeability, μ)	ไม่มีหน่วย	Wb/A.m(henry,H/m)	1Wb/A - m = (1/4π)×10 ⁷
ความซบซึ่มได้ของแม่เหล็ก สุญญากาศ Magnetic Permeabilty or Free Space μ ₀	1 gauss/oersted	μ ₀ = (4π)×10 ⁻⁷ H/m	
ความซบซึ่มได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability, μ _r)	ไม่มีหน่วย	ไม่มีหน่วย	1J/m ³ = 10erg/cm ³

2.1.6 ฮิสเตอร์ซิซิสและสมบัติแม่เหล็ก [5]

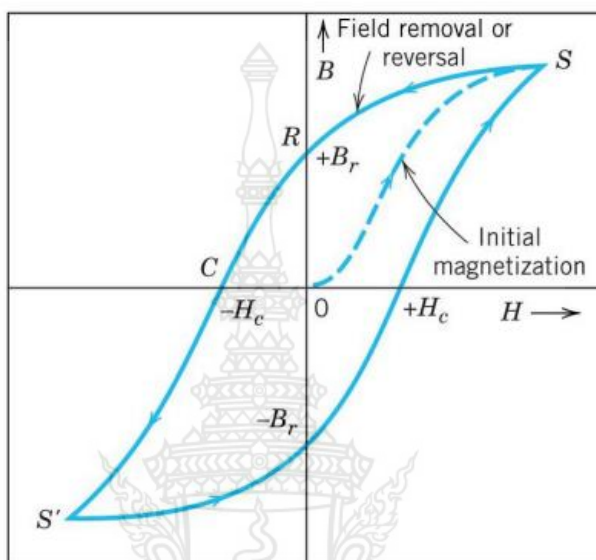
วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริมีการตอบสนองต่อแม่เหล็กภายนอกอย่างมากจึงจัดเป็นกลุ่มวัสดุแม่เหล็กที่น่าสนใจมีสมบัติแม่เหล็กเฉพาะตัวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางแม่เหล็กได้หลากหลายเมื่อวัดสมบัติเชิงมหภาพ (Macroscopic Properties) ของวัสดุเฟอร์โรและเฟอร์ริจะพบว่าทั้งสองชนิดแสดงสมบัติแม่เหล็กที่คล้ายคลึงกันเมื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่าง M-H จะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะเรียกว่า กราฟฮิสเตอร์ซิซิสลูป (Hysteresis Loop)

ฮิสเตอร์ซิซิส คือสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร แบบไม่เป็นเชิงเส้นและการเพิ่ม H กลับลด H การเปลี่ยนแปลงของ M จะไม่เป็นไปตามเส้นทางเดิมหากเราทำการให้สนามแม่เหล็กกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรเพื่อให้เห็นสมบัติแม่เหล็ก (เรียกว่า ทำการแมกไนไตซ์ Magnetize) โดยเริ่มจากจุด (0,0) ในรูปที่ 2.5 เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก H แมกไนไตเซชัน M จะเพิ่มตามเส้นประ ซึ่งจะไม่เป็นเส้นตรงเมื่อให้สนามแม่เหล็ก H เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดหนึ่งค่า M จะถึงจุดอิ่มตัว (จุด S) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกแม้ว่าเหตุจะถูกเพิ่มขึ้นก็ตาม เรียกจุด S ว่าค่าแมกไนไตเซชันอิ่มตัว หรือ Saturation Magnetization (M_s) วัสดุมีค่า M_s มากจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กที่แรงจากจุด S เมื่อทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กลง M ก็จะลดลงด้วยแต่จะไม่ลดลงตามเส้นประตามเดิมแต่จะลดลงตามแนวเส้นโค้ง SR เราเรียกลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงของ M ไม่ตามเส้นทางเดิมนี้ว่า ฮิสเตอร์ซิซิส ผลของฮิสเตอร์ซิซิส ที่จุด R แม้สนามแม่เหล็กเหล็กจะเป็น 0 แล้วก็ตามแต่ยังมีค่า M เหลืออยู่ในวัสดุแม่เหล็กเราเรียกค่านี้ว่า เรมานนซ์ (Remanence) ใช้สัญลักษณ์ M_r แม่เหล็กถาวรทุกตัวต้องการค่านี้มากๆ ถ้าต้องการให้ค่า M เป็น 0 ต้องให้สนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามและมีขนาดแรงเพียงพอเท่ากับ จุด C สนามแม่เหล็ก ณ จุด C เรียกว่า แรงโคเออซิฟ (Coercive Force) หรือ โคเออซิตี (Coercivity) ใช้สัญลักษณ์ H_c มีวัสดุที่มีค่า H_c มากจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnetic Material) ในขณะที่วัสดุที่มีค่า H_c น้อยจัดว่าเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnetic Material) ถ้าอยากให้สนามแม่เหล็ก H ในทิศตรงกันข้ามเป็น (เป็นค่าลบ) ต่อไปเรื่อยๆจะเกิดการอิ่มตัวของ M ขึ้นที่จุด S จัดว่าเป็น M_s เช่นกันจากนั้นถ้าทำการลดขนาดของสนามแม่เหล็ก M จะลดลงเรื่อยๆตามเส้นโค้ง และมีค่า M_r ที่จุด -Br จากนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศบวกจะได้ค่าสนาม H_c และหาก H ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะกลับมาถึงจุดอิ่มตัว การเปลี่ยนแปลงของ M-H ตามเส้นโค้งที่กล่าวมาเรียกว่า Hysteresis Loop

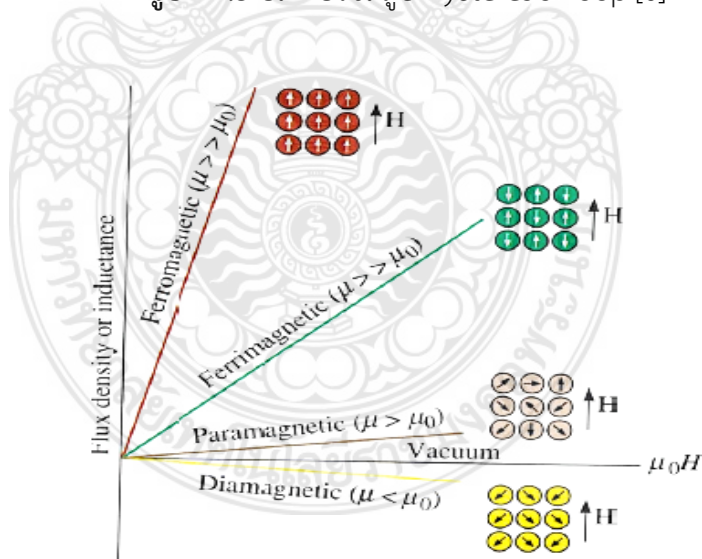
2.1.7 ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก

วัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็นหลากหลายชนิดตามโครงสร้างสมบัติของวัสดุ ถ้าแบ่งชนิดของวัสดุตามสมบัติแม่เหล็กสามารถแบ่งชนิดของวัสดุได้ทั้งหมด 5 ชนิดหลักๆ ได้แก่ แม่เหล็กไดอะแม่เหล็กพารา แม่เหล็กเฟอร์โร แม่เหล็กแอนติเฟอร์โร และแม่เหล็กเฟอร์ริ การแบ่งชนิดดังกล่าวนี้ขึ้นกับการตอบสนองของวัสดุแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก (H) เข้าไป นิยมเขียน

ความสัมพันธ์การตอบสนองของวัสดุต่อสนามแม่เหล็กภายนอกในรูปของกราฟระหว่าง H กับแมกเนไตเซชัน (M) เรียกว่าเส้นโค้งแมกเนไตเซชัน (Magnetization Curve) ความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ฮิสเตอร์ซิสลูป Hysteresis Loop [6]



รูปที่ 2.6 ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก [3]

2.1.7.1 ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) วัสดุแม่เหล็กชนิดไดอะแมกเนติกที่มีค่าความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility) ค่าติดลบมาก (Small Negative Magnetic Susceptibility) ตัวอย่างเช่นผลึกซิลิกอนที่มีค่าความว่องไวการเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

$(\chi_m) = -5.2 \times 10^6$ หมายความว่าผลึกซิลิกอนมีค่าสภาพการเหนี่ยวนำเป็นวัสดุแม่เหล็ก (μ) ต่ำมาก และหากผลึกซิลิกอนวางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์หรือแมกเนโตเซชัน (M) ที่มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำ ทำให้สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) มีค่าน้อยกว่าสุญญากาศ $\mu_0 H$



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กชนิดไดอะแมกเนติก

2.1.7.2 พาราแมกเนติก (Paramagnetic) วัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติกจะมีความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าเป็นบวกไม่มาก (Small Positive Magnetic Susceptibility) ตัวอย่างเช่น ก๊าซออกซิเจนมีค่าความว่องไวการเป็นวัสดุ $(\chi_m) = 2.1 \times 10^5$ ที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิห้อง เมื่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่ในสภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่กระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบและโมเลกุลเกิดการชนกันเองทำให้ค่าแมกเนโตเซชันลดลงเท่ากับศูนย์ $(M) = 0$ แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับโมเลกุลของก๊าซจะส่งผลให้ค่าแมกเนโตเซชันเพิ่มสูงขึ้นที่กับ $\mu_0 H$



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก

2.1.7.3 เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) วัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก ตัวอย่างเช่น เหล็กหรือผลึกของธาตุเหล็ก (Fe Crystal), นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) จัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติของการเป็นสนามแม่เหล็กก็ตาม ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) เนื่องจากมีค่าแมกเนโตเซชันสูงมาก χ_m แม้ว่าจะไม่ได้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก มีค่าบวกสูงมากกว่า 10^6 เท่า (Large Positive Magnetic Susceptibility) และเมื่อวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ค่าแมกเนโตเซชันก็

จะยิ่งสูงมากทิศทางสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กภายนอกจนนับค่าไม่ได้ลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) เมื่อพลอตกราฟมีลักษณะเป็นวงรอบ (Loop) ที่เรียกว่าวงรอบฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเสียไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะหมดสภาพการเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) เนื่องจากการจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์จะเปลี่ยนไปในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก

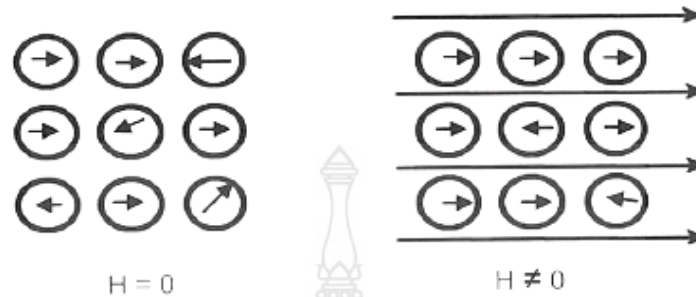


รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ของวัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก

2.1.7.4 แอนไทเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) เป็นวัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุแม่เหล็กชนิดแอนไทเฟอร์โรแมกเนติกเช่นโครเมียมออกไซด์มีค่าแมกเนไตเซชัน (M) เป็นบวกต่ำ ๆ เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางการจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์แบบสุ่ม (Random) แต่หากวางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกจะเกิดการหักล้างค่าไดโพลโมเมนต์ ค่าแมกเนไตเซชันจะลดลงมีค่าเท่ากับหรือใกล้ศูนย์สภาวะดังกล่าวถูกกำหนดไว้ที่อุณหภูมิแวลล์ต้องไม่เกิน อุณหภูมิเนล (Neel Temperature, T_n) และหากการเหนี่ยวนำที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิเนล จะส่งผลให้วัสดุแม่เหล็กชนิดแอนไทเฟอร์โรแมกเนติกเปลี่ยนสภาพกลายเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก

2.1.7.5 เฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) โดยส่วนใหญ่วัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์ริแมกเนติกคือวัสดุในกลุ่มเฟอร์ไรต์ที่มีสูตรโครงสร้างแบบสปินเนลหรืออินเวอร์ตสปินเนลหรือ (Spinel, AB_2O_4 or Inverted Spinel A_2BO_4) ได้แก่ Fe_3O_4 มีพฤติกรรมเหมือนกันวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวรเมื่อมีการใช้งานที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) แต่หากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรี จะส่งผลให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกเปลี่ยนสภาพกลายเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติกแทน เนื่องจากเกิดการหักล้างของค่าไดโพลโมเมนต์ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าไดโพลหักล้างสุทธิรวมแล้วไม่เท่ากับศูนย์ (ค่าไดโพลโมเมนต์ $\neq 0$) แตกต่างจากวัสดุแม่เหล็กชนิดแอนไทเฟอร์โรแมกเนติกที่ค่าไดโพลโมเมนต์รวมเป็นศูนย์ และจากโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกพบว่าจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำของพลังงานในระดับชั้นแถบนำไฟฟ้าซึ่งเป็นข้อดีที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกไม่เกิดการสูญเสียกระแสวน

(Eddy Current Losses) จึงสามารถประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่สูง ๆ ได้ดี (High-Frequency Electronics Applications) ตัวอย่างเช่น การใช้งานเป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟ



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์ของวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก

การจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์ของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกจากข้อมูลของวัสดุแม่เหล็กทั้งหมด อาจกล่าวได้ว่าวัสดุแม่เหล็กที่มีการใช้งานอุตสาหกรรมและในชีวิตประจำวันแบ่งเป็นสองกลุ่มที่สำคัญคือ แม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) หรือแม่เหล็กชั่วคราว (Temporary Magnets) และแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) หรือแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกโดยมีอุณหภูมิคูรีแต่ละชนิดของวัสดุแม่เหล็กแตกต่างกันดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก [1]

ชนิดแม่เหล็ก	ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก χ_m (ค่าทั่วไป)	ความว่องไวการเป็นแม่เหล็กกับอุณหภูมิ χ_m vs. T	ตัวอย่าง
ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic)	ค่าติดลบน้อย ๆ (-10^{-6})	ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ	สารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์, วัสดุที่มีพันธะหลักโควาเลนต์, อัลคาไลนไฮไลด์ของโลหะบางชนิด เช่น Cu, Ag, Au
	ค่าติดลบและมีค่ามาก (-1)	อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกวิกฤต ($T < T_c$)	สารตัวนำยวดยิ่ง (Superconductors)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก

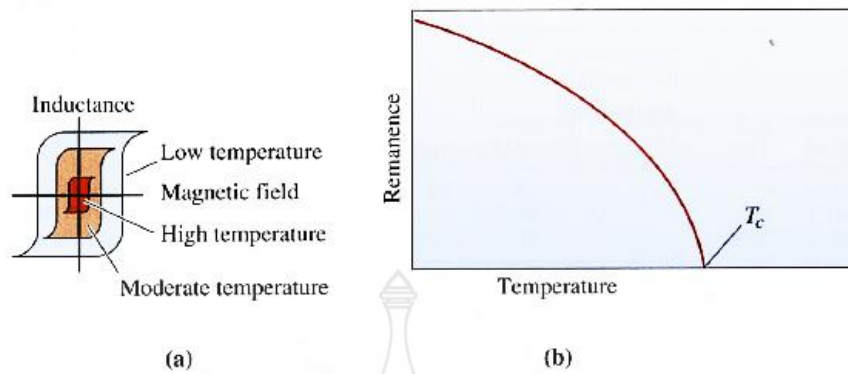
ชนิดแม่เหล็ก	ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก χ_m (ค่าทั่วไป)	ความว่องไวการเป็นแม่เหล็กกับอุณหภูมิ χ_m vs. T	ตัวอย่าง
พาราแมกเนติก (Paramagnetic)	ค่าบวกลittle ๆ (10^{-5} - 10^{-4})	ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ	ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวและการสปีนของอิเล็กตรอนในแถบไฟฟ้า เช่น โลหะ ทรานซิชั่นแชนโลหะอัลคาไลน์
	ค่าบวกลittle ๆ	อุณหภูมิคูร์และคูร์เวส $\chi_m = C/(T - T_c)$	วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมไดโพลโมเมนต์แบบถาวร เช่น โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนและออกซิเจนเหลว, เฟอร์โรแมกเนติกของโลหะเหล็ก, แอนไทเฟอร์โรแมกเนติกของโลหะโครเมียม
เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)	ค่าบวกมาก ๆ (Positive and very large) α -Cr, Mn	เมื่ออุณหภูมิต่ำจะเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกแต่หากอุณหภูมิสูงกว่าคูร์จะเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก	เป็นวัสดุแม่เหล็กถาวรได้วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก applied field. โลหะทรานซิชั่นและโลหะหายาก (rare earth metals) เช่น Fe, Co, Ni, Gd, Dy
แอนไทเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic)	ค่าบวกลittle ๆ (Positive and small)	เมื่ออุณหภูมิต่ำจะเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดแอนไทเฟอร์โรแมกเนติกและหากอุณหภูมิสูงกว่าคูร์จะเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก	เกลือของโลหะทรานซิชั่นและออกไซด์ของโลหะทรานซิชั่น เช่น MnO, NiO, MnF และโลหะทรานซิชั่น เช่น

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก

ชนิดแม่เหล็ก	ความว่องไวการเป็นวัสดุแม่เหล็ก χ_m (ค่าทั่วไป)	ความว่องไวการเป็นแม่เหล็กกับอุณหภูมิ χ_m vs. T	ตัวอย่าง
เฟอร์ริแมกเนติก (Ferimagnetic)	ค่าบวกมาก ๆ (Positive and very large)	เมื่ออุณหภูมิต่ำจะเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกและหากอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีจะเสียสภาพกลายเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก	วัสดุแม่เหล็กถาวรที่ไม่ต้องวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก

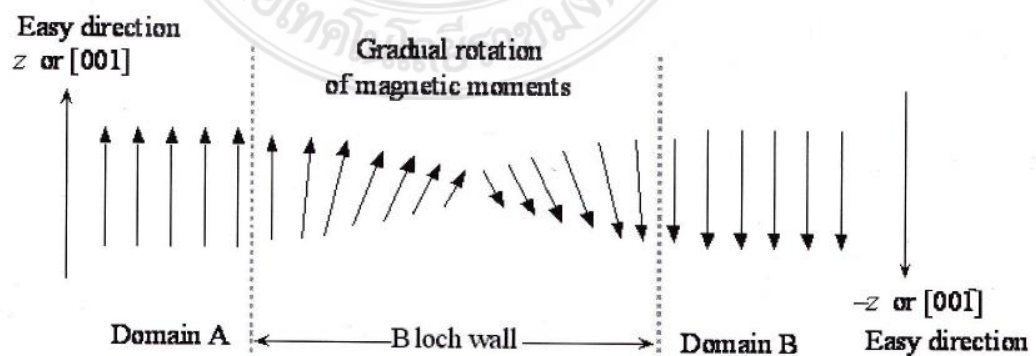
ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิคูรีของวัสดุแม่เหล็ก [1]

ชนิดวัสดุ	อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T _C)
แกดโกลิเนียม (Gadolinium)	16
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312
นิกเกิล (Nickel)	358
แบเรียมออกไซด์เฮกซะไอรอนออกไซด์ (BaO.6Fe ₂ O ₃)	469
Co ₅ Sm	747
ไอรอน (Iron)	771
แอลนิโค 1 (Alnico 1)	780
คูนีโค (Cunico)	855
แอลนิโค 5 (Alnico 5)	900
โคบอลต์ (Cobalt)	1117



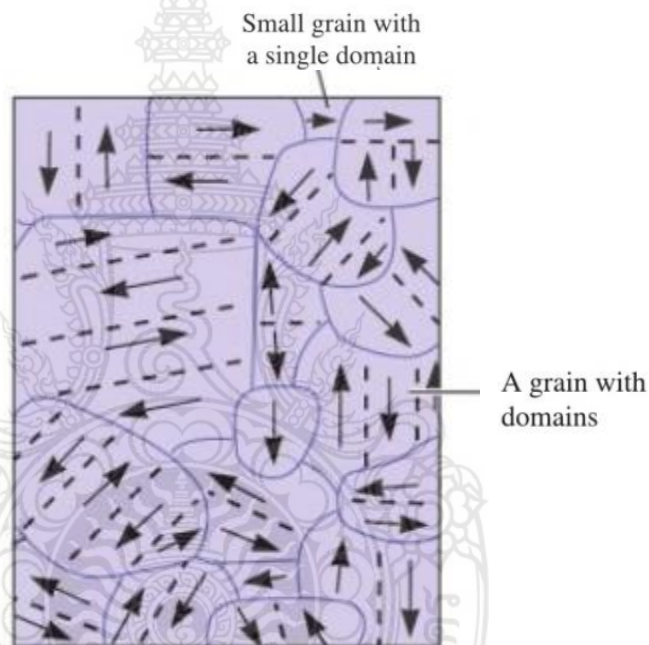
รูปที่ 2.11 การเหนี่ยวนำของวัสดุแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก [3]

รูปที่ 2.11 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) ในสนามแม่เหล็ก (H) เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงพอจะเกิดสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation Induction) ซึ่งหมายถึงการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ที่เป็นระเบียบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงรอบที่เรียกว่า วงรอบฮีสเทอริซิส (Hysteresis Loop) ตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับวัสดุแม่เหล็กจนถึงจุดสูงสุดหรือจุดอิ่มตัวที่แสดงค่าสนามแม่เหล็กและสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงสุดครบวงจรโดยขนาดพื้นที่ของวงรอบฮีสเทอริซิสแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุแม่เหล็กเช่นแม่เหล็กอ่อนหรือแม่เหล็กชั่วคราวจะมีพื้นที่วงรอบฮีสเทอริซิส และแคบหากเป็นวัสดุแม่เหล็กแข็งหรือแม่เหล็กถาวรจะมีพื้นที่วงรอบใหญ่และกว้างดังรูป 2.11 ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิการใช้งานต้องไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) หากอุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรีสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) หรือสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Remanence) จะหมดสภาพไปมีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้วัสดุแม่เหล็กถาวรสองชนิดคือวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic materials) เปลี่ยนสภาพกลายเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก (Paramagnetic Materials)



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึก [2]

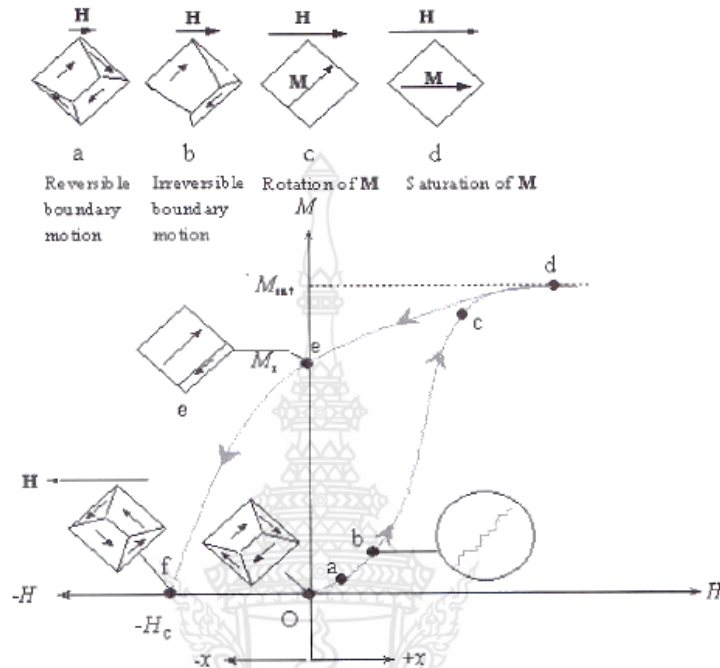
รูปที่ 2.12 แสดงการจัดเรียงของตัวไดโพลโมเมนต์หรือการสปินของอิเล็กตรอนในโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystalline) จากโดเมน A ไปยังโดเมน B ผ่านผนังพลังงาน (Bloch Wall) การสปินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของไดโพลโมเมนต์ในช่วงรอยต่อของผนังพลังงานซึ่งทำมุมกับ 180 องศา นอกจากนี้หากพิจารณาวัสดุที่มีโครงสร้างและผลึก ดังรูป 2.13 พบว่าในแต่ละเกณฑ์ของโครงสร้างผลึกจะมีทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนหรือทิศทางของไดโพลโมเมนต์สุทธจัดเรียงตัวเป็นแนวเดียวกันแต่อาจมีทิศทางของการจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์แตกต่างกันจากเกรนถัดไปโดยตำแหน่งของการเปลี่ยนทิศทางไดโพลโมเมนต์จะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งรอยต่อของผนังพลังงาน (Bloch Wall) ทำมุมเท่ากับ 180 องศา



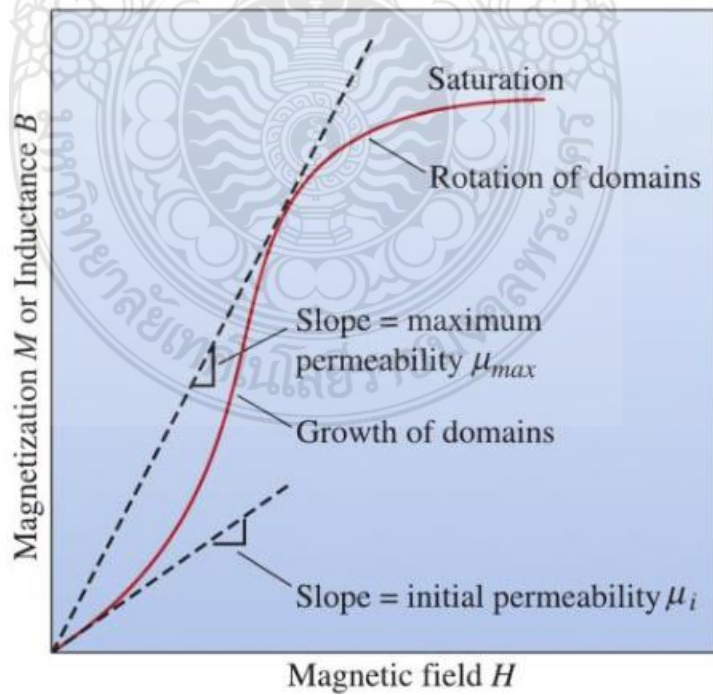
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์ของเกรนภายในโครงสร้างหลายผลึก (Polycrystalline) [2]

รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนไทเซชัน (M) หรือสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับสนามแม่เหล็ก (H) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ไดโพลโมเมนต์ของวัสดุแม่เหล็กที่เป็นระเบียบมากตามค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุดหรือจุดอิ่มตัวหมายความว่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันเมื่อสนามแม่เหล็ก (H) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความซาบซิมได้วัสดุแม่เหล็กจากค่าของความชัน (Slope) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจนถึงค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (μ) อิ่มตัว μ_{max} และหลังจุดอิ่ม (Saturation) ทิศทางการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่แบบวกกลับมาที่จุด M_s เรียกจุดนี้ว่า สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Remanance) เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ($H=0$) และที่จุด ($-H_c$) เรียกว่า สภาพบังคับ

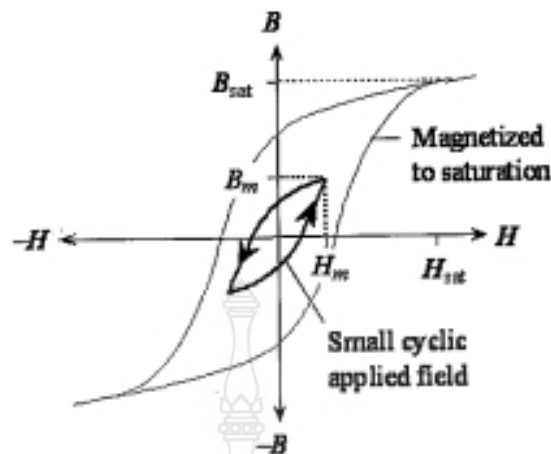
(Coercivity) หมายถึงสถานะที่สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ ($B=0$) แต่ยังคงมีสนามแม่เหล็กคงค้างเท่ากับ ($-H_c$)



รูปที่ 2.14 พฤติกรรมการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก [2]

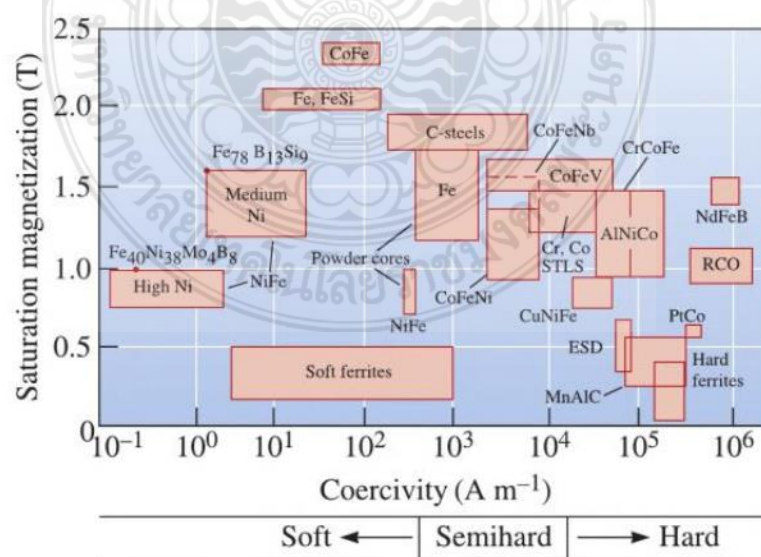


รูปที่ 2.15 การเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ของวัสดุแม่เหล็ก [3]

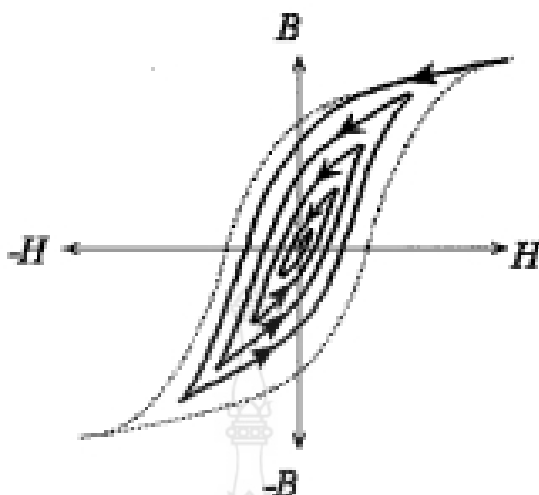


รูปที่ 2.16 สภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก [7]

จากรูป 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ทำให้ได้วงรอบฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loop) เกิดขึ้นและพบว่าภายใต้พื้นที่ของวงรอบฮิสเตอรีซิส จะมีผลต่อความเป็นวัสดุแม่เหล็ก กล่าวคือหากภายในใต้พื้นที่ของวงรอบฮิสเตอรีซิส มีค่ามากแสดงว่าวัสดุแม่เหล็กดังกล่าวมีความเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กแข็ง (Permanent Magnets or Hard Magnets) แต่หากภายใต้พื้นที่ของวงรอบฮิสเตอรีซิส มีค่าน้อยหรือมีค่าต่ำแสดงว่าวัสดุดังกล่าวมีความเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อนหรือแม่เหล็กชั่วคราว (Soft Magnets or Temporary Magnets) นอกจากนี้หากภายใต้พื้นที่ของวงรอบฮิสเตอรีซิสมีค่าปานกลางอยู่ระหว่างค่าแม่เหล็กอ่อนและแม่เหล็กแข็งวัสดุแม่เหล็กกลุ่มนี้เรียกว่าแม่เหล็กกึ่งแข็ง (Semihard Magnets)



รูปที่ 2.17 วัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) แม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และแม่เหล็กกึ่งแข็ง (Semihard Magnets) [4]



รูปที่ 2.18 การสูญเสียสภาพความเป็นวัสดุแม่เหล็ก [7]

จากรูปที่ 2.18 การสูญเสียสภาพความเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Demagnetization) ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลให้ความเป็นแม่เหล็กหรือสภาพเหนี่ยวนำแม่เหล็กค่อย ๆ หมดไปพิจารณาได้จากพื้นที่ของวงรอบฮิสเทอรีซิสมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ 1. อุณหภูมิการใช้งานของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_C) 2. วัสดุแม่เหล็กถูกแรงทางกลกระทำอย่างรุนแรงทำให้การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสียหายส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กเกิดความเสียหาย

2.1.8 วัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets)

วัสดุแม่เหล็กอ่อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายชนิดได้แก่ ชิ้นส่วนของวิทยุเทป เช่น ลำโพง, หัวอ่านและหัวบันทึกของซีดี, หม้อแปลงแถบกว้าง (Wide-Band Transformers), หม้อแปลงกระแส (Current Transformers) อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Magnetic Recording Heads), อุปกรณ์หน่วงไฟ (Electromagnetic Relays) ฉนวนป้องกันสนามแม่เหล็ก (Magnetic Shielding) วัสดุแม่เหล็กอ่อนจะเกิดสภาพเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Demagnetization) ได้ง่ายเนื่องจากมีวงรอบฮิสเทอรีซิส (Small Hysteresis Loop) ที่ได้จากความสัมพันธ์ H-B มีค่าน้อยจึงได้ขนาดพื้นที่วงรอบฮิสเทอรีซิสเล็กและแคบ แม่เหล็กอ่อนส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (Ferrimagnetic Materials) ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลายชนิดมาผสมรวมกันตัวอย่างเช่น แมงกานีสเฟอร์ไรต์ แมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่สูง (High Frequency) โดยเฉพาะสารประกอบออกไซด์การ์เนต (Garnet) เป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) เช่นเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้งานได้ที่ย่านความถี่สูงสุดตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ในเตาไมโครเวฟที่

ความถี่สูงประมาณ 1-300 GHz วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกชนิดคาร์เนต ได้แก่อิตเตรียมไอรอนคาร์เนต เป็นโครงสร้างคาร์เนตชนิดหนึ่งที่เกิดการสูญเสียวงรอบฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ยากที่สุดหรือต่ำสุด เนื่องจากมีความต้านทานการสูญเสียสภาพการเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ย่านความถี่สูงได้ดี จึงจัดได้ว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกชนิดคาร์เนตเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูงมากชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.5 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน [1]

วัสดุแม่เหล็ก	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{Sat} (T)	B_γ (T)	$\mu_{\gamma i}$	μ_{rmax}	W_h	การประยุกต์ใช้งาน
แม่เหล็กอ่อน อุดมคติ (Ideal Soft)	0	ค่าสูงมาก	0	ค่าสูงมาก	ค่าสูงมาก	0	แกนหม้อแปลง, ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor), อุปกรณ์ไฟฟ้า, แกนไฟฟ้า แม่เหล็ก, รีเลย์
เหล็กเกรด การค้า (0.2% สารเจือ ปน)	$< 10^{-4}$	2.2	< 0.1	150	10^4	250	อุปกรณ์ที่มีการ สูญเสียกระแ สจำนวนมาก (Large eddy current loss), ใช้ เฉพาะงานเช่น รีเลย์และ อุปกรณ์ไฟฟ้า แม่เหล็ก

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ชนิดของวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน

วัสดุแม่เหล็ก	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{Sat} (T)	B_γ (T)	$\mu_{\gamma i}$	μ_{rmax}	W_h	การประยุกต์ใช้ งาน
ซิลิกอน-ไอรอน Silicon Iron	$< 10^4$	2.0	0.5-1	103	$10^4-4 \times 10^5$	30-100	ตัวต้านทาน, อุปกรณ์ที่มีการ สูญเสียกระแส วนน้อย, หม้อ แปลง
ซูเปอร์อัล ลอยด์ Supermaloy	2×10^7	0.7-0.8	< 0.1	105	106	< 0.5	ความซาบซึม แม่เหล็กสูง, อุปกรณ์ที่การ สูญเสียสัญญาณ ต่ำ, วงจรขยาย
78 เปอร์อัล ลอยด์ 78 Permaloy	5×10^6	0.86	< 0.1	105	105	< 0.1	อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มี การสูญเสียต่ำ (Low-loss) วิทยุหม้อแปลง ความถี่สูง, หัว บันทึกข้อมูล, ตัว กรองหม้อแปลง
Glassy Metals	2×10^6	1.6	$< 10^{-6}$	8×10^3	105	20	
เฟอร์ไรต์ แมงกานีสซิงค์	10^{-5}	0.4	< 0.01	2×10^3	5×10^3	< 0.01	การใช้งานย่าน ความถี่สูงที่การ สูญเสียสัญญาณ ต่ำ (HF low - loss)

วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) แม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และแม่เหล็ก (Semihard Magnets) มีหลายชนิดทั้งโลหะ อัลลอยด์ สารประกอบเซรามิกส์ชนิดเฟอร์ไรต์ พิจารณาจากค่าสภาพบังคับ (Coercivity) และค่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กอิ่มตัวจากตารางที่ 2.5 แสดงชนิดวัสดุที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุนำแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnets) พบว่ามีทั้งโลหะอัลลอยด์และสารประกอบเซรามิกส์ชนิดเฟอร์ไรต์

2.1.9 วัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets)

วัสดุแม่เหล็กแข็งเป็นวัสดุที่มีสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetization) สูงและเกิดการสูญเสียสภาพความเป็นวัสดุแม่เหล็ก (Demagnetization) ยากมีพื้นที่ภายใต้วงรอบฮิสเตอร์ซิสิกวง (Large Hysteresis loop, B-H Curves) เนื่องจากสภาพบังคับ (Coercivity) มีค่าสูงกว่าวัสดุแม่เหล็กอ่อนหลายล้านเท่า อาจกล่าวได้ว่าวัสดุแม่เหล็กชนิดนี้คือแม่เหล็กแข็งหรือแม่เหล็กถาวรสามารถนำวัสดุกลุ่มนี้มาใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูลในระบบดิจิทัลได้สะดวกมากขึ้น โดยการกำหนดสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก นอกจากนี้วัสดุเซรามิกส้อออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุแม่เหล็กแข็งหรือแม่เหล็กถาวรได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่นแบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{Ba Ferrite BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) หรือสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ ($\text{Sr Ferrite, SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) เนื่องจากโครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรต์แบบเฮกซะโกนมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีค่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ $B=0$ เมื่อสนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ $H=0$ เนื่องจากมีสภาพบังคับสูงมาก (High Coercivity) เหมาะสำหรับการผลิตประยุกต์ใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดและยังเป็นวัสดุที่มีราคาไม่สูงมากนัก

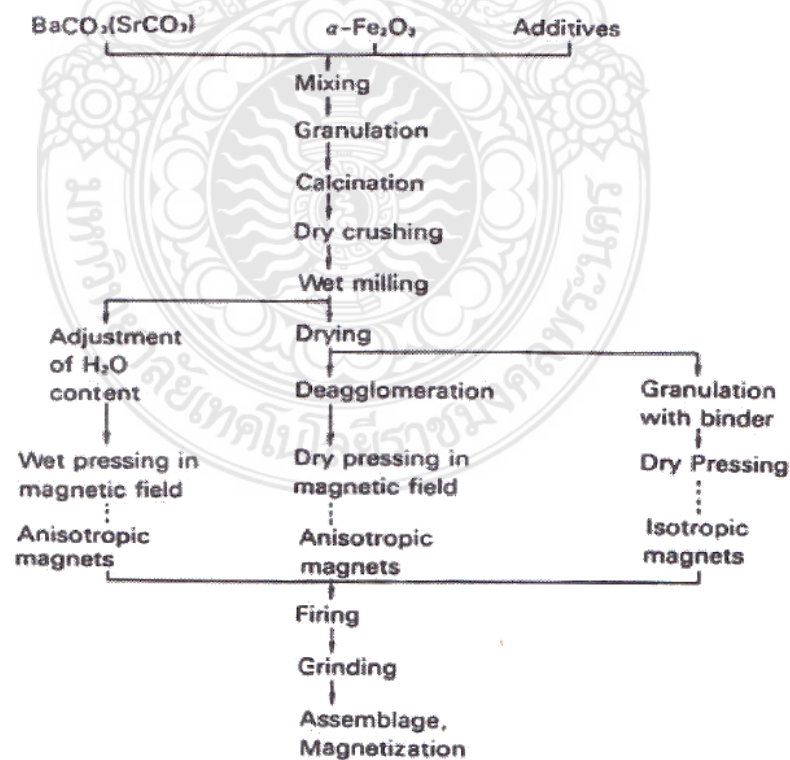
ตารางที่ 2.6 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน [1]

ชนิดวัสดุแม่เหล็ก	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{Sat} (T)	$(BH)_{\text{max}}$ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	ตัวอย่างและการใช้งาน
แม่เหล็กอุดมคติ Ideal Hard	ค่ามาก	ค่ามาก	ค่ามาก	แม่เหล็กถาวรเพื่อการใช้งาน
แอลนิโค (Alnico)	0.19	0.9	50	แม่เหล็กถาวรช่วงกว้าง
แอลนิโค (Alnico) (Columnar)	0.075	1.35	60	
สตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ Strontium Ferrite	0.3 – 0.4	0.36 – 0.43	24 – 34	มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor), สตาร์ทเตอร์มอเตอร์ (Starter Motors), ไมโครโฟน เครื่องรับโทรทัศน์, ของเล่น หลายชนิด

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) ชนิดของวัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) และการประยุกต์ใช้งาน

ชนิดวัสดุแม่เหล็ก	$\mu_0 H_c$ (T)	B_{Sat} (T)	$(BH)_{max}$ (kJ.m ⁻³)	ตัวอย่างและการใช้งาน
Rare Earth Cobalt	0.62 – 1.1	1.1	150 – 240	เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motors), stepper motor coupling, คลัทช์, อุปกรณ์หูฟังที่มีคุณภาพ
NdFeB Magnets	0.9 – 1.0	1.0 – 1.2	200 - 275	มอเตอร์เล็ก เช่น เครื่องมือช่าง อุปกรณ์ สื่อสาร มอเตอร์ซีดี เครื่อง เอ็ม อาร์ ไอ สำหรับการแพทย์ และ อุปกรณ์ คอมพิวเตอร์
Hard Particles	0.03	0.2		วิทยุและวิดีโอเทป, ฟลอปปีดิสก์

วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) มีหลายชนิดทั้งโลหะอัลลอยด์และสารประกอบเซรามิกส์ชนิดเฟอร์ไรต์ พิจารณาค่าสภาพบังคับ (Coercivity) และค่าสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กอิ่มตัวจากตารางที่ 2.6 แสดงวัสดุที่สามารถใช้ในการผลิตวัสดุแม่เหล็กแข็ง (Hard Magnets) พบว่าสามารถเตรียมได้จากการสังเคราะห์ที่ทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กแข็งชนิดเฟอร์ไรต์ (Hard Magnets) [1]

2.1.10 เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (VersaLab) [5]

เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ หรือเครื่อง VersaLab โดยมีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานได้ตั้งแต่ 50 – 400K โดยไม่ต้องใช้ในโตรเจนเหลว สามารถให้สนามแม่เหล็กสูงสุดได้ถึง 30 kOe มีออฟชั่นในการวัดสมบัติของวัสดุได้หลายประเภท เช่นวัดสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็ก เครื่อง VersaLab ควบคุมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MultiVu หลังจากปิดโปรแกรม ถ้าต้องการวัดสมบัติแม่เหล็ก ให้ทำการ Activate VSM Option โปรแกรมจะทำการเชื่อมต่อกับตัวเครื่อง จนหน้าต่าง VSM ขึ้นมาจึงพร้อมใช้งาน VSM เครื่องจะทำการสั่นชิ้นงานด้วยความถี่ 40 Hz ภายใต้สนามแม่เหล็ก ชิ้นงานนี้จะถูกเหนี่ยวนำค่าแม่เหล็กให้เกิดขึ้นตามลักษณะของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด แล้วจะปลดปล่อยสนามแม่เหล็กออกมาตัดผ่านกับขดลวด Pick – Up Coil ซึ่งเป็นตัวตรวจสัญญาณแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแล้วให้ค่า Magnetic Moment ออกมา

2.2 กรอบการวิจัย

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) จะเป็นการการทดลองหาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของวัสดุที่ผู้วิจัยได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตขึ้นมาโดยผ่านกระบวนการทดลองต่าง ๆ และนำวัสดุที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์สมบัติและประสิทธิภาพทางแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (VersaLab: Vibrating Sample Magnetmeter VSM) ที่แสดงผลเป็นวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop)

2.3 ระเบียบวิจัย

สำหรับระเบียบวิจัยนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้น การวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพทางแม่เหล็กโดยใช้วัสดุ แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO Barium carbonate, 99.9%) ไอรอนไนเตรท (Fe (III) Nitrate, 99.0%) และ โมลิบดีนัม (MoO Molybdenum Trioxide, 99.0%) ในอัตราส่วนผสม 1 : 7 : 5 โดยนำวัสดุผงทั้ง 3 ชนิดมาคอมโพสิตกันโดยใช้น้ำ Deionized (DI) เป็นตัวกลางในการประสานวัสดุเข้าด้วยกันและผ่านกระบวนการต่าง ๆ แล้วนำวัสดุที่เตรียมได้นำไปเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ รวมถึงระยะเวลาในการเผาซินเทอร์ เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนโครงสร้างผลึก

2.4 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตลอดเวลาที่ผ่านมา นักวิจัยได้พัฒนาวัสดุเซรามิกส์ที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากปัจจุบันมีแนวโน้มของการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น แต่วัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กนั้นมีมูลค่าที่สูง นักวิจัยจึงเห็นความสำคัญของการผลิตวัสดุเซรามิกส์ที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและ

สามารถนำไปประยุกต์ใช้การผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้หลายอย่าง เช่น ฮาร์ดดิสก์ (Harddisk, Magnetic Storage), ไดนาโม (Dynamo), มอเตอร์ (Motor) และชิ้นส่วนใน อุตสาหกรรม

M.Cernea และคณะ [8] ได้นำวัสดุเซรามิกส์จากสตรอนเชียม (Strontium) ไอรอน (Iron) และ โมลิบดีนัม (Molybdenum) มาทำการคอมโพสิต และได้นำวัสดุไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้นำไปวัดค่า XRD (X-Ray Diffractometer) จากผลการทดลองได้ $Fe_1 = 0.679(35)$, $Mo_1 = 0.321(35)$, $Mo_2 = 1.000(39)$, $Fe_2 = 0.000(39)$ และได้นำวัสดุเซรามิกส์ไปวิเคราะห์เพื่อดูโครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) ต่อมาได้ทำการวัดค่าประสิทธิภาพทางแม่เหล็กของวัสดุเซรามิกส์ชิ้นนี้ ได้อยู่ 3.62 μB และมีค่าแมกนีโตเซชันเท่ากับ 41.18 emu/g

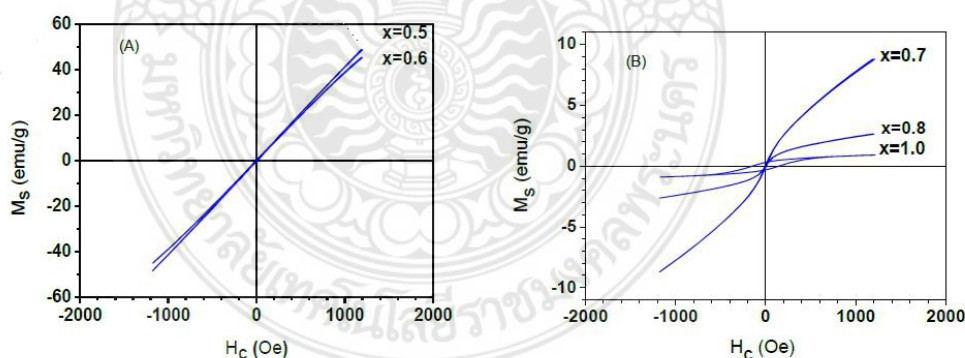
M.Cernea และคณะ [9] ได้นำวัสดุเซรามิกส์จาก สตรอนเชียม (Strontium) ไอรอน (Iron) และ โมลิบดีนัม (Molybdenum) มาทำการคอมโพสิตในตามอัตราส่วน และได้นำวัสดุไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นได้นำไปวัดค่า XRD (X-Ray Diffractometer) จากผลการทดลองได้ $Fe_1 = 0.747(17)$, $Mo_1 = 0.253(17)$, $Mo_2 = 0.953(19)$, $Fe_2 = 0.047(19)$ และได้นำวัสดุเซรามิกส์ไปวิเคราะห์เพื่อดูโครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) ต่อมาได้ทำการวัดค่าประสิทธิภาพทางแม่เหล็กของวัสดุเซรามิกส์ชิ้นนี้ ได้อยู่ที่ 2.7 μB และมีค่าแมกนีโตเซชันเท่ากับ 35.47 emu/g

สุนัน หนองเหล็ก และคณะ [10] ได้สังเคราะห์ผงอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เจือร่วมกับ โลหะทรานซิชั่น เหล็ก และ พาสซีโอโดเมียม เตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และศึกษาโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธี XRD และ SEM หลังจากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการศึกษสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (VSM) ผลจากการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานด้วย XRD พบว่าผงอนุภาคนาโนมีโครงสร้างแบบ มอนอคลินิก และ ผลการศึกษา SEM พบว่า ผงอนุภาคมีลักษณะเป็นแท่งนาโน ในส่วนของคุณสมบัติทางวัสดุแม่เหล็กพบว่าเป็นแม่เหล็กชนิดแบบ เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) และมีค่าแมกนีโตเซชันเท่ากับ 0.0045 emu/g

ดร. อนุชิต ฮันเย็ก และ ผศ.ดร.ธานินทร์ ปัจจุโส [11] ได้สังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กจากวัสดุคอปเปอร์ แมงกานีส และไอรอน โดยการนำวัสดุมาทำการคอมโพสิต และนำวัสดุไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลจากหลังจากนั้นศึกษาคุณสมบัติแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM จากการศึกษาคูสมบัติแม่เหล็กพบว่า มีค่าแมกนีโตเซชัน เท่ากัน 60.09 emu/g ได้ทำการนำผงหมึกเหลือใช้มาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 500, 700, 900 °C และ 1,100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(XRD), การวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) และสมบัติทางด้านแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กผลจากการทดลอง พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงหมึกเหลือใช้เผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิห้องและ เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C นาน 4 ชั่วโมง มีรูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน Fe_3O_4 : 88 - 0866 และสมบัติของลักษณะพื้นผิวผลการวิเคราะห์พบว่า ลักษณะพื้นผิวของผงหมึกเหลือใช้เผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิห้อง 500 °C และ 700 °C มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 208 nm, 233 nm และ 242 nm ตามลำดับ ส่วนลักษณะผงหมึกเหลือใช้เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C และ 1,100 °C มีลักษณะเป็นเม็ดมีขนาดใหญ่เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้รับที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นต้นไปจะมีพลังงานความร้อนเพียงพอที่ทำให้อนุภาคของวัสดุ Fe_3O_4 รวมตัวเป็นเม็ด ต่อมาได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก ได้ทำการทดสอบในเงื่อนไขแต่ละอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิปกติ 500, 700, 900 และ 1,100 °C ผลจากการวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไข ได้แก่ 37, 73, 43, 1.0 และ 1.4 emu/g ตามลำดับ

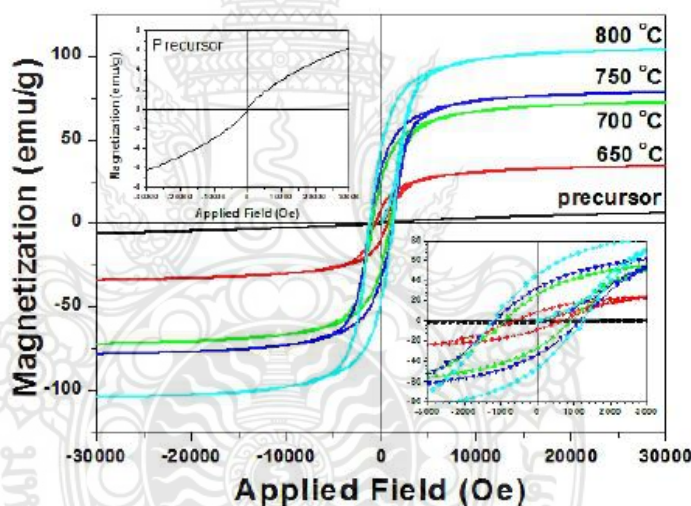
อนุวัฒน์ หัสดี , ตฤลา จุฑะรสก และ วันดี อ่อนเรียบร้อย [12] ได้นำวัสดุ โคบอลต์ (Co) สังกะสี (Zn) ไอรอน (Fe) สังกะสีวัสดุเซรามิกส์ที่มีการแทนที่ระหว่างโคบอลต์และสังกะสีและนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,350 °C เมื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ลักษณะเชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็ก แบบตัวอย่างสั้น (VSM) โดยให้สนามแม่เหล็กสูงสุด 1.2 kOe พบว่า ปริมาณสังกะสีมากขึ้นจาก 0.5 ถึง 1.0 ทำให้แมกเนไทเซชันสูง ลดลงจาก 48.8 เป็น 0.9 emu/g เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,350 °C



รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโคบอลต์ (Co) สังกะสี (Zn) ไอรอน (Fe)

ยุทธพงษ์ ศรีทธา [13] ได้นำเสนอการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกส์ปิสมาท์เฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) โดยทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงเซรามิกส์ที่ 200 °C สรุปผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ของวัสดุที่วิจัยนั้น มีความใกล้เคียงกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่ได้ทำการทดลองไว้ก่อนหน้านี้

พรชนก กุลไชย , ขวัญฤทัย , ปวีณา เหลากุล [14] ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวต่อเฟสของน้ำมันที่แตกต่างกัน คือ 1/10 และ 1/20 กำหนดให้เป็นสารตัวอย่าง A และ B ตามลำดับทำการ ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของอนุภาคผงที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA เตรียมอนุภาคเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์มีโครงสร้างเป็นแบบสปิเนลของ CoFe_2O_4 ขนาดผลึกเฉลี่ยซึ่งคำนวณจากสมการเชอร์เรอร์ของตัวอย่าง A และ B มีค่าอยู่ในช่วง 21.9-45.9 และ 20.5-41.7 นาโน-เมตร ตามลำดับ และเมื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650, 700, 750 และ 800°C มีสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์ริโดยมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเป็น 660.03, 936.86, 1186.23 และ 1236.56 Oe ตามลำดับ และค่า สภาพความเป็นแม่เหล็กจำเพาะที่สนามสูงสุดเป็น 34.076, 72.19, 78.97 และ 103.38 emu/g ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ [15] ได้นำวัสดุ ไททานเนียมต่อแบเรียมไฮดรอกไซด์ มาคอมโพสิตกันอัตราส่วน 5:20 ที่ 90 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นผงแบเรียมไททานเนตที่มีความบริสุทธิ์ ความหนาแน่น 6.2520 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคมีความละเอียด ต่ำกว่า 1 ไมครอน หลังจากนั้นนำวัสดุไปเผาต่อ ที่อุณหภูมิ 1,250 °C – 1,350 °C เมื่อนำวัสดุเซรามิกส์ชนิดนี้ไปวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็ก นั้นพบว่าเป็นแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นกลุ่มชนิดแม่เหล็กถาวร

Saeid Jabbarzare [16] ได้นำวัสดุซีเซียม (Cerium) และ ไอร์ออน (Iron) ซึ่งเป็นวัสดุโลหะ นำมาทำการคอมโพสิต โดยใช้เทคนิค Energy Ball Milling ทำให้เป็นเนื้อวัสดุเดียวกัน หลังจากนั้นได้นำวัสดุไปเผาที่อุณหภูมิ 800, 1,000 และ 1,200 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และได้ทำการวิเคราะห์อนุภาคของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) ขนาดประมาณ 10 - 50 nm ต่อมาใน

การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดนี้ ได้แบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข โดยทำการวิเคราะห์วัสดุที่ผ่านการเผาที่ 800, 1,000 และ 1,200 °C ได้ผลจากการวิเคราะห์ดังนี้ โดยค่าแมกนีไทเซชันของวัสดุแต่ละชนิดได้แก่ 0.38, 0.36 และ 0.28 emu/g ที่อุณหภูมิ 800, 1,000 และ 1,200 °C ตามลำดับ และมีคุณสมบัติเป็นเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวร

Saeid Jabbarzare และคณะ [17] ได้นำวัสดุจากอิตเทรียม (Yttrium) และ ไอรอน (Iron) ชนิดผงมาทำการคอมโพสิต หลังจากนั้นนำวัสดุไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 800, 1,000, 1,200 °C และได้ทำการวิเคราะห์หอนุภาคของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีขนาดประมาณ 50 - 200 nm ต่อมาในการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดนี้มีค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0801 emu/g

ณัฐกฤตา เฟ่งผล และคณะ [18] ผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) เตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล โดยใช้กลีเซอรอลกับกรดซिटริกเพื่อร่วมสร้างเป็นโครงตาข่ายอินทรีย์ ผงแบเรียมเฟอร์ไรท์และพอลิแลกติกแอซิดจะถูกนำมาผสมกันเพื่อทำมาสเตอร์แบทช์ โดยผ่านเครื่องอัดรีดแบบสองเกลียวคู่ จากนั้นขึ้นรูปเส้นใยโดยผสมมาสเตอร์แบทช์ (ในอัตราส่วน 0, 5, 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิแลกติกแอซิด) โดยวิธีการปั่นหลอม หลังจากนั้นนำวัสดุไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เส้นใยที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องดีฟฟิเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในขณะที่ยังมีแม่เหล็กวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น ผลจากการวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์แสดงได้โดยลูบฮิสเทอริซิสดังภาพที่ 4 พบว่ามีสนามแม่เหล็กหักล้าง (Coercivity, H_c) เท่ากับ 2500 Oe ค่าโมเมนต์แม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization, M_s) เท่ากับ 42.12 emu/g และค่าโมเมนต์แม่เหล็กหักล้าง (Remanent Magnetization, M_r) เท่ากับ 25.0 emu/g ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของวัสดุแม่เหล็กถาวร

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นวัสดุหลัก โดยวัสดุหลักคือ BFMO สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผง BFMO ได้สังเคราะห์โดยวิธีปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็ง (Solid State Method) เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นวัสดุผง BFMO จึงสังเคราะห์โดยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อน (Polymerized Complex Method, PC) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ วัสดุผงให้มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เทคนิคการหาขนาดอนุภาคจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) สำหรับการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กจากวัสดุ BFMO และระบุชนิดของแม่เหล็ก รวมถึงศึกษาฮิสเทอรีซิส สมบัติแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรอุณหภูมิต่ำ และ ศึกษาหาค่าโมเมนต์แม่เหล็กและอุณหภูมิคูรีของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์ Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ช่วยวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวัสดุทางแม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิตประกอบต่าง ๆ

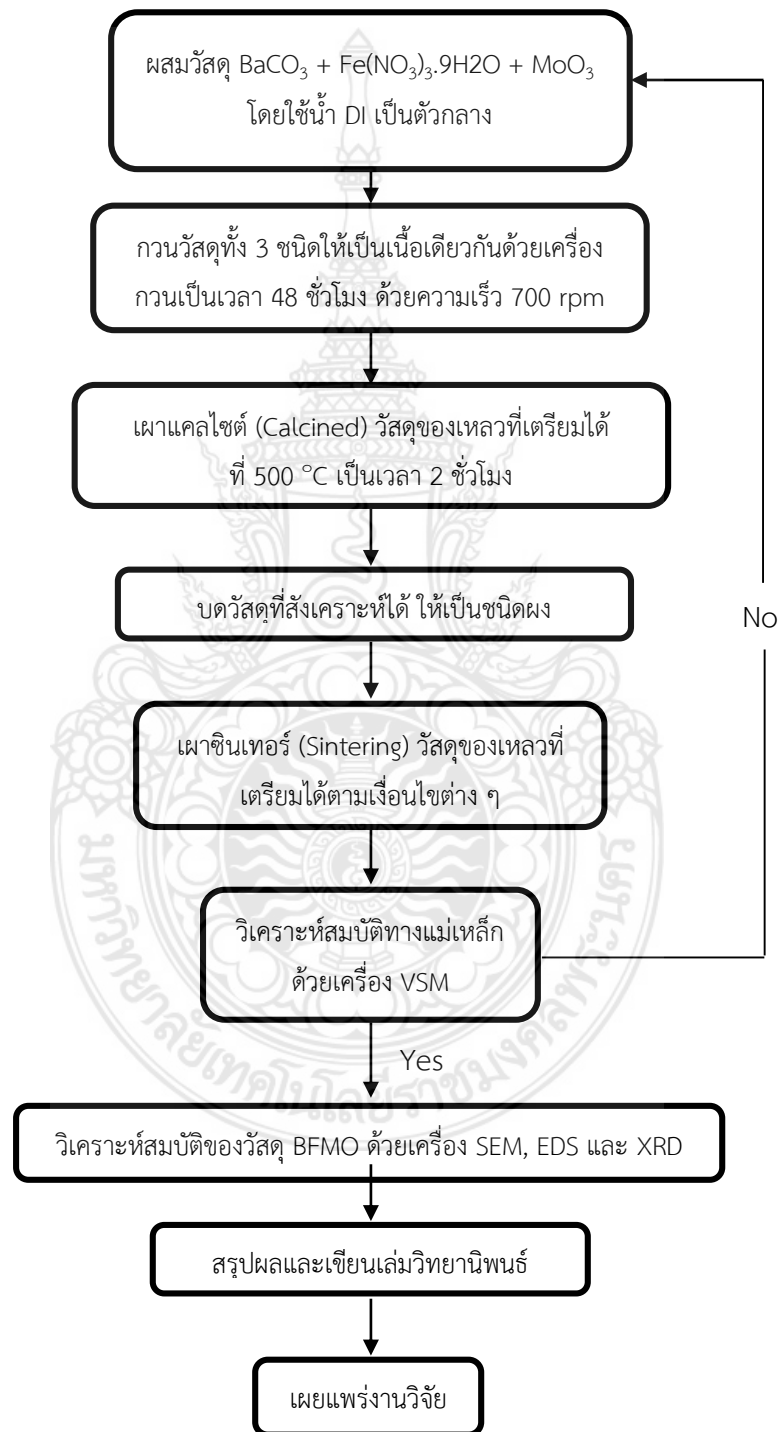
3.1.2 ศึกษาข้อมูลการสังเคราะห์วัสดุผง BFMO โดยวิธีปฏิกิริยาแบบสถานะของแข็ง วัสดุตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วยวัสดุ แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO Barium carbonate, 99.9%) ไอรอนไนเตรท (Fe (III) nitrate, 99.0%) และ โมลิบดีนัม (MoO Molybdenum trioxide, 99.0%) เริ่มต้นด้วยการชั่งวัสดุตั้งต้นตามสัดส่วนโมล โดยใช้ BaCO : Fe : MoO เท่ากับ 1 : 7 : 5 โดยนำวัสดุผงทั้ง 3 ชนิดมาผสมกันโดยใช้เครื่องคนวัสดุ โดยใช้น้ำ Deionized (DI) เป็นตัวกลางในการประสานวัสดุเข้าด้วยกัน โดยใช้แท่งแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอ และ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50 °C ที่ความเร็วรอบ 700 rpm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.1.3 นำตัวอย่างวัสดุที่ของเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกันมาไล่ความชื้นโดยการเผาแคลไซต์ (Calcined) วัสดุของเหลวที่เตรียมได้ ที่ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ จัดเตรียมวัสดุที่ผ่านเผาแคลไซต์ (Calcined) มาทำให้เป็นวัสดุผงโดยการบดละเอียดและเตรียมเข้าสู่การเผาซินเทอร์ (Sintering)

3.1.4 ทำการนำวัสดุผงที่ผ่านการเผาแคลไซต์ (Calcined) มาเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง เพื่อนำวัสดุผงไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กต่อไป

3.1.5 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุ BFMO ด้วยเครื่อง SEM, EDS และ XRD

3.1.6 วิเคราะห์โดยการทำวัสดุผงที่เตรียมได้ ไปทดสอบประสิทธิภาพทางแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ช่วยวิเคราะห์ผล



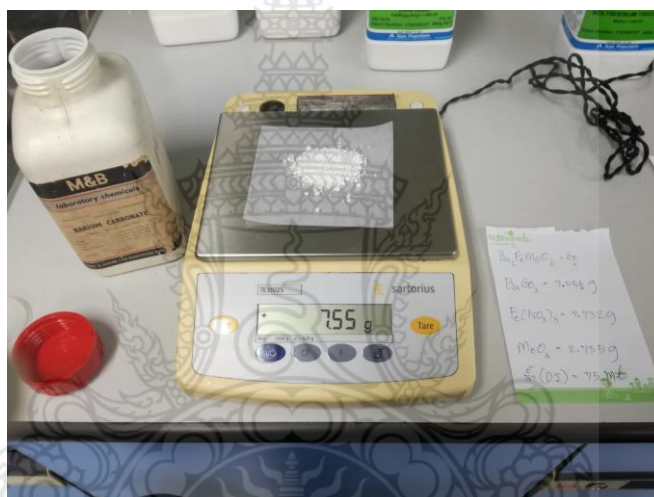
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์และอัตราการส่วผสมของวัสดุ

3.2.1 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3 Barium carbonate, 99.9%) ลักษณะทั่วไปเป็นเม็ดละเอียดสีขาว

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ BaCO_3 [22]

น้ำหนักโมเลกุล	197.34 g/mol
ความหนาแน่น	4.43 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	811 °C
จุดเดือด	1,450°C

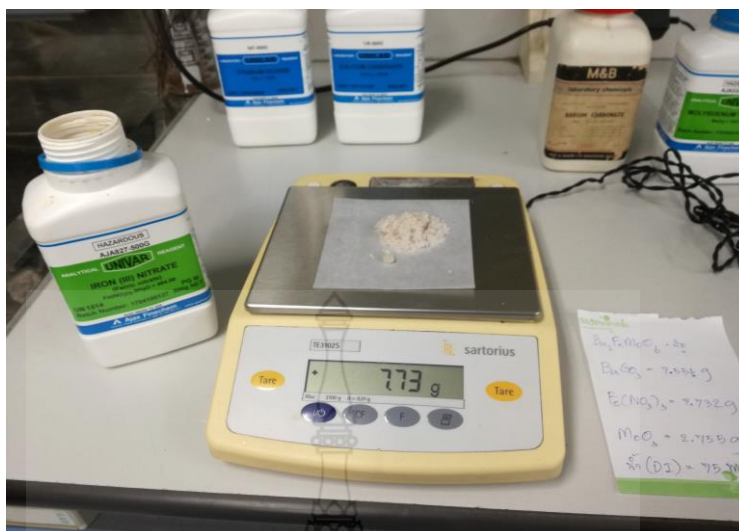


รูปที่ 3.2 แบเรียมคาร์บอเนต BaCO_3 Barium carbonate, 99.9%

3.2.2 ไอรอนไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (III) nitrate, 99.0%) ลักษณะทั่วไปเป็นเม็ดละเอียดสีครีมออกน้ำตาล

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ [22]

น้ำหนักโมเลกุล	241.86 g/mol
ความหนาแน่น	7.860 g/m ³
จุดหลอมเหลว	47.2 °C
จุดเดือด	125 °C



รูปที่ 3.3 ไอรอนไนเตรท $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (III) nitrate, 99.0%

3.2.3 โมลิบดีนัม (MoO_3 Molybdenum trioxide, 99.0%) ลักษณะทั่วไปเป็นเม็ดละเอียดสีฟ้าอ่อน

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ MoO_3 [22]

น้ำหนักโมเลกุล	143.9 g/mol
ความหนาแน่น	4.70 g/m ³
จุดหลอมเหลว	795 °C
จุดเดือด	1,155°C



รูปที่ 3.4 โมลิบดีนัม MoO_3 Molybdenum trioxide, 99.0%

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุผงวัสดุตั้งต้นประกอบด้วย แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3 Barium carbonate, 99.9%) ไอรอนไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (III) nitrate, 99.0%) และ โมลิบดีนัม (MoO_3 Molybdenum trioxide, 99.0%) เริ่มต้นด้วยการชั่งวัสดุตั้งต้นตามสัดส่วนโมลของการคอมโพสิต โดยใช้ $\text{BaCO} : \text{Fe} : \text{MoO}$ เท่ากับ 1 : 7 : 5



รูปที่ 3.5 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ผสมด้วยน้ำ Deionized (DI) ในอัตราส่วน 1 : 7 : 5 หลังจากนั้นคนด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องคนวัสดุด้วยความเร็ว 700 rpm ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอจนกระทั่งวัสดุละลายเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.6 วัสดุสังเคราะห์ BFMO ชนิดเหลว

หลังจากนั้นได้นำวัสดุที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันต่อมาแบ่งวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันใส่ถ้วย
กระเบื้อง ครุซีเบล (Crucible) ก่อนที่จะนำวัสดุดำเนินการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิที่ 500 °C เป็นเวลา
2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 ดำเนินการเผาซินเทอร์วัสดุสังเคราะห์ BFMO

สำหรับการการสังเคราะห์วัสดุผงคอมโพสิต BFMO ใช้วิธีการบดให้ละเอียดโดยนำวัสดุจาก
การเผาแคลไซต์มาใส่ภายในโถบดสารเซรามิกและใช้ที่บดจนละเอียดที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้
เพื่อให้วัสดุมีความละเอียดและนำไปเผาซินเทอร์ (Sintering) การนำวัสดุที่ผ่านการแคลไซต์ที่
500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชนิดที่เป็นผงมาดำเนินการเผาซินเทอร์ (Sintering) ที่อุณหภูมิ ที่ 800
°C เป็นเวลา 4 6 8 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับและเงื่อนไข



รูปที่ 3.8 วัสดุ BFMO ที่เผาซินเทอร์ (Sintering) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

วัสดุ BFMO เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการทำวิจัย ทำการศึกษากระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ และยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผงวัสดุทดสอบด้วยชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX (IE-350) จากนั้นนำชิ้นงานทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างผลึกของสารนั้นมีโครงสร้างแบบใด หรือเป็นวัสดุอะไร โดยเครื่องวิเคราะห์ทั้งหมดที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุทดสอบของ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope : (SEM) [21]

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ได้จากเครื่อง (SEM) จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสีฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่างและส่วนเครื่อง (EDS) เป็นเครื่องใช้วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ ชุดวิเคราะห์ขนาดเล็กระดับ

ไมครอน ถึงระดับนาโน ผลของการวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงาน มีสาร มีธาตุ และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสาร/ธาตุนั้น ๆ อยู่ปริมาณเท่าไร

เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและโมเลกุลของสาร ผลของการวิเคราะห์จะได้ ในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก รวมทั้งใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) และยังสามารถบอกชนิดของสารแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ โดยใช้หลักการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ X-Ray Diffractometer (XRD)

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็ก [5]

หลังจากวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผงได้นำมาวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วย เครื่อง VersaLab เป็นเครื่องมือกลางของหลักสูตรวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เครื่อง VersaLab มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานได้ตั้งแต่ 50 – 400 K โดยไม่ต้องใช้ในโตรเจนเหลว สามารถให้สนามแม่เหล็กสูงสุดได้ถึง 30 kOe มีออปชั่นในการวัดสมบัติของวัสดุได้หลายประเภท มีความสามารถในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็ก เครื่อง VersaLab ควบคุมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MultiVu หลังจากเปิดถ้ำต้องการวัดสมบัติแม่เหล็ก ให้ทำการ Activate VSM option โปรแกรม จะทำการเชื่อมต่อกับตัวเครื่อง รอสักครู่จนหน้าต่าง VSM ขึ้นมาจึงพร้อมใช้งาน VSM ย่อมาจาก

Vibrating Sample Magnetometer เครื่องจะทำการสั่นขึ้นงานด้วยความถี่ 40 Hz ภายใต้สนามแม่เหล็ก ขึ้นงานจะถูกเหนี่ยวนำค่าแม่เหล็กให้เกิดตามลักษณะของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด แล้วจะปลดปล่อยสนามแม่เหล็กออกมาตัดผ่านกับขดลวด Pick – Up Coil ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณแม่เหล็กที่เกิดขึ้น แล้วให้ค่า Magnetic Moment ออกมา เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 3.11 เครื่อง VersaLab สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็ก

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

ในส่วนของบทนี้ได้กล่าวถึงผลวิจัยและการอภิปรายผล โดยภายหลังจากเตรียมวัสดุผง Ba_2FeMoO_6 (BFMO) วัสดุผงดังกล่าวได้นำมาศึกษาด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อศึกษาองค์ประกอบของวัสดุผง จากนั้นทำการสังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์คอมโพสิต Ba_2FeMoO_6 (BFMO) สมบัติเบื้องต้นของวัสดุเซรามิกส์ที่ศึกษา สำหรับสมบัติทางแม่เหล็กได้ศึกษาในสถานะต่างๆ หลังจากนั้นจะนำวัสดุที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก มาทดสอบเทียบกับวัสดุที่กล่าวมาข้างต้น ว่าวัสดุผงเซรามิกส์เมื่อทำการทดลองแล้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุแม่เหล็กต่าง ๆ เช่น วัสดุแม่เหล็กจาก ฮาร์ดดิสก์ เครื่องขยายเสียง และ มอเตอร์ เป็นต้น

4.1 ผลการศึกษาวัสดุผงและวัสดุเซรามิกส์

จากผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กจากวัสดุ Ba_2FeMoO_6 (BFMO) โดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (VersaLab) ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กในแต่ละเงื่อนไขต่าง ๆ ของวัสดุ Ba_2FeMoO_6 (BFMO) ที่การเผาผลึกที่ 800 °C เป็นเวลา 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไขครั้งนี้ ความอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Saturation Magnetic, Ms), ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (Remanence Magnetic, Mr), สภาพบังคับหรือแรงบังคับ (Coercive Force, Hc) ในวัสดุเซรามิกส์ 50 K, 150 K และ 300 K ภายใต้สนามแม่เหล็ก จำนวน -30kOe ถึง 30kOe

ตารางทางที่ 4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ Ba_2FeMoO_6 ของอุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง

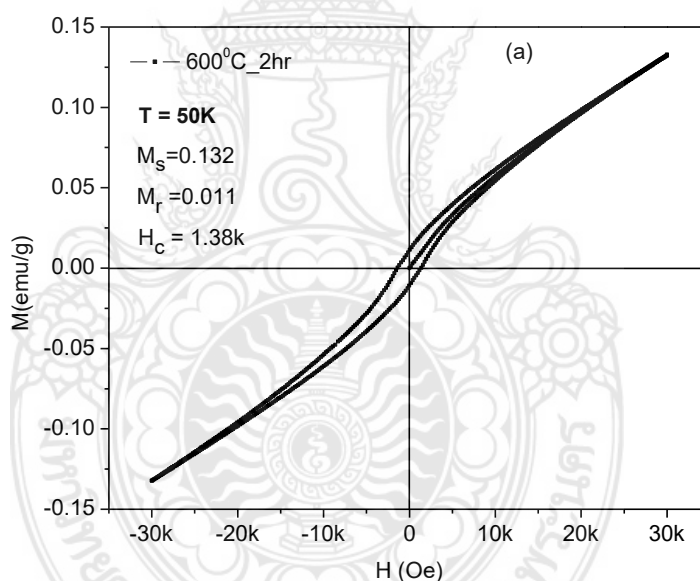
Sample	Temperature 50 K			Temperature 150 K			Temperature 300 K		
	Ms	Mr	Hc	Ms	Mr	Hc	Ms	Mr	Hc
BFMO_800°C_4hr	1.66	0.59	2.94k	1.31	0.50	3.10k	0.92	0.39	4.22k
BFMO_800°C_6hr	1.98	0.64	2.54k	1.51	0.51	3.00k	1.01	0.40	4.50k
BFMO_800°C_8hr	2.57	0.72	2.50k	1.90	0.65	2.70k	1.26	0.50	2.50k
BFMO_800°C_10hr	1.13	0.35	2.54k	0.88	0.30	2.56k	0.61	0.25	4.00k

จากผลการศึกษาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กจากวัสดุ Ba_2FeMoO_6 โดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (VersaLab) ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็ก ในแต่ละเงื่อนไขต่าง ๆ ของวัสดุ Ba_2FeMoO_6 ที่การเผาผลึก ที่ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไขครั้งนี้ ความอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Saturation Magnetic, Ms) ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

คงค้าง (Remanence Magnetic, Mr) สภาพบังคับหรือแรงบังคับ (Coercive Force, Hc) ในวัสดุ เซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ -30kOe ถึง 30kOe

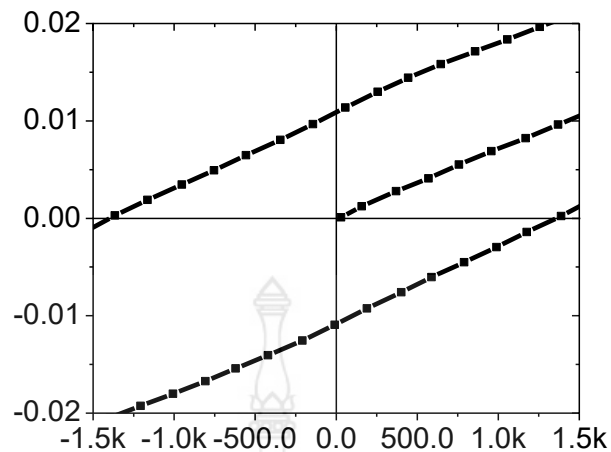
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ Ba_2FeMoO_6 ของอุณหภูมิ 600, 700, และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Sample	Temperature 50 K			Temperature 300 K		
	Ms	Mr	Hc	Ms	Mr	Hc
BFMO_600°C_2hr	0.132	0.0110	1.380k	0.084	0.005	0.804k
BFMO_700°C_2hr	0.759	0.0576	0.750 K	0.176	0.012	1.360k
BFMO_800°C_2hr	2.523	1.040	2.727k	1.588	0.739	2.734k

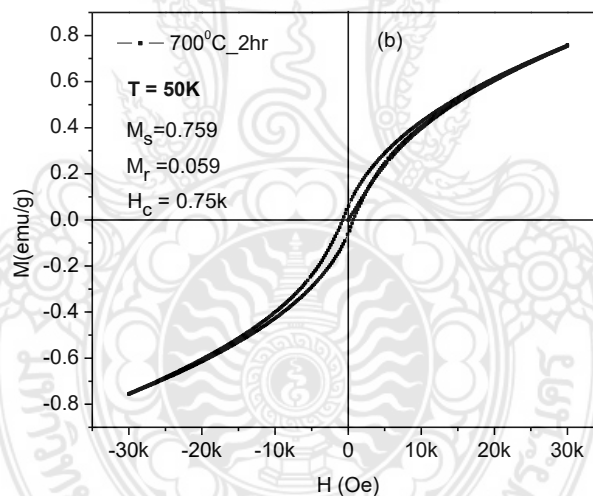


รูปที่ 4.1 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุ แม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลอง ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (Ms) ค่าความเป็นสภาพการ เป็นแม่เหล็ก (Mr) และ แรงบังคับ (Hc) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ Ms = 0.132, Mr = 0.011 และ Hc = 1.38k ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 k ที่การเผาผลึกผลึกวัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

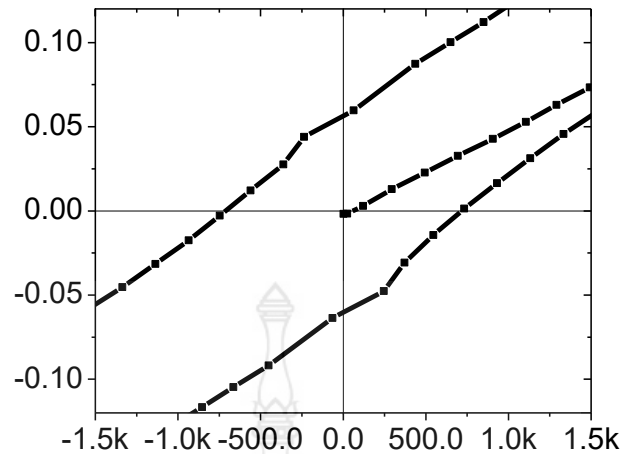


รูปที่ 4.2 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

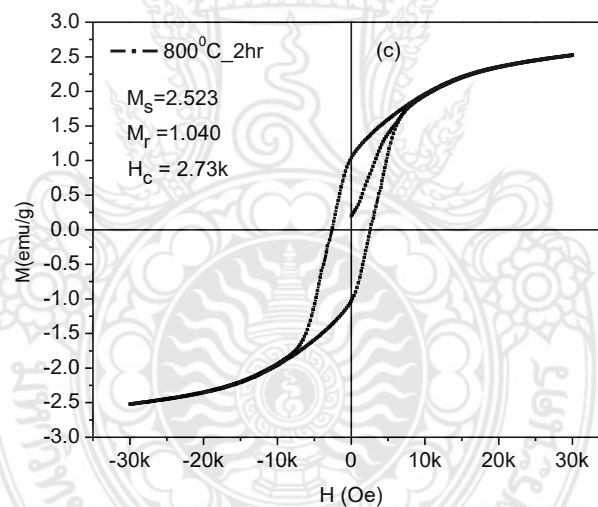


รูปที่ 4.3 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (Ms) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (Mr) และ แรงบังคับ (Hc) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ Ms = 0.759, Mr = 0.0578 และ Hc = 0.75k ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

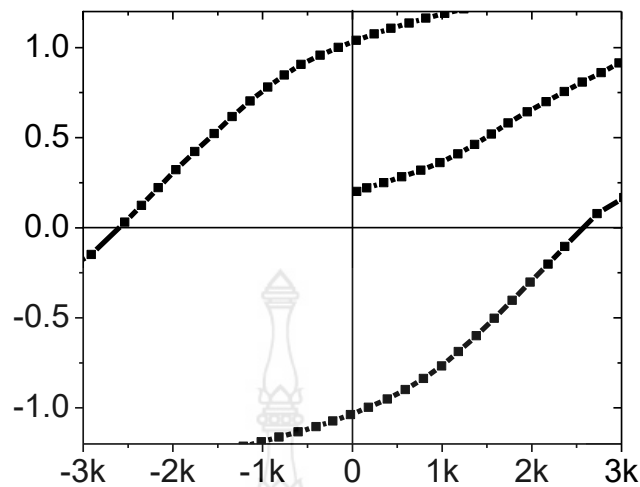


รูปที่ 4.4 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลาจำนวน 2 ชั่วโมง

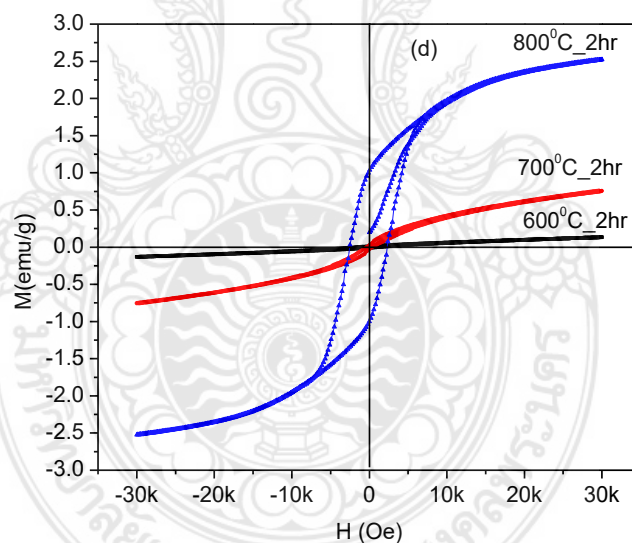


รูปที่ 4.5 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลาเวลา 2 ชั่วโมง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 2.523$, $M_r = 1.040$ และ $H_c = 2.727k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง

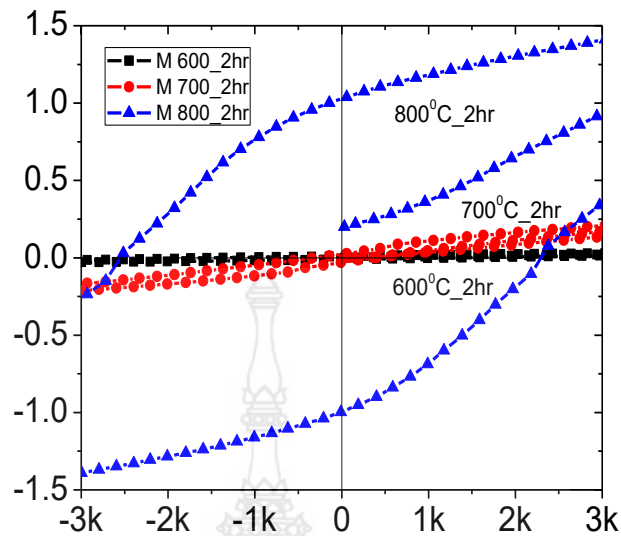


รูปที่ 4.6 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

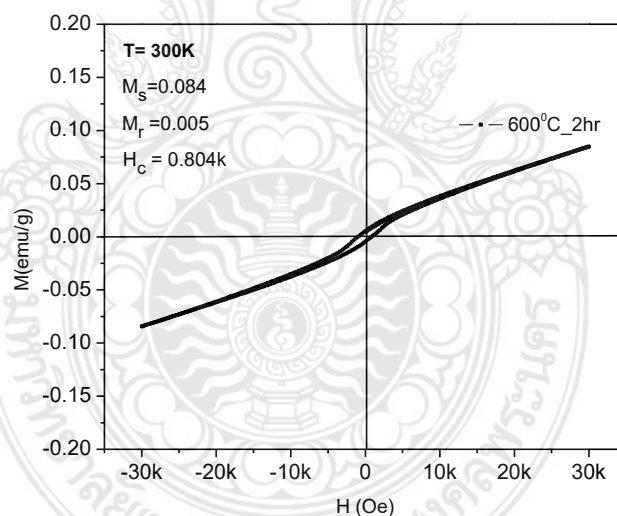


รูปที่ 4.7 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600, 700, 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากการเผาผลึกวัสดุ BFMO ในแต่ละอุณหภูมิได้แก่ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

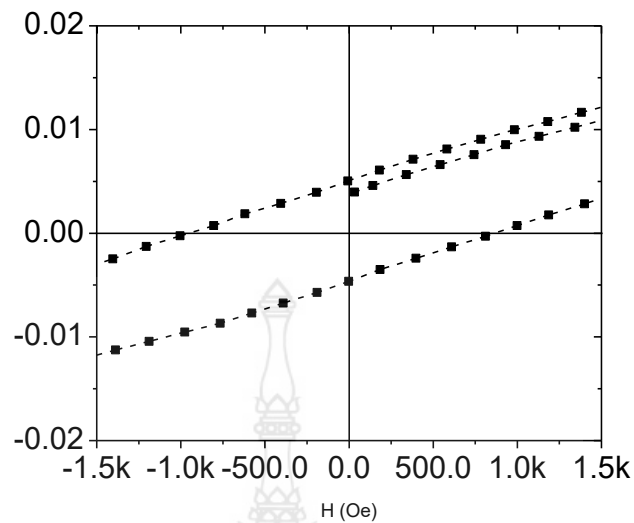


รูปที่ 4.8 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลิควัสดุที่ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

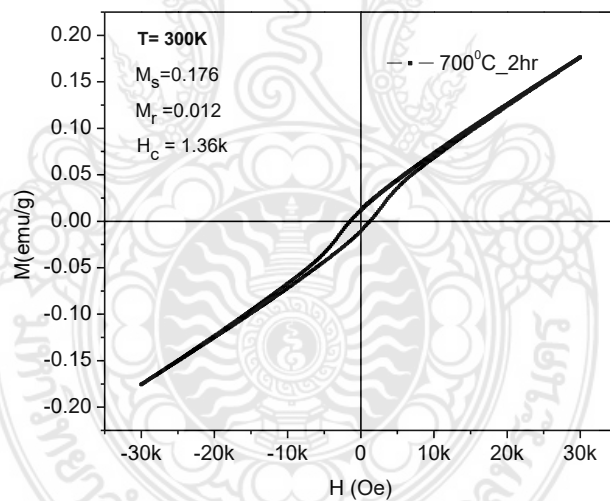


รูปที่ 4.9 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลิควัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 0.084$, $M_r = 0.005$ และ $H_c = 0.804k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลิควัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

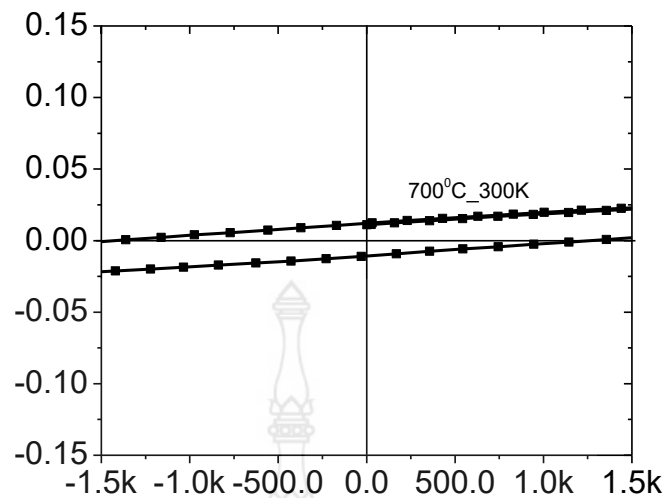


รูปที่ 4.10 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

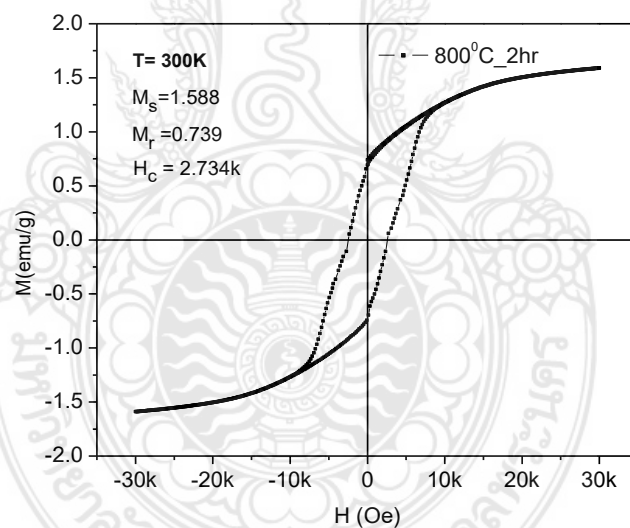


รูปที่ 4.11 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 0.176$, $M_r = 0.012$ และ $H_c = 1.36k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

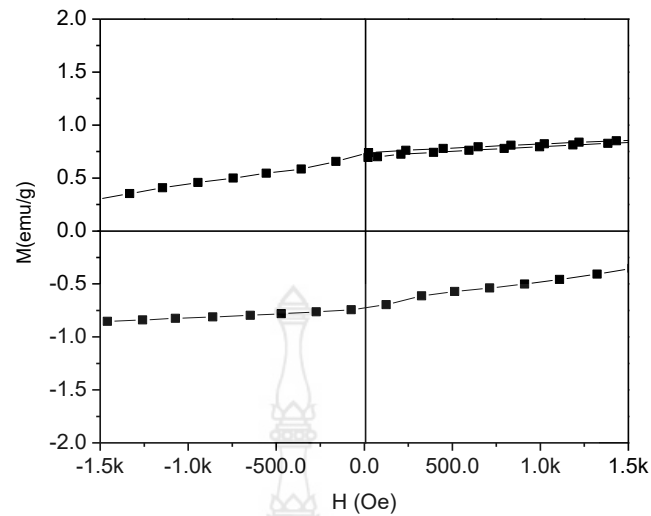


รูปที่ 4.12 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

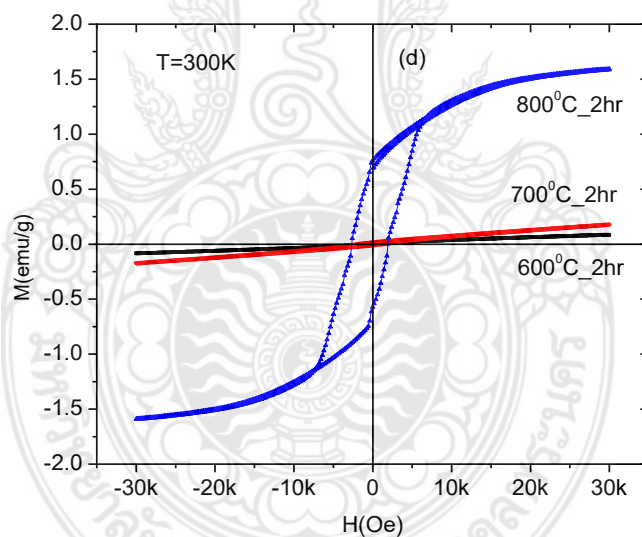


รูปที่ 4.13 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.588$, $M_r = 0.739$ และ $H_c = 2.734k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง

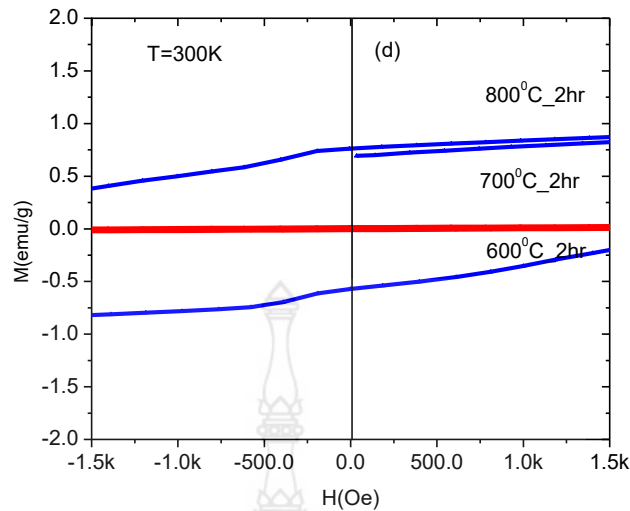


รูปที่ 4.14 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

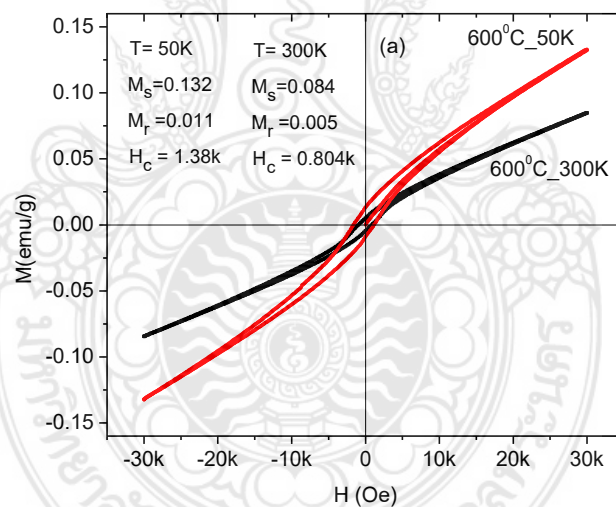


รูปที่ 4.15 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600, 700, 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเตอร์ีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากการเผาผลึกวัสดุ BFMO ในแต่ละอุณหภูมิได้แก่ 600 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

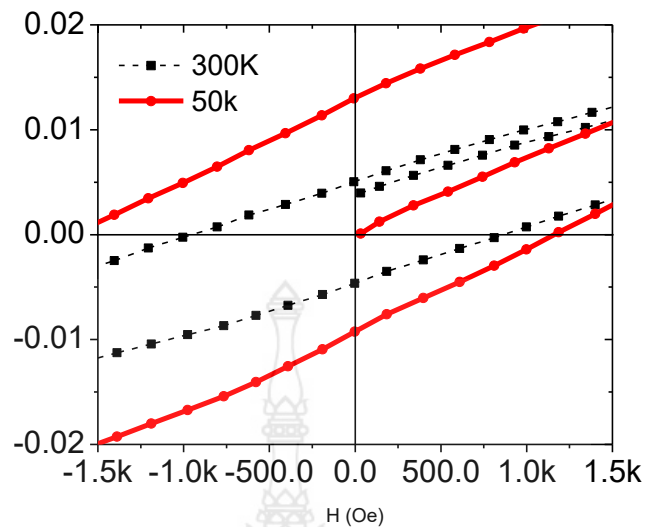


รูปที่ 4.16 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

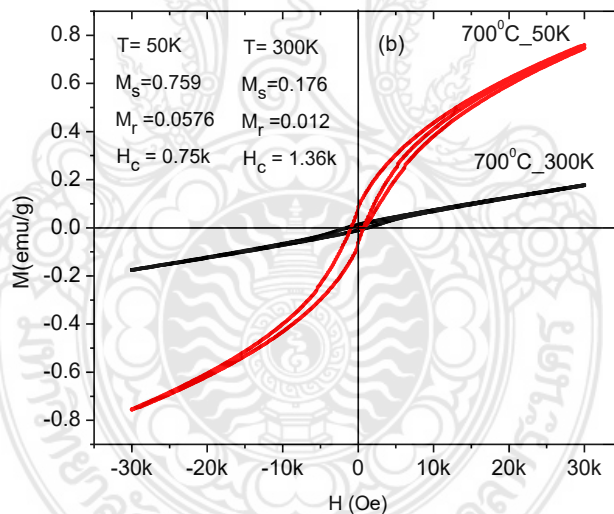


รูปที่ 4.17 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างการเปรียบเทียบ วัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K และ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากการเผาผลึกวัสดุ BFMO จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึก 600 °C จะมี $M_s = 0.132$, $M_r = 0.011$ และ $H_c = 1.38k$ ในกรณีอุณหภูมิที่ 50 K และ $M_s = 0.084$, $M_r = 0.005$ และ $H_c = 0.804k$ ในกรณีอุณหภูมิ 300 K

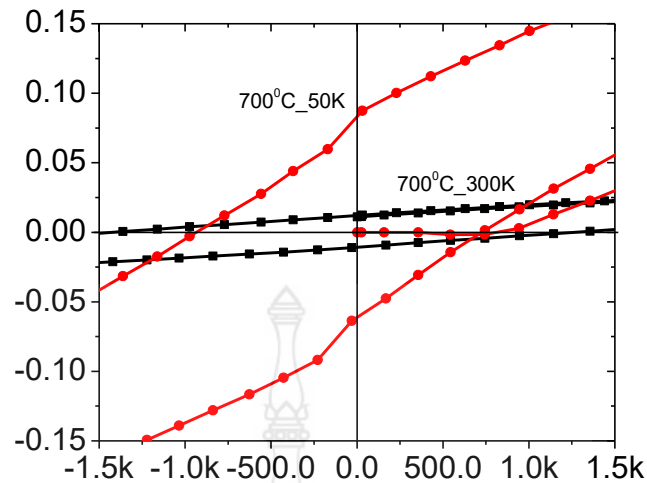


รูปที่ 4.18 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลิควัสดุที่ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

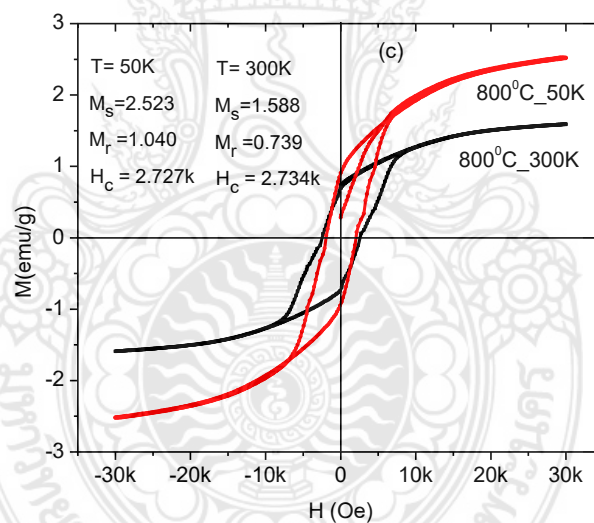


รูปที่ 4.19 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลิควัสดุที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างการเปรียบเทียบ วัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K และ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเตอร์ิซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากการเผาผลิควัสดุ BFMO จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะมี $M_s = 0.759$, $M_r = 0.0576$ และ $H_c = 0.75k$ ในกรณีอุณหภูมิที่ 50 K และ $M_s = 0.176$, $M_r = 0.012$ และ $H_c = 1.36k$ ในกรณีอุณหภูมิ 300 K

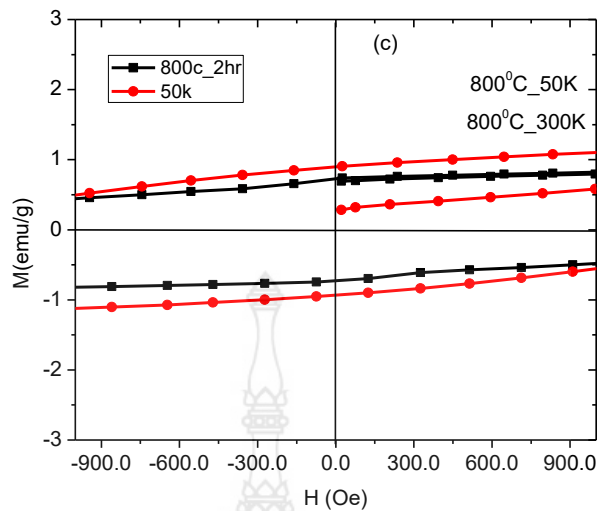


รูปที่ 4.20 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

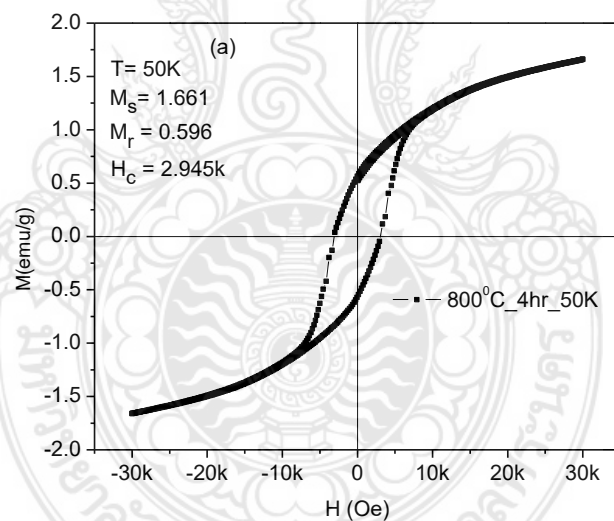


รูปที่ 4.21 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างการเปรียบเทียบ วัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K และ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเตอร์ิซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดประสิทธิภาพทางแม่เหล็กจากการเผาผลึกวัสดุ BFMO จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึก 800 °C จะมี $M_s = 2.523$, $M_r = 1.040$ และ $H_c = 2.727k$ ในกรณีอุณหภูมิที่ 50 K และ $M_s = 1.588$, $M_r = 0.739$ และ $H_c = 2.73k$ ในกรณีอุณหภูมิ 300K

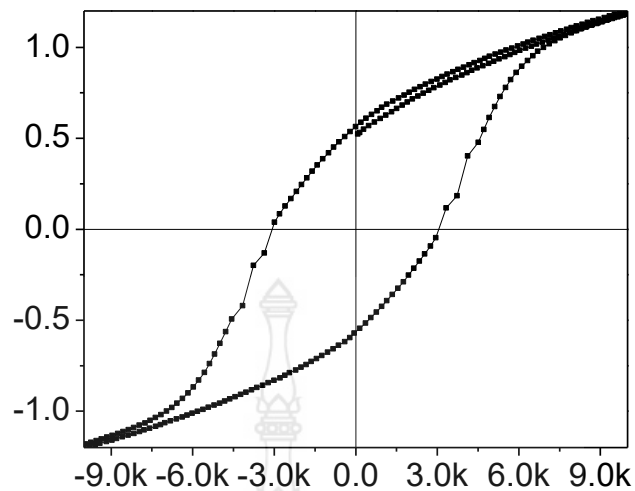


รูปที่ 4.22 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

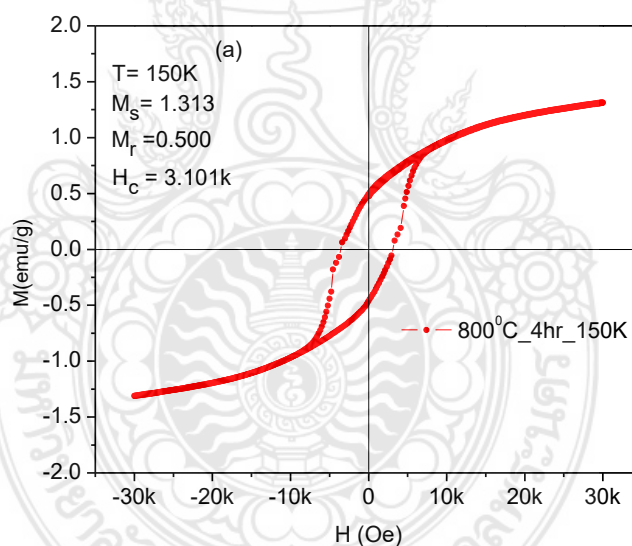


รูปที่ 4.23 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.661$, $M_r = 0.596$ และ $H_c = 2.945k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

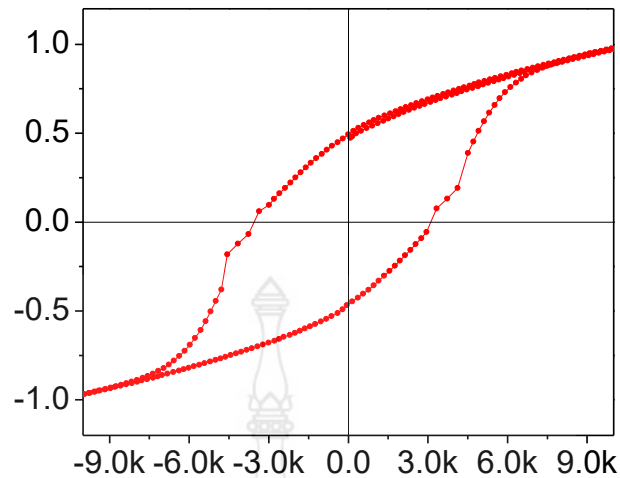


รูปที่ 4.24 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

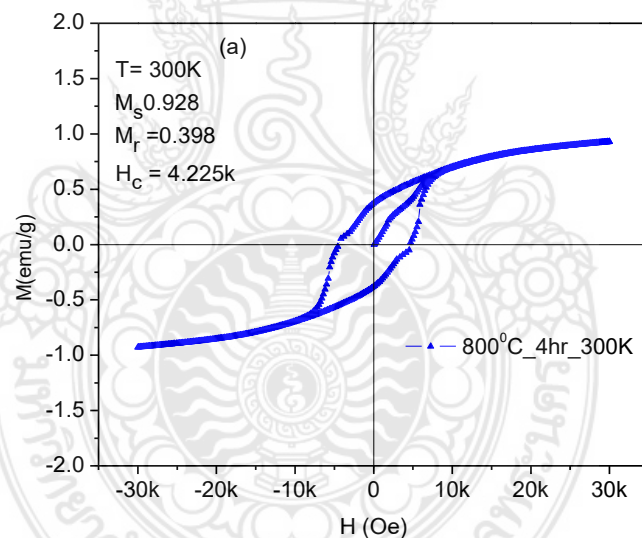


รูปที่ 4.25 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เวลา 4 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 150 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.313$, $M_r = 0.500$ และ $H_c = 3.101k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

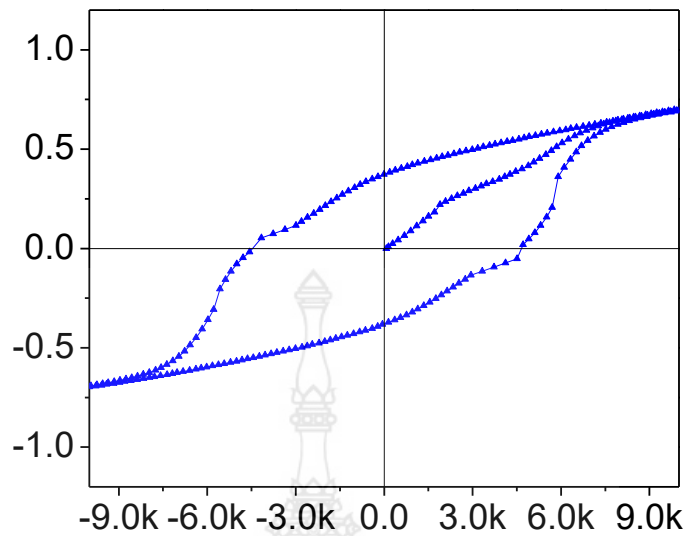


รูปที่ 4.26 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

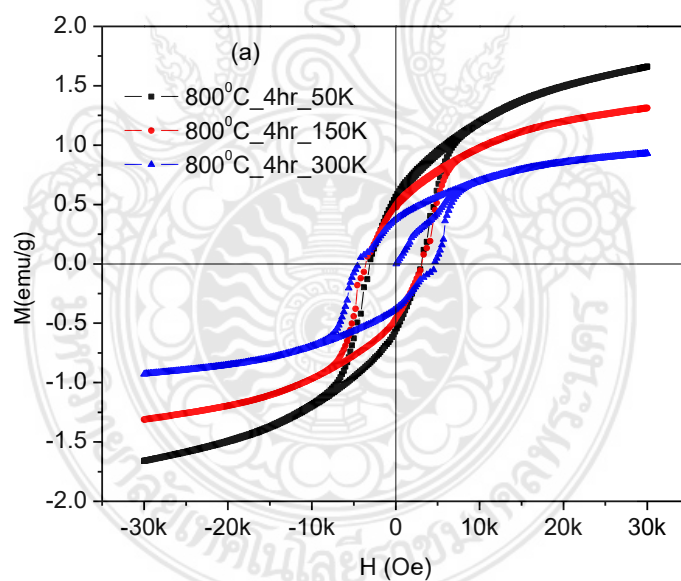


รูปที่ 4.27 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 0.928$, $M_r = 0.398$ และ $H_c = 4.225k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

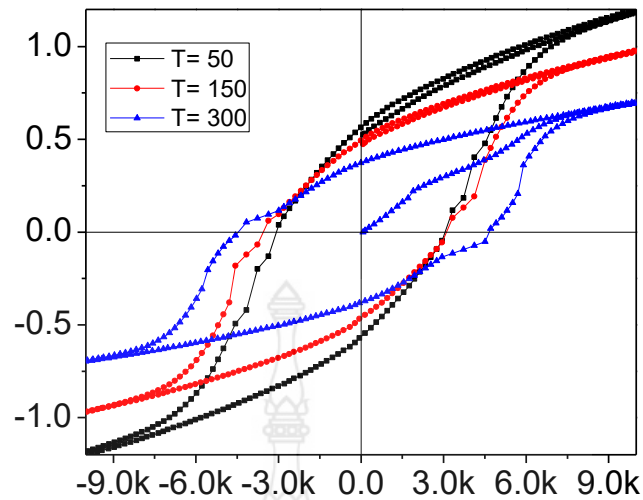


รูปที่ 4.28 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

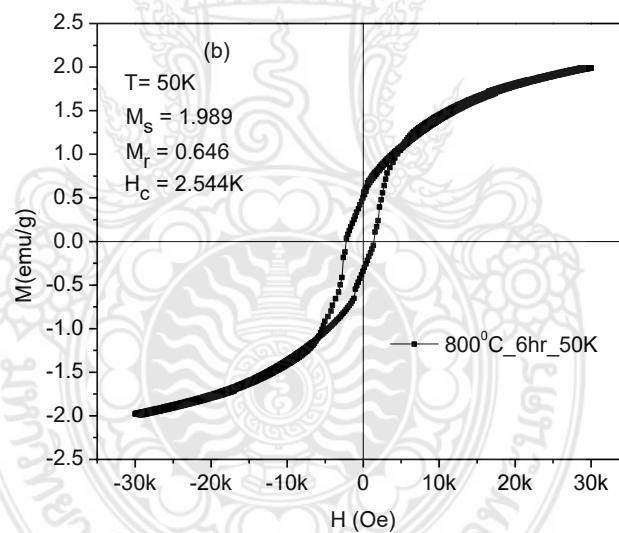


รูปที่ 4.29 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150, 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากการวัดค่าที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K การเผาผลึกวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 800 °C

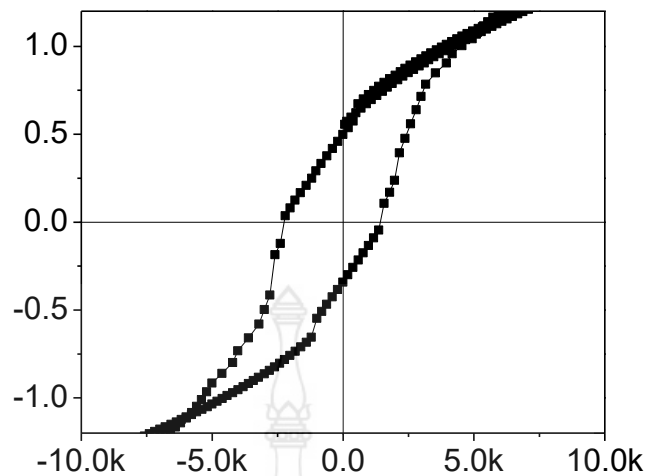


รูปที่ 4.30 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

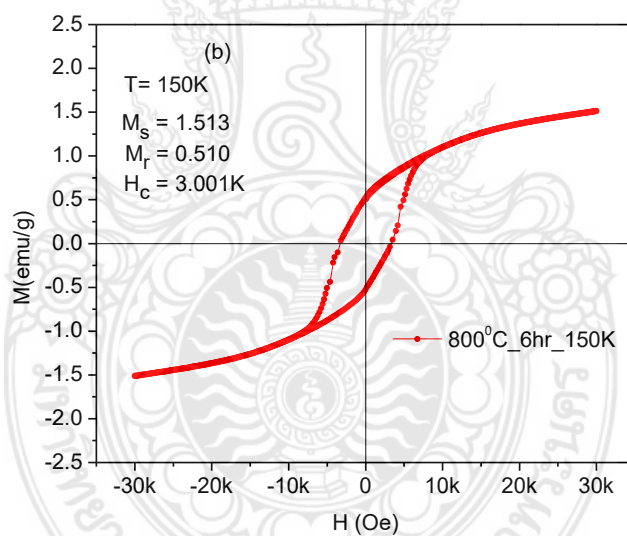


รูปที่ 4.31 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เวลา 6 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.989$, $M_r = 0.646$ และ $H_c = 2.544k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

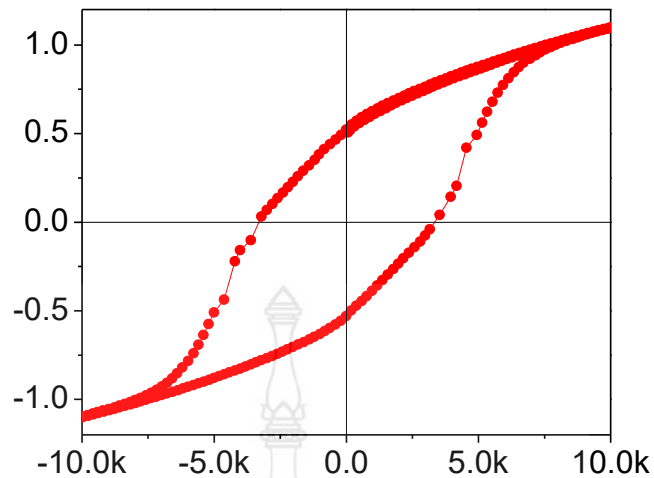


รูปที่ 4.32 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

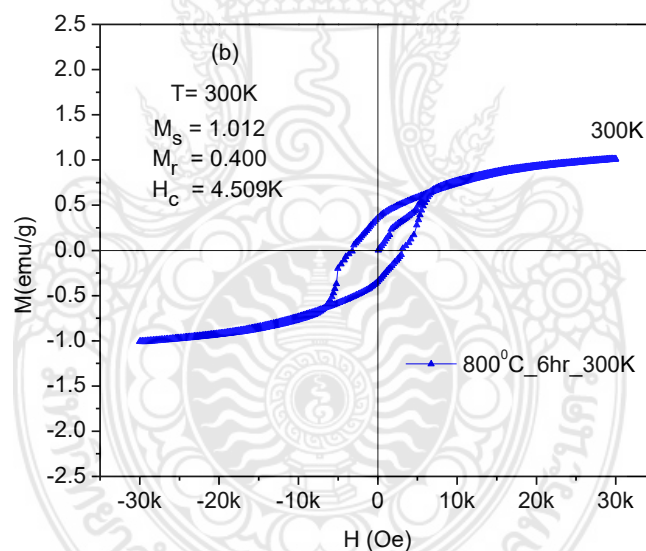


รูปที่ 4.33 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 150 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.513$, $M_r = 0.510$ และ $H_c = 3.001k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

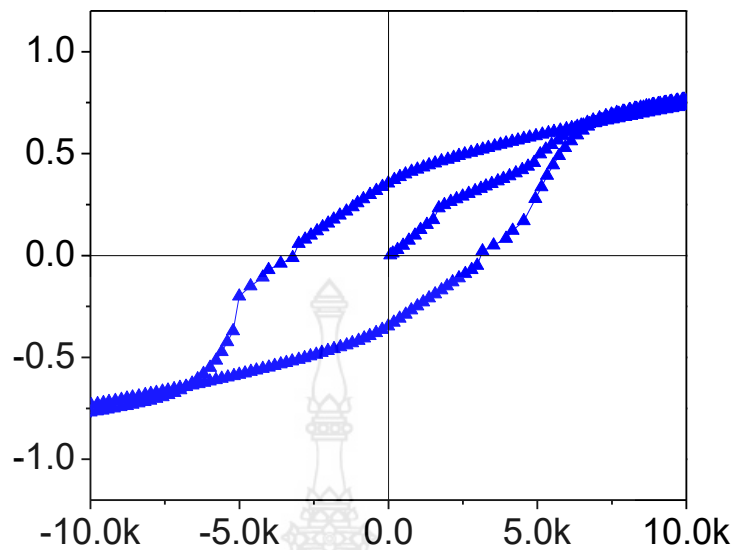


รูปที่ 4.34 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

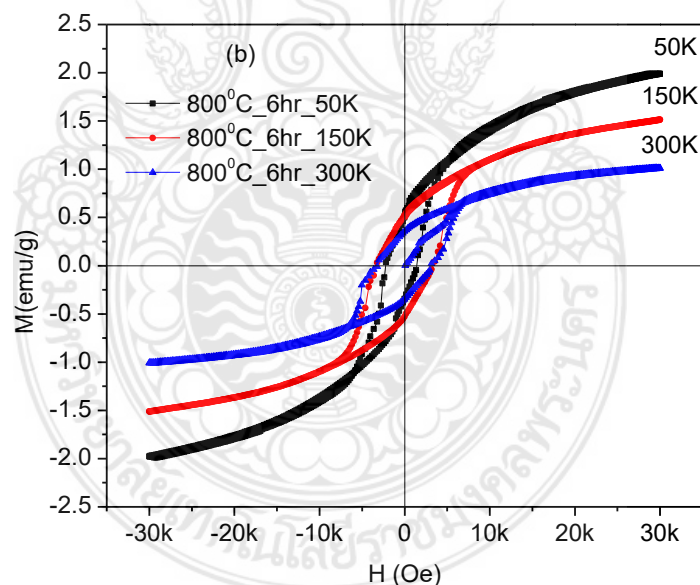


รูปที่ 4.35 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.012$, $M_r = 0.400$ และ $H_c = 4.509k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

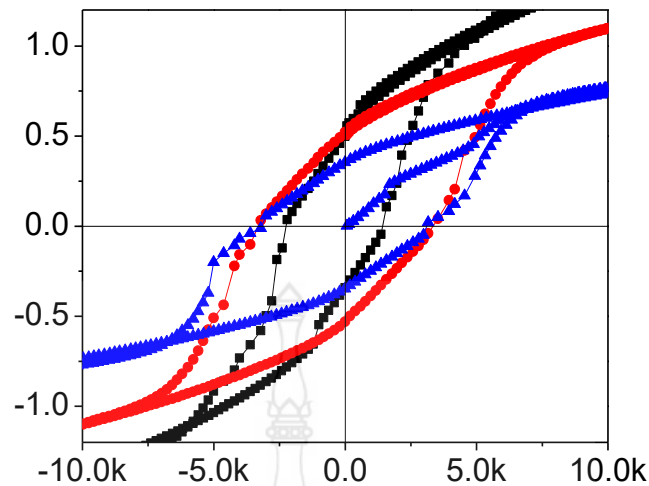


รูปที่ 4.36 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

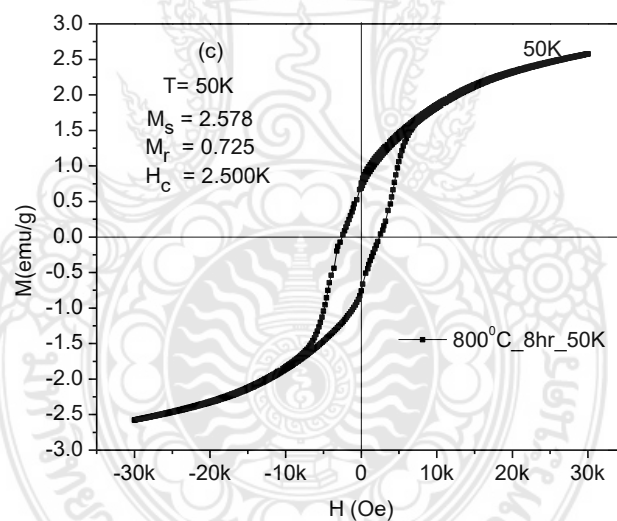


รูปที่ 4.37 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150, 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากการวัดค่าที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K การเผาผลึกวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 800 °C

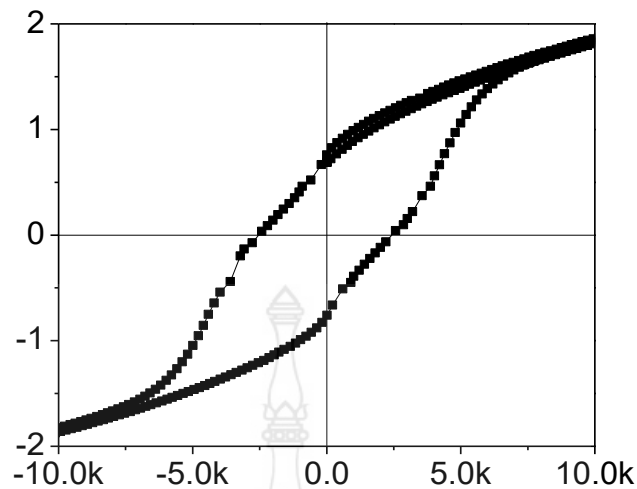


รูปที่ 4.38 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

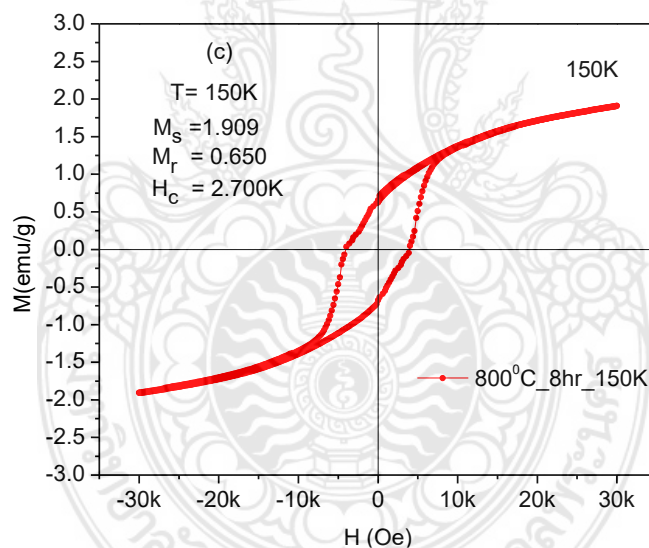


รูปที่ 4.39 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 2.578$, $M_r = 0.725$ และ $H_c = 2.500\text{k}$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

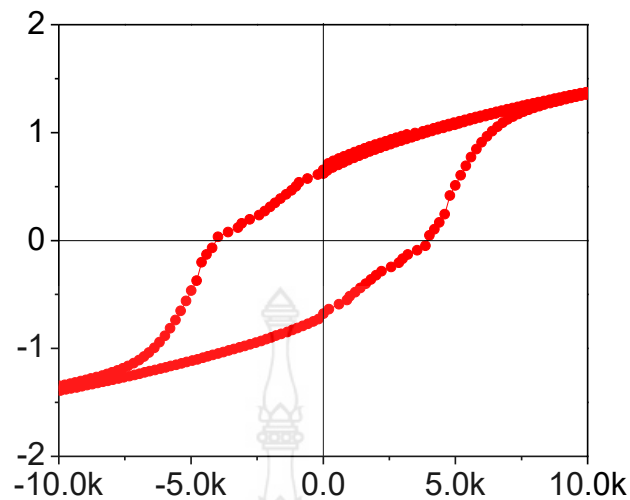


รูปที่ 4.40 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

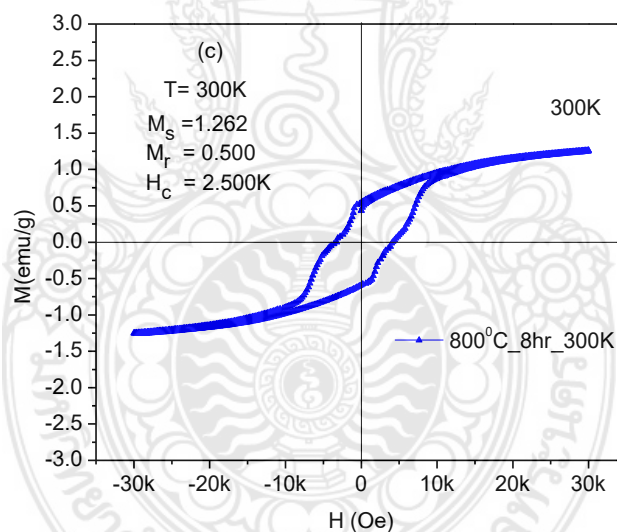


รูปที่ 4.41 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 150 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.909$, $M_r = 0.650$ และ $H_c = 2.700k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

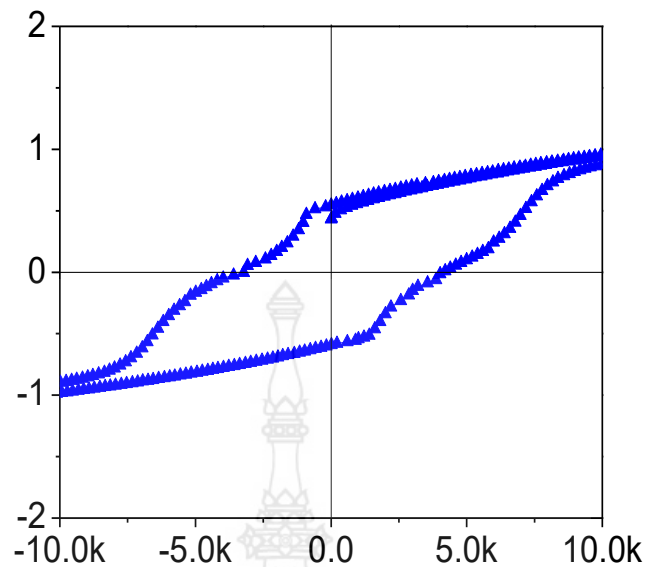


รูปที่ 4.42 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

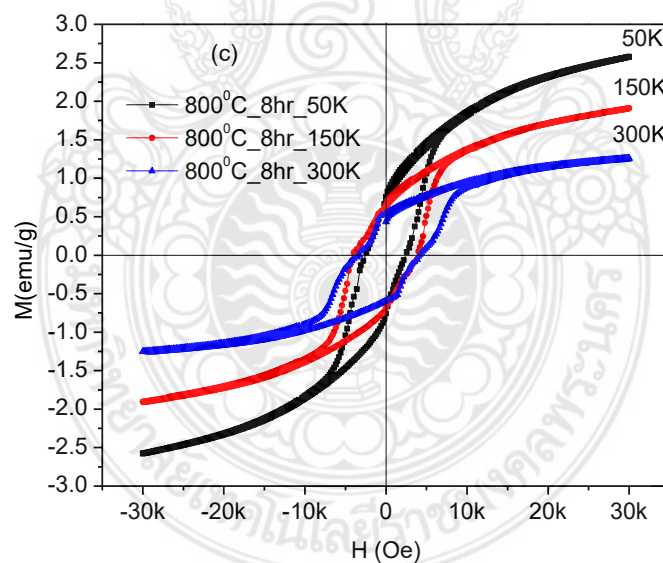


รูปที่ 4.43 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (Ms) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (Mr) และ แรงบังคับ (Hc) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ Ms = 1.262, Mr = 0.500 และ Hc = 2.500k ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

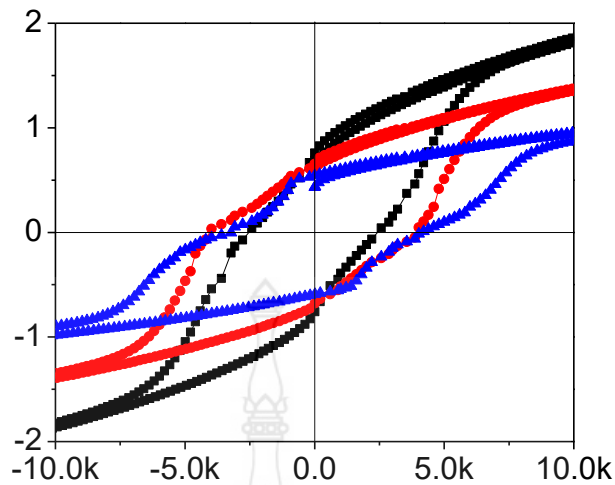


รูปที่ 4.44 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

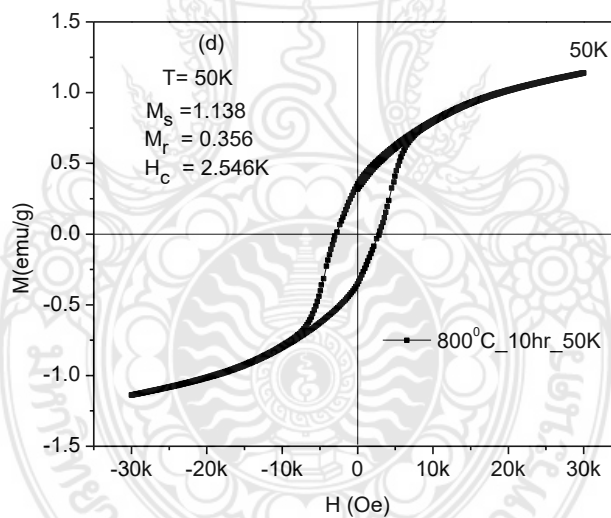


รูปที่ 4.45 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150, 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากการวัดค่าที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K การเผาผลึกวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 800 °C

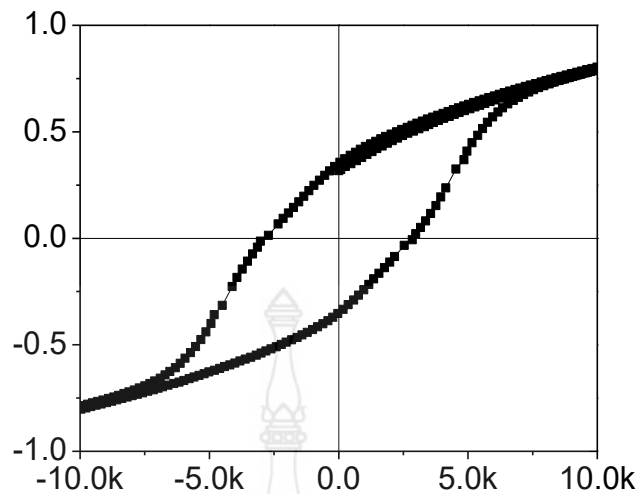


รูปที่ 4.46 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

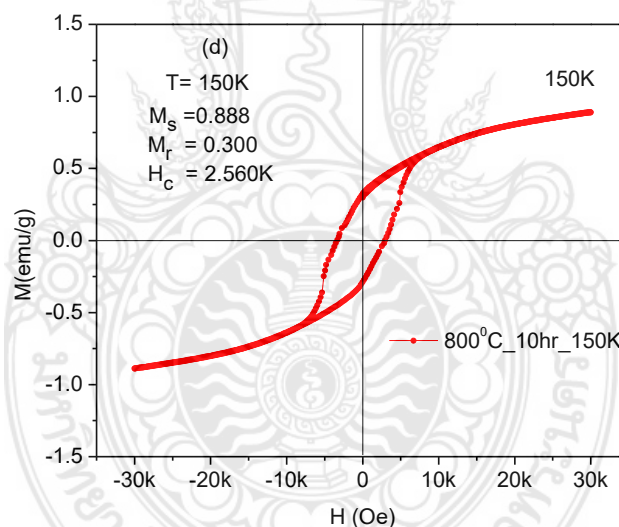


รูปที่ 4.47 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 50 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 1.138$, $M_r = 0.356$ และ $H_c = 2.546k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

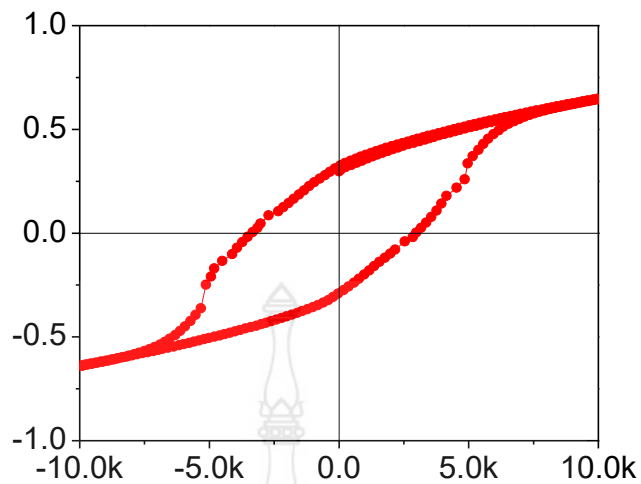


รูปที่ 4.48 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

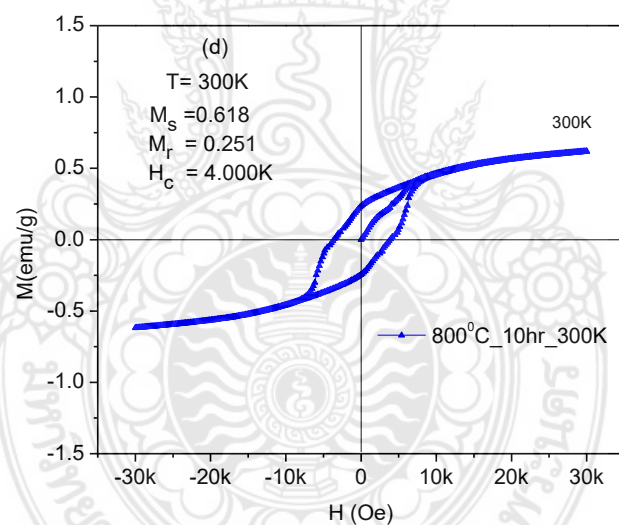


รูปที่ 4.49 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 150 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 0.888$, $M_r = 0.300$ และ $H_c = 2.560k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

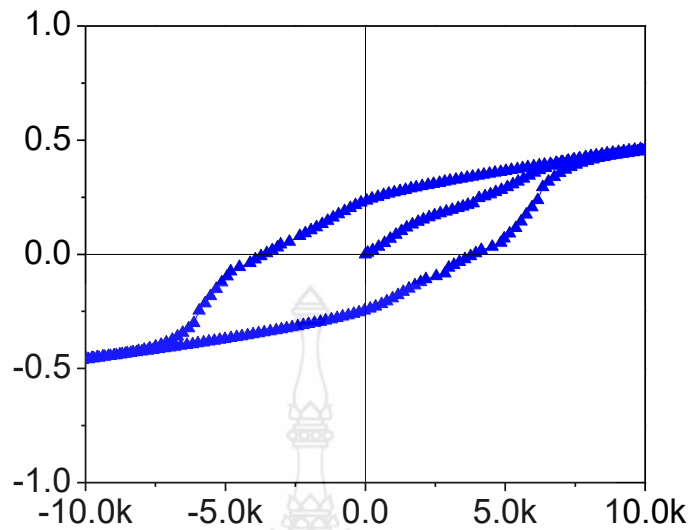


รูปที่ 4.50 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลิกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

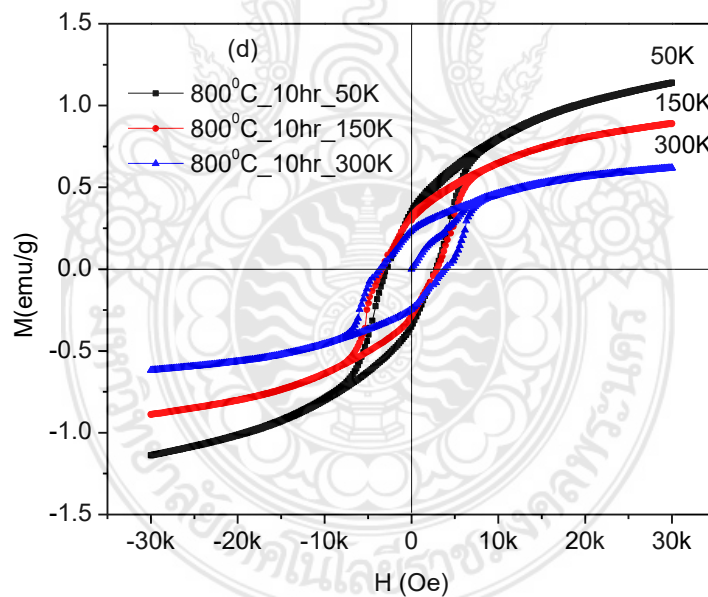


รูปที่ 4.51 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลิกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO ที่ อุณหภูมิ 300 K จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากผลการทดลองจะได้ค่าความเข้มของแม่เหล็ก (M_s) ค่าความเป็นสภาพการเป็นแม่เหล็ก (M_r) และ แรงบังคับ (H_c) ผลสรุปจากกราฟของวัสดุ BFMO จะได้ $M_s = 0.618$, $M_r = 0.251$ และ $H_c = 4.000k$ ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 300 K ที่การเผาผลิกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

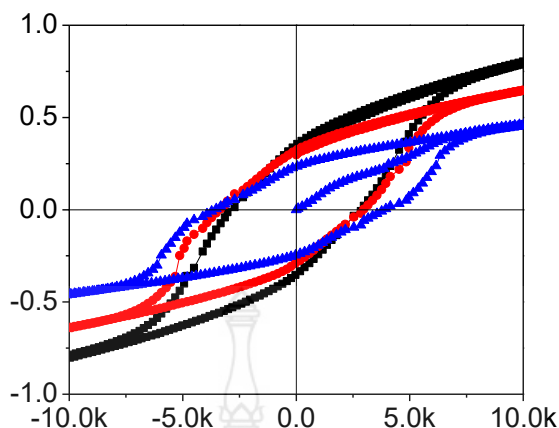


รูปที่ 4.52 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 150 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 4.53 แสดงสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150, 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ในการการวัดค่าสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า (M) กับสนามแม่เหล็กที่ใช้ (H) ในตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเซรามิกส์ BFMO จากการวิเคราะห์ของกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ยังคงสภาพการเป็นแม่เหล็ก จากกราฟเป็นข้อมูลการเปรียบเทียบจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากการวัดค่าที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K การเผาผลึกวัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 800 °C

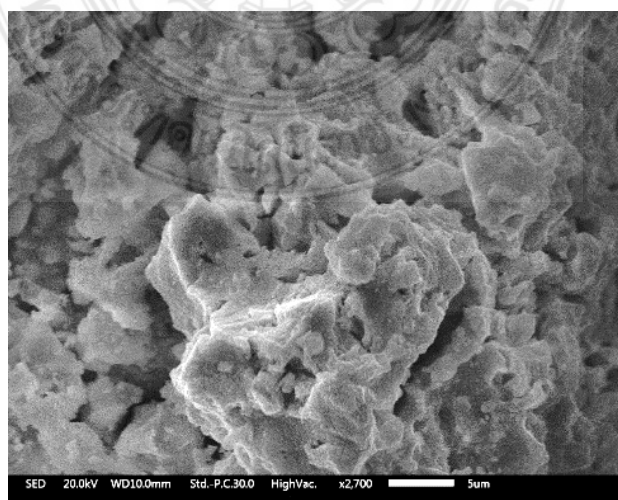


รูปที่ 4.54 แสดงส่วนขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก (M) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของ (H) วัสดุ BFMO ที่อุณหภูมิ 50, 150 และ 300 K ที่การเผาผลึกวัสดุที่ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

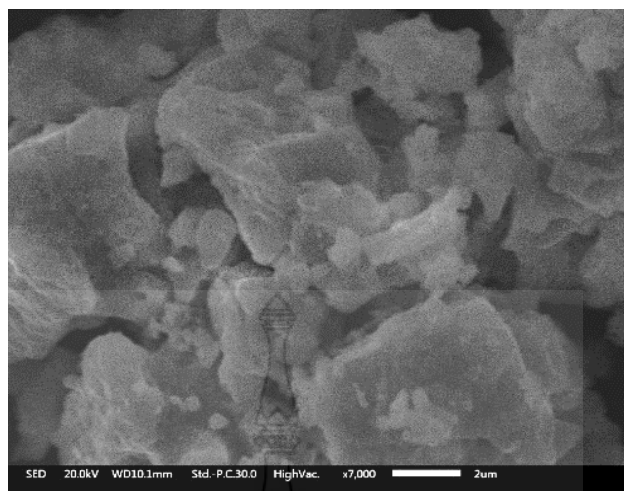
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผง ($\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$)

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

วัสดุผงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็ก การทดสอบจากเครื่อง Scanning Electron Microscope : (SEM) ทำให้เห็นขนาด และรูปร่างของอนุภาคผงในตำแหน่งที่น่าสนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานทางด้านชีววิทยา ภาพลักษณะพื้นฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.55 และ 4.56 รูปที่ ด้วยกำลังขยาย 2,700 เท่า และ 7,000 เท่า จากการศึกษาโครงสร้างพบว่าวัสดุ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 5 ไมครอนและอนุภาคผงจะมีขนาดไล่เลี่ยใกล้เคียงกัน

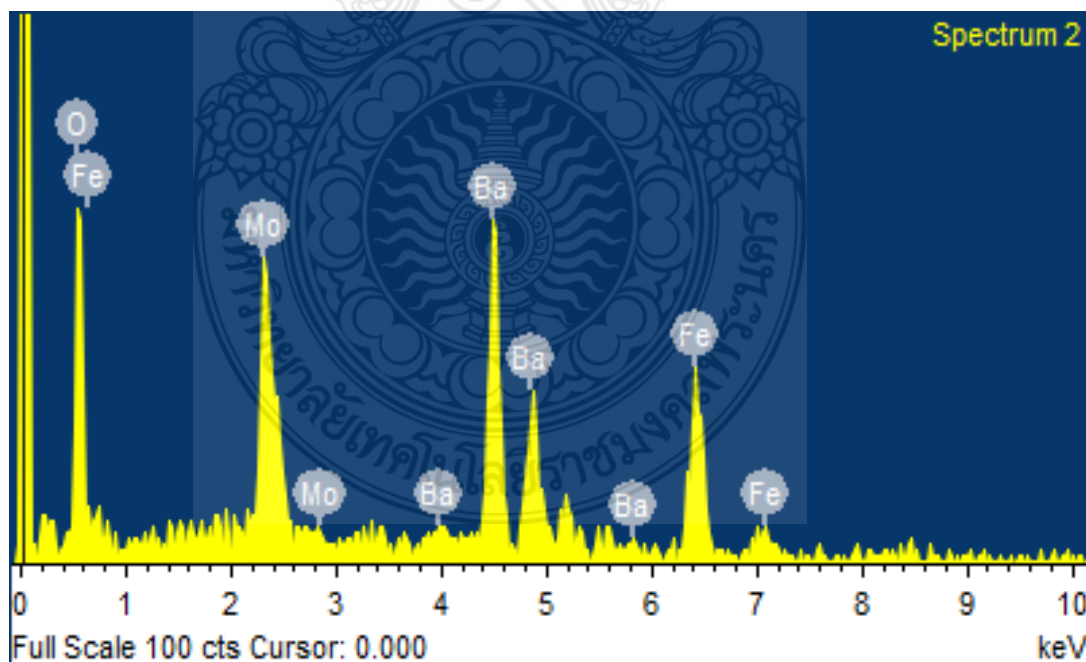


รูปที่ 4.55 โครงสร้างจุลภาคของ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ x 2,700



รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคของ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ x 7,000

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ได้ผลเชิงปริมาณของธาตุของวัสดุ ชนิดของธาตุของวัสดุ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุได้ ซึ่งข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.57 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของ $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ (BFMO)

จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ พบว่ามีรายงานผลดังข้อมูลต่อไปนี้

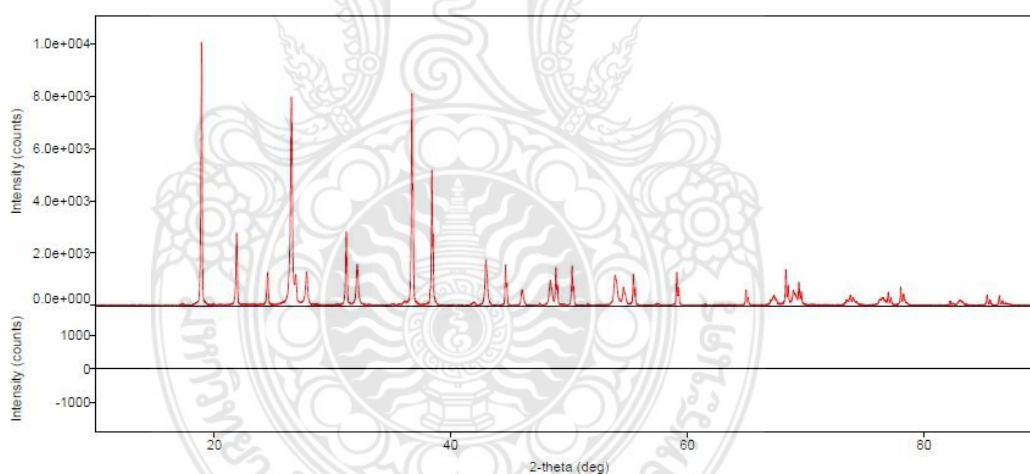
Processing Option : All Elements Analyzed (Normalised) Number of Iterations = 2

ตารางที่ 4.3 ผลจากการวิเคราะห์จากเครื่อง (EDS)

Elmt.	Spect Type	Element %	Atomic %
O K	ED	25.94	67.91
Fe K	ED	15.8	11.85
Mo L	ED	18.84	8.22
Ba L	ED	39.41	12.02
Total		100	100

4.2.3 การวิเคราะห์ธาตุเชิงชนิดของสารประกอบของธาตุ

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer : (XRD) จะบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ ยิ่งไปกว่านั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.58 การวิเคราะห์ธาตุ Ba_2FeMoO_6 (BFMO)

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การสรุปผล คือการวิเคราะห์ผลจากการทดลองการนำวัสดุเซรามิกส์ที่ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ขึ้นมาทั้งหมดมาสรุปผลต่อวัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่ได้รับ สำหรับการอภิปรายผล จะกล่าวถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพทางแม่เหล็ก วัสดุที่ผู้วิจัยได้ทดลองผ่านกระบวนการต่าง ๆ คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่ผู้ทดลองได้จัดทำผลเป็นผลมาจากการให้ความร้อนจากการเผาผลึก (Sintering) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยได้จากการทดลองด้วยเครื่องวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (VersaLab: Vibrating Sample Magnetometer VSM) ที่ 8 ชั่วโมง ได้ผลตั้งว่า $M_s \sim 2.578 \text{ emu/g}$ ที่ 50 K และ 1.262 emu/g ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ค่าของ M_s และ M_r ที่พิสูจน์ได้ว่ามีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กในชนิด Ferromagnetic ในวัสดุเซรามิกส์ และ คุณสมบัติแม่เหล็กนี้จัดอยู่ในหมวดหมู่ของแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) เนื่องจากมีค่าแมกเนโตเซชันสูงมากแม้ว่าจะไม่ได้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กก็ตาม และเมื่อวัสดุที่ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ขึ้นมาวางอยู่ในสนามแม่เหล็กค่าแมกเนโตเซชันก็จะยิ่งสูงมากเมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) กับสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) จะได้กราฟมีลักษณะเป็นวงรอบที่เรียกว่าวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะหายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะหมดสภาพการเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) เนื่องจากการจัดเรียงตัวไดโพลโมเมนต์จะเปลี่ยนไปในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติกซึ่งเป็นไปตามกฎของคูรีไวส์ (Curie-Weiss) โดยค่าของอุณหภูมิคูรีจะกล่าวถึงคุณลักษณะของแม่เหล็กในวัสดุทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

วัสดุเซรามิกส์ที่ผู้วิจัยได้สังเคราะห์นั้นได้มีผลงานการวิจัยเป็นหลากหลายรูปแบบหลายวัสดุ โดยผู้วิจัยได้ทดลองโดยเลือกเอาวัสดุ คาร์บอนเนต (BaCO Barium carbonate, 99.9%) ไอรอนไนเตรท (Fe (III) nitrate , 99.0%) และ โมลิบดีนัม (MoO Molybdenum trioxide, 99.0%) ผู้วิจัยได้ทำการให้ความร้อนจากการเผาผลึกที่มากกว่า $800 \text{ }^\circ\text{C}$ นั้นตัววัสดุเกิดความเสียหายและไม่สามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ ผู้วิจัยจึงแนะนำให้ทดลองการสังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์ชนิดอื่น ๆ ที่คาดว่าจะสามารถวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กและศึกษาลักษณะสัณฐานวัสดุเซรามิกส์นั้นต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนภา ตั้งปริบูรณ์, “เซรามิกวิศวกรรม,” คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2556.
- [2] Kasap, S. O. , “Principles of Electronic Materials and Devices,” The McGraw-Hill, 2002.
- [3] R. Askland, P. Fulay, J. Wright “The Science and Engineering of Materials” University of Missouri, University of Pittsburgh, Bucknell University, 2011
- [4] D.Bloor, M.Flemings., and S.Mahajan., “Encyclopedia of Advanced Materials.,” Eds. Vol. 1, pp. 1424, 1994.
- [5] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุปรีย์ พิณจสุนทร, “Magnetic properties of Materials,” เอกสารประกอบการสอน, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2013
- [6] คุณสมบัติทางแม่เหล็ก Magnetic Properties.(2018, Feb 15) [Online].
http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/2014_08/14/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%205%20Magnetic%20Properties.pdf
- [7] C.B. Sawyer and C.H.Tower., Rochelle Salt as a Dielectric, Phys.Rev., 35, 269 1930
- [8] M. Cernea, F. Vasiliu, C. Plapcianu, C. Bartha, I. Mercioniu, I. Pasuk, R. Lowndes, G. V. Aldica, L. Pintilie, “Preparation by sol- gel and solid state reaction methods and properties investigation of double perovskite Sr_2FeMoO_6 ” *Int. J. European Ceramic Society* 33., pp. 2483-2490, 2013
- [9] M. Cernea, F. Vasiliu, C. Bartha, C. Plapcianu, I. Mercioniu, “Characterization of ferromagnetic double perovskite Sr_2FeMoO_6 prepared by various methods” *Int. J. Ceramics International* vol. 40, pp.11601-11609, 2014.
- [10] สุนัน หนองเหล็ก, “โครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และ แม่เหล็ก ของอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมระหว่าง Fe และ Pr,” วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2016.
- [11] อนุชิต ฮันเย็ก, “สมบัติเชิงแม่เหล็กของนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์เจือทองแดงและแมงกานีสที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล,” วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, สาขาวิชาศึกษาทั่วไป, ภาควิชาศิลปศาสตร์, 2015.

- [12] อนุวัฒน์ หัสดี, “อิทธิพลของการเติมสังกะสีที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของ $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ เฟอร์ไรท์” วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัทยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ภาควิชาวิทยาศาสตร์, สาขาวิชาฟิสิกส์, 2011.
- [13] ยุทธพงษ์ ศรีทธา, “ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์ไรต์เล็กทริกของสาร비스มัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2556.
- [14] พรชนก กุลไชย ขวัญฤทัย และ ปวีณา เหลลากุล, “โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์,”วารสารมหาวิทยาลัทยมหาสารคาม สาขาวิชาฟิสิกส์, 2014.
- [15] นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, “การสังเคราะห์วัสดุดีบุกเล็กโทเรเซรามิกส์ชนิดแบเรียมไททาเนต”, วารสารมหาลัยเกษตรศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, 2001.
- [16] Saeid Jabbarzare, Majid Abdellahi, Hamid Ghayour, Asiyeh Arpanahi, Amirsalar Khandan, “A study on the synthesis and magnetic properties of the cerium ferrite Ceramic” Int.J. Alloys and Compounds., pp. 800-807, 2017.
- [17] Saeid Jabbarzare, Majid Abdellahi, Hamid Ghayour, Akbar Chami, Shayesteh Hejazian, “Mechanochemically assisted synthesis of yttrium ferrite ceramic and its visible light photocatalytic and magnetic properties” Int. J. Alloys and Compounds., pp. 1125-1130, 2016.
- [18] ณัฐกฤตา เฟ่งผล และ คณະ, “การสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรท์โดยวิธีซิทริก-กลีเซอรอลสำหรับเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, 2017.
- [19] เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (Magnetic hysteresis curve), (2019, Sep 1). [Online]. <http://www.simotechthailand.co.th/knowledge9.html>.
- [20] ธานินทร์ ปัจจุโส, “การเตรียมโครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (กระแส-ความต่างศักย์) ของอนุภาคนาโน $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Sn}_x\text{O}_{12}$ เตรียมด้วยวิธีสารละลายโพลิเมอร์” วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัทยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, สาขาวิชาศึกษาทั่วไป ภาควิชาศิลปศาสตร์, 2015.
- [21] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.
- [22] Explore Chemistry.(2019, Jun 19) [Online]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

สมบัติของเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต

ตารางที่ ก-1 สมบัติของเฟอร์โรแมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต

Ferrite Type	Chemical Formula	Curie Temperature (T_c , °C)	Magnetic induction Saturation (B_s , T)
Ba-Fe ferrite	$BaFe_{12}O_{19}$	430	0.45
Cobalt ferrite	$CoFe_2O_4$	520	0.53
Copper ferrite	$CuFe_2O_4$	455	0.17
Eu-Fe ferrite	$Eu_3Fe_5O_{12}$	293	0.116
Franklinite	$ZnFe_2O_4$	375	0.50
Gd-Fe garnet	$Gd_3Fe_5O_{12}$	291	0.017
Jacobsite	$MnFe_2O_4$	300	0.50
Lithium ferrite	$LiFe_5O_8$	670	0.39
Magnesioferrite	$MgFe_2O_4$	440	0.14
Magnetite	Fe_3O_4	585	0.60
Manghemite	Fe_2O_3	575	0.52
Ni-Al ferrite	$NiAlFe_2O_4$	1860	0.05
Nickel ferrite	$NiFe_2O_4$	575	0.34
Sm-Fe garnet	$Sm_3Fe_5O_{12}$	305	0.017
Sr-Fe ferrite	$Sr_3Fe_5O_{12}$	450	0.40
Y-Fe garnet	$Y_3Fe_5O_{12}$	292	0.178



ภาคผนวก ข

อุณหภูมิเน็ล (Neel Temperature) ของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิมีนิต (Neel Temperature) ของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก

Ferrite Type	Chemical Formula	Neel Temperature
Ca-Mn oxide	CaMnO ₃	-163.15
Chromium arsenide	CrAs	+26.85
Chromium (III) oxide	Cr ₂ O ₃	+44.85
Co-Ti oxide	CoTiO ₃	-235.15
Cobalt (II) fluoride	CoF ₂	-235.15
Cobalt (II) oxide	CoO	+17.85
Cobalt oxid	Co ₃ O ₄	-233.15
Copper (I) oxide	CuO	-43.15
Erbia	Er ₂ O ₃	-269.75
Franklinite	ZnFe ₂ O ₄	-264.15
Gadolinia	Gd ₂ O ₃	-271.55
Hematite	-Fe ₂ O ₃	+674.85
liimenite	FeTiO ₃	-205.15
Iron(II)fluoride	FeF ₂	-194.15
Iron(II) oxide	FeO	-75.15
La-Cr oxide	LaCrO ₃	+8.85
La-Mn oxide	LaMnO ₃	-173.15
Manganese(II) oxide	MnO	-151.15
Manganese telluride	MnTe	+49.85
Manganese (III) oxide	Mn ₂ O ₃	-183.15
Mn-Ti oxide	MnTiO	-232.15
Nd-Fe oxide	NdFeO ₃	+486.85
Niccolite	NiAs	-10.15
Nickel fluoride	NiF ₂	-190.15
Nickel oxide	NiO	+251.85
Pyrolusite	MnO ₂	-189.15
Uranium (IV) oxide	UO ₂	-424.35



ภาพผนวก ค

สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก

ตารางที่ ค-1 สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก

Name	Chemical Formula	Curie Temperature (T_C ,K)
Ammonium cadmium sulfate	$(\text{NH}_4)_2\text{Cd}_2(\text{SO}_4)_3$	95
Ammonium fluoroborate	$(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$	176
Ammonium hydrogenodichloroacetate	$\text{NH}_4\text{H}(\text{ClCH}_2\text{COOH})_2$	128
Ammonium hydrogensulfate	$(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$	271
Ammonium nitrate	NH_4NO_3	398
Ammonium Rochell's salt	$\text{NH}_4\text{KC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	297
Barium titanate	BaTiO_3	406
Barium titanium niobate	$\text{Ba}_6\text{TiNb}_8\text{O}_{30}$	521
Barium sodium niobate	$\text{Ba}_6\text{Na}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$	833
Cadmium pyroniobite	$\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	185
Cesium dihydrogen arsenate	CsH_2AsO_4	143
Cesium dihydrogen phosphate	CsH_2PO_4	159
Cesium hydrogenoselenite	$\text{CsH}_3(\text{SeO}_3)_2$	143
Gadolinium molybdate	$\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$	432
Lead iron niobate	PbFeNbO	385
Lead iron tungstate	PbFeWO	183
Lead magnesium niobate	PbMgNbO	272
Lead titanate	PbTiO_3	765
Lead zinc niobate	PbZnNbO	413
Lithium ammonium tartrate	$\text{NH}_4\text{LiC}_4\text{H}_4\text{O}_6$	106
Lithium iodate	LiIO_3	529
Lithium niobate	LiNbO_3	1483
Lithium tantalate	LiTaO_3	891

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริก

Name	Chemical Formula	Curie Temperature (T_c ,K)
Methyl ammonium alum	$\text{NH}_3(\text{CH}_3)\text{Al}(\text{SO}_4)12\text{H}_2\text{O}$	177
Potassium dihydrate arsenate	KH_2AsO_4	97
Potassium dihydrogen phosphate	KH_2PO_4	123
Potassium iodate	KIO_3	485
Potassium niobate	KNbO_3	712
Potassium nitrate	KNO_3	397
Potassium selenate	K_2SeO_4	93
Potassium tantanate niobate	$\text{K}_3\text{Ta}_2\text{NbO}_9$	271
Rubidium dihydrogen arsenate	RbH_2AsO_4	111
Rubidium dihydrogen phosphate	RbH_2PO_4	146
Rubidium nitrate	RbNO_3	437-487
Sodium nitrate	NaNO_3	548



ภาคผนวก ง
ผลงานการตีพิมพ์วารสารทางวิชาการ

Characterization of Antiferromagnetism in Double Perovskites $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ Prepared by Solid State Method

Naphat Albutt^{1,2,a,*}, Vanussanun Aitviriyaphan^{3,b}, Thanapong Sareein^{1,c},
 Sudarath Suntaropas^{4,d}, Panakamon Thonglor^{4,e}, Suejit Pechprasarn^{5,f},
 Sangwoei Sawekwiharee^{1,g}, Wirote Ritthong^{3,h} and Supree Pinitsoontorn^{6,i}

¹Division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800, Thailand

²Advanced Materials Physics Laboratory (Amp.), School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, 30000, Thailand

³Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800, Thailand

⁴Department of Industrial Physics and Medical Instrumentation, Faculty of Applied Science King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

⁵Department of Electronic and Information Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China

⁶Integrated Nanotechnology Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

^{a,*}naphat.cha@rmutp.ac.th, ^bvanussanun.a@hotmail.com, ^cthanapong.s@rmutp.ac.th,
^dsudarath.s@sci.kmutnb.ac.th, ^epanakamon.t@sci.kmutnb.ac.th, ^fsuejit.pechprasarn@polyu.edu.hk,
^gsangwoei.s@rmutp.ac.th, ^hwirote.r@rmutp.ac.th, ⁱpsupree@kku.ac.th

Keywords: Sintering, double perovskite, BFMO

Abstract. The magnetic properties of $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ (BFMO) double perovskite are investigated. BFMO samples were prepared by solid state reaction method through compression. Magnetic properties are influenced by electron environments of the Fe^{3+} and Mo^{5+} ions within the perovskite structure. BFMO sintered at 800 °C exhibited the largest hysteresis loop at 50 K. In addition, the values of M_s and M_r indicate ferromagnetic behaviour in BFMO ceramics sintered at 800 °C for different times up to 10 hours. Using the Curie-Weiss law fitting to investigate $\mu_{\text{eff}} \sim 30\mu_B$ high spin of Fe and Mo, and negative θ present the antiferromagnetic characteristics of the BFMO sample.

Introduction

The study of materials with magnetic properties such as perovskites is important for improving many magnetic devices (magnetic sensors, magnetic and electronic parts and nano magnetics for biosensors). Ceramics of $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ share similar magnetic behaviour with $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite, a study about mechanical strain [1], where characterization of ferromagnetism with sol-gel preparation method [2, 3]. Some works of this ceramics have studied cation order and magnetic properties [4]. Most representatives of the double perovskite have the general formula $(\text{AA}')(\text{BB}')\text{O}_6$ such as the ferromagnetic $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ [5-9]. A and A' are alkaline rare earth cations such as Ba^{2+} , Ca^{2+} and Sr^{2+} , while B and B' represent transition metal cations as Fe^{3+} and Mo^{5+} , which can result in material with high Curie temperature (T_c) and spin polarization [10]. The temperature dependence of the magnetization results show ferromagnetic metallic and antiferromagnetic (or paramagnetic) insulating domains, which is believed to induce a metal-insulator transition at the Curie temperature [10, 11].

Following on from previous research on the calcined material and sintering at high temperature of samples [12-15]. A vibrating sample magnetometer (VSM instrument) is used to study the magnetic properties or magnetic behaviour of $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ samples. This instrument can find the samples magnetization using an applied magnetic field (H). Resulting in a characteristic M-H curve and M-T curve, which is used to classify the kinds of magnetic behaviour as revealed in samples.

Experimental Details

The $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ bulk was synthesized using a 2:1:1 ratio of BaCO_3 (Barium carbonate, 99.9%), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Iron(III) nitrate, 99.0%) and MoO_3 (Molybdenum trioxide, 99.0%). The starting precursors were prepared by mixing the powders with deionized (DI) water at a ratio of 1:7.5. The mixture was stirred up to 700 rpm for 48 hours to achieve homogeneity. A calcined sample was prepared by heating the solution at temperatures 500 °C rate 5 °C /min hold on 2 hours for preparing powder sample. Next the powder was compressed to a disk with a compressor for the following sintering step. Sintering was achieved by heating to 800 °C for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours.

To reveal the magnetic behaviour, the $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ samples were measured by a vibrating sample magnetometer (VSM). In this case we measured at temperatures from 50K to 350K to produce an M-T curve and determine Curie constant(C), an effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-temperature (θ) and susceptibility (χ), whereas the applied magnetic fields (H) were from -30 kOe to +30 kOe. On the other hand, in the case of M-H curve, we can determine the saturation magnetic (M_s), remanence magnetic (M_r) and coercive force (H_c) at temperatures of 50K, 150K and 300K under applied magnetic fields (H) were from -30 kOe to +30 kOe.

Results and Discussion

Figure 1 presents plots of magnetization hysteresis loops for the $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite produced from the temperature conditions of 800 °C sintering for 4 hours, 6 hours, 8 hours, and 10 hours, measurements were made with applied temperature of 50K, 150K and 300K. It is clearly seen in the figure that all of the conditions exhibit hysteresis loops. From the data of BFMO samples which can be summarised as shown in Table1 for all conditions, it was found that the high values of M_s presented by sintering at 800 °C for an optimum of 8 hours of 2.578 emu/g, which is magnetization strength material greater than sintering for times of 6 hours, 4 hours, and 10 hours with values of 1.989 emu/g, 1.661emu/g and 1.138 emu/g, respectively. The value of M_r is consistent with the saturation magnetism at 800 °C for 8 hours of 0.725emu/g, whereas the lower value ~0.356 emu/g in condition at10 hours. However, changing the applied temperature produced different values such as hysteresis loop at room temperature exhibited the resulting of coercive force ~4.509K, which is indicative to a close permanent magnet more than other conditions. Furthermore, M_s measured at low temperature are indicated to high values for all conditions, comparison of temperature 150K and 300K, it can be correlated to Figure1(a-d). Therefore, these results present that the values of M_s depend on applied temperature, which show the magnetic strength of the BFMO ceramic, but the coercive force (H_c) shown by a large loop in each condition in order to fine to soft or hard magnetic BFMO sample and M_r was attributed to the permanent magnet in BFMO sample. In addition, this material can be observed with respect to sintering times to elucidate the possibility of apparitions as hysteresis loop in perovskite ceramics. According to the preparation method presented in this work, it is observed the behaviour was ascribed to a close ferromagnetic material for any conditions. Finally, this investigation proposed BFMO samples as magnetic material with applied temperature and time sintering effect associates with magnetic properties.

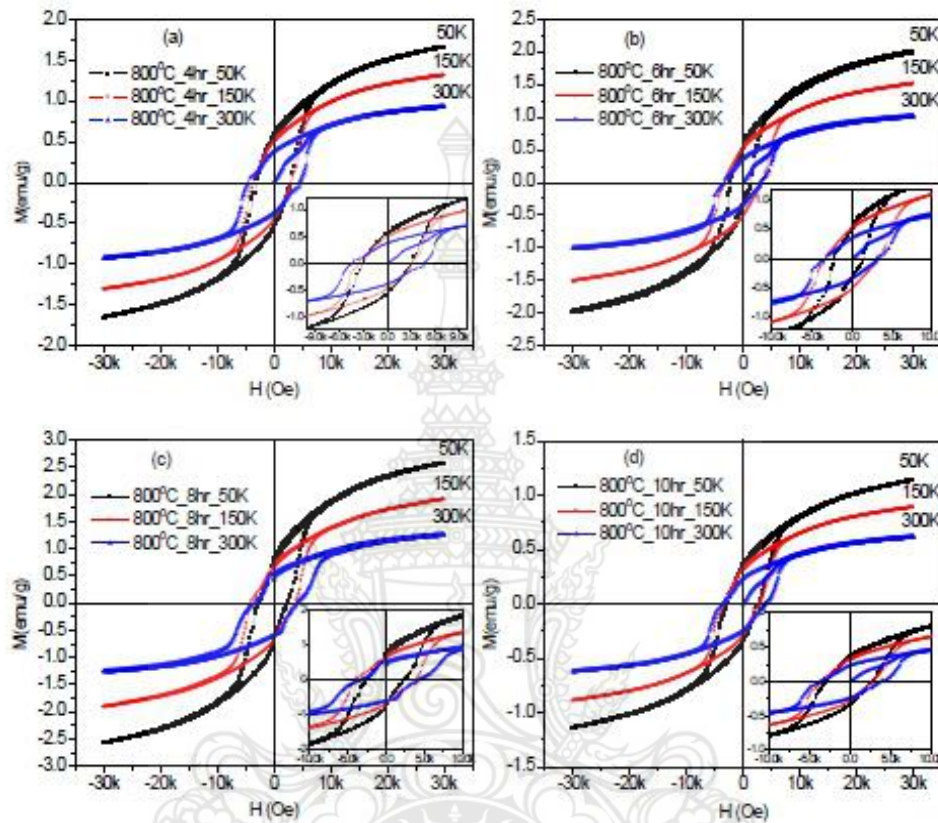


Figure 1. M–H curves of double perovskite $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ samples measured at a temperature of 50 K, 150 K and 300 K. $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ sintered at 800 °C (a) 4 hours, (b) 6 hours, (c) 8 hours and (d) 10 hours. The insets show H_c and M_r each condition.

Table 1. Saturation magnetic (M_s), remanence magnetic (M_r) and coercive force (H_c) of BFMO ceramic at temperatures of 50K, 150K and 300K under applied magnetic fields (H) from -30 kOe to +30 kOe.

Sample	Temperature 50K			Temperature 150K			Temperature 300K		
	M_s	M_r	H_c	M_s	M_r	H_c	M_s	M_r	H_c
BFMO 800°C 4hr	1.661	0.596	2.945K	1.313	0.500	3.101K	0.928	0.398	4.225K
BFMO 800°C 6hr	1.989	0.646	2.544K	1.513	0.510	3.001K	1.012	0.400	4.509K
BFMO 800°C 8hr	2.578	0.725	2.500K	1.909	0.650	2.700K	1.262	0.500	2.500K
BFMO 800°C 10hr	1.138	0.356	2.546K	0.888	0.300	2.560K	0.618	0.251	4.000K

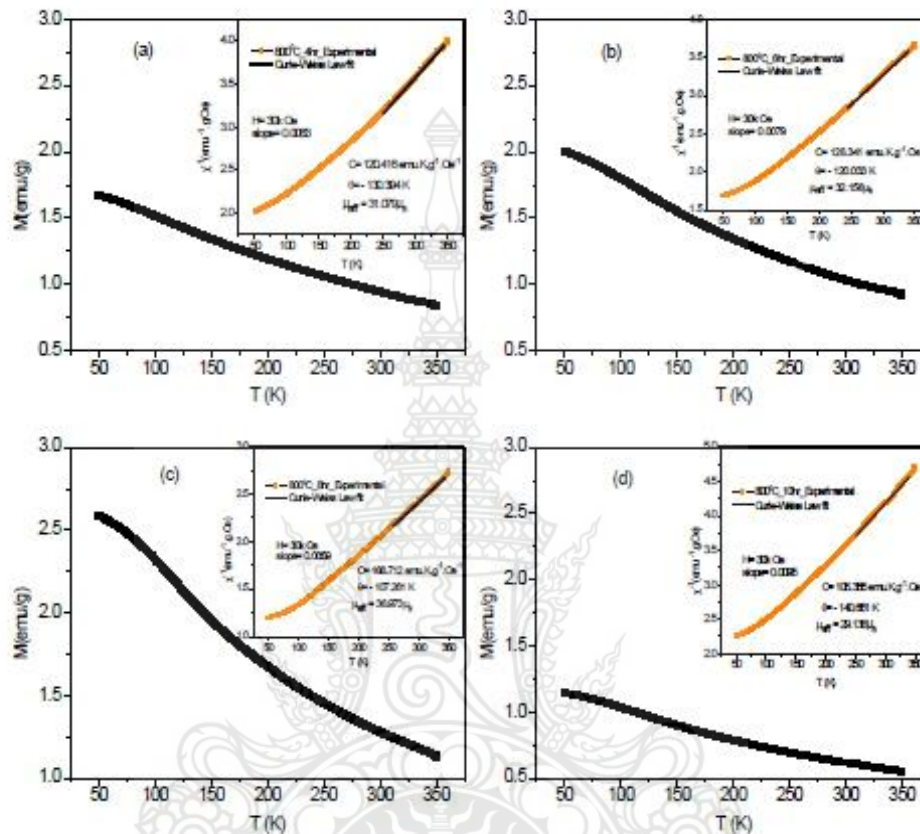


Figure 2. (M-T) curves of $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskites for $H= 30$ kOe. Thermal magnetization with temperatures (K) for samples sintered at 800°C for (a) 4 hours, (b) 6 hours, (c) 8 hours and (d) 10 hours, respectively. Insets show the inverse magnetic susceptibility (χ^{-1}) and magnetic field ($H=30$ kOe).

Table 2. Effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-Weiss temperature (θ), Curie constant (C) obtained from Curie-Weiss law fitting results for sintered $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite.

Sample	μ_{eff} (μ_B)	θ (K)	C ($\text{emu}\cdot\text{K}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$)	M (at 50K) (emu/g)	M (at 350K) (emu/g)
BFMO 800°C 4hr	31.079	-130.394	120.416	1.664	0.834
BFMO 800°C 6hr	32.156	-120.033	128.341	1.994	0.918
BFMO 800°C 8hr	36.973	-107.261	168.712	2.584	1.136
BFMO 800°C 10hr	29.138	-140.661	105.355	1.139	0.547

Figure 2(a-d) the temperature dependence of magnetization of BFMO sample sintered at temperature 800°C , for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours (four conditions), respectively. The Curie-Weiss law [16] was used to determine magnetic susceptibility by linear fit to the data between 250 K and 350 K at 30 kOe, which is shown in figure 2 insets. The equation of Curie-Weiss law is demonstrated that $\chi = C/(T-\theta)$, where χ is susceptibility, θ is Curie-Weiss temperature, T is temperature and C defines the Curie constant. The Curie constant is given by $C = [\mu_0(\mu_B)^2/3k_B] \cdot N g^2 s(s+1)$, where N is the number of magnetic ions per unit volume, g is the Lande g-factor, μ_B is the Bohr magneton, k_B is Boltzmann's constant, and s is 1/2 *unpaired electrons (for

Fe^{3+} is 5). Furthermore, $\mu_{\text{eff}} = g \cdot \mu_B [s(s+1)]^{1/2}$, which is effective magnetic moment (μ_{eff}). Firstly, we can be found the slope from the inverse magnetic susceptibility ($\chi^{-1}(T)$) curves of temperature dependence and fitting line in the temperature range are revealed in the inset of the figure. Secondly, nonlinear curve fit from the equation of Curie-Weiss law for investigation of parameter Curie law. For all samples, the results of the effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-Weiss temperature (θ), Curie constant (C) obtained from Curie-Weiss law fitting results for sintering $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite are summarized in Table 2. However, χ can be shown versus magnetic field or temperature, but in this case it can be inhibited to apply 50 K to 350 K. In theory, the calculated magnetic moment of high spin Fe^{3+} and low spin Fe^{3+} are $5.92\mu_B$ and $1.73\mu_B$ respectively. As a result, the effective magnetic moment was $\mu_{\text{eff}} \sim 31.079\mu_B$, $\mu_{\text{eff}} \sim 32.156\mu_B$, $\mu_{\text{eff}} \sim 36.973\mu_B$ and $\mu_{\text{eff}} \sim 29.138\mu_B$ for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours, respectively. The different values of the theoretical and the experimental effective magnetic moment (μ_{eff}) indicate that all the magnetic ions are in the high spin configuration and increase with elevated sintered time. For the values of Curie-Weiss temperature (θ) were exhibited in all negative values, it was found that the magnetic property present to antiferromagnetic characteristics due to magnetic pole of opposite spin with ferromagnetic. As clearly seen that in Figure 2(a-d) presents the temperature dependent of magnetization (M-T) curves can be correlated to the inverse magnetic susceptibility. In addition, it was observed that the increasing magnetizations were consistent with the high sintering time of material, whereas the sintering at 10 hours had decreased for in the case of measured 50K. However, comparison the measured at 350K had the values of magnetization increased by sintering time.

Summary

Magnetic properties of bulk $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_6$ ceramics are influenced by the sintering temperature and sintering time. BFMO sintering at the high temperature of 800°C for 8 hours exhibited the high $M_s \sim 2.578$ emu/g at 50 K and ~ 1.262 emu/g at room temperature. In addition, the values of M_s and M_r indicate ferromagnetic behaviour in the bulk BFMO ceramic due to high spin of Fe and Mo, which is confirmed by using Curie-Weiss law fitting. Furthermore, BFMO sample show negative values of Curie-Weiss temperature indicative of antiferromagnetic characteristic of material in all conditions. Finally, the value of magnetization was reduced under a higher applied temperature.

Acknowledgments

The authors thank the Advanced Materials Physics Laboratory (Amp.), School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima and the division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP).

References

- [1] H. Wu, Y. Qian, E. Kan, R. Lu, Y. Liu, W. Tan, C. Xiao, and K. Deng, The effect of biaxial mechanical strain on the physical properties of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$: A theoretical study, *Solid State Communications*. 191 (2014) 70-75.
- [2] M. Cernean, F. Vasiliu, C. Bartha, C. Plapcianu and I. Mercioniu, Characterization of ferromagnetic double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ prepared by various methods, *Ceramics International*, 40, A8 (2014) 11601-11609.
- [3] M. Cernea, F. Vasiliu, C. Plapcianu, C. Bartha, I. Mercioniu, I. Pasuk, R. Lowndes, R. Trusca, G.V. Aldica, L. Pintilie, Preparation by sol-gel and solid state reaction methods and properties investigation of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *Journal of the European ceramics society*. 33 (2013) 2483-2490.

- [4] H. Sakuma, T. Taniyama, Y. Kitamoto and Y. Yamazaki, Cation order and magnetic properties of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *Journal of applied physics*.93 (2003) 2816-2819.
- [5] C. Yuan, S. Wang, W. Song, T. Yu, J. Dai, S. Ye and Y. Sun, Enhanced intergrain tunnelling magnetoresistance in double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ polycrystals with nanometer-scale particles, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 3853-3855.
- [6] Y. Tomioka, T. Okuda, Y. Okimoto, R. Kumai and K. Kobayashi, Magnetic and electronic properties of a single crystal of ordered double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *Phys. Rev. B* 61 (2000) 422-427.
- [7] C. Yang and T. Fang, Structures and development mechanism of the anti-phase boundaries in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *J. Electrochem. Soc.* 159 (2012) 35-39.
- [8] J. Balcells, J. Navarro, M. Bibes, A. Roig, B. Martinez and J. Fontcuberta, Cationic ordering control of magnetization in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite, *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 781-783.
- [9] P. Zhao, R. Yu, F. Li, Z. Liu, M. Jin and C. Jin, Structural stability and electrical properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ under high pressure, *J. Appl. Phys.* 92 (2002) 1942-1944.
- [10] X. Lia, Y. Suna, W. Lua, R. Anga, S. Zhanga, X. Zhua, W. Songa and J. Daia, Size dependence of electronic and magnetic properties of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, *Solid State Communications* 145 (2008) 98-102.
- [11] K. Kobayashi, T. Kimura, H. Sawada, K. Terakura and Y. Tokura, Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure, *Nature* 395 (1998) 677-680.
- [12] S. Theeranum, N. Chathirat, M. Chivalrat and Y. Teerapon, Synthesis, characterization, and dielectric properties of Y_2NiMnO_6 ceramics prepared by a simple thermal decomposition route, *J Mater Sci: Mater Electron*, vol 25 (2014) 1361-1368.
- [13] P. Deeyai, T. Sareein, B. Putasaeng, N. Chathirat, Dielectric properties of Y_2NiMnO_6 ceramics at various sintering times and temperatures, *AMM*. 804(2015) 16-20.
- [14] T. Sareein, P. Deeyai, B. Putasaeng, N. Chathirat, The Dielectric property of Y_2NiMnO_6 ceramics sintered at high temperature, *AMM*. 804(2015) 108-112.
- [15] T. Sareein, P. Deeyai, B. Putasaeng, N. Chathirat, Electrical properties of Y_2NiMnO_6 ceramics sintered at high temperature, *AMM*. 804(2015) 55-58.
- [16] L. Wang, J. Xu, B. Gao, A. Chang, J. Chen, L. Bian, and C. Song, Synthesis of BiFeO_3 nanoparticles by a low-heating temperature solid state precursor method, *Materials Research Bulletin*. 48 (2013) 383-388.

Study, Magnetic Properties of BaTiFeO₃ Perovskite Prepared by Solid State Method

Vanussanun Aitviriyaphan^{1,a}, Thanapong Sareein^{2,b},
 Sudarath Suntaropas^{4,c}, Panakamon Thonglor^{4,d}, Sangwoei Sawekwiharee^{2,e},
 Suejit Pechprasam^{5,f}, Wirote Ritthong^{1,g},
 Supree Pinitsoontorn^{6,h} and Naphat Albutt^{2,3,i,*}

¹Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800, Thailand

²Division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800, Thailand

³Advanced Materials Physics Laboratory (Amp.), School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, 30000, Thailand

⁴Department of Industrial Physics and Medical Instrumentation, Faculty of Applied Science King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

⁵Department of Electronic and Information Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China

⁶Integrated Nanotechnology Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

^avanussanun.a@hotmail.com, ^bthanapong.s@rmutp.ac.th, ^csudarath.s@sci.kmutnb.ac.th, ^dpanakamon.t@sci.kmutnb.ac.th, ^esangwoei.s@rmutp.ac.th, ^fsuejit.pechprasam@polyu.edu.hk, ^gwirote.r@rmutp.ac.th, ^hpsupree@kku.ac.th, ⁱnaphat.cha@rmutp.ac.th

Keywords: BTFO, perovskite, Fe³⁺

Abstract. The magnetic properties of BaFeTiO₃ (BTFO) perovskite are investigated. BTFO samples were prepared by solid state reaction method through compression. Magnetic properties are influenced by electron environments of the Fe³⁺ ions within the perovskite structure. Furthermore, the values of Ms and Mr indicate ferromagnetic behaviour in BFMO ceramics sintered at 800 °C for sintering as 800 °C for 6 hours at 1.898 emu/g, which is magnetization strength material more than sintering at 4 hours, 8 hours, 10 hours as 1.794 emu/g, 1.333 emu/g and 1.192 emu/g at measured of low temperature. Using the Curie-Weiss law fitting for investigate $\mu_{\text{eff}} \sim 38\mu\text{B}$ high spin of Fe, negative of θ present to antiferromagnetic characteristics of BTFO sample. Finally, BTFO sintering at the high temperature of 800 °C for 6 hours exhibited the high Ms~1.898 emu/g at 50 K and ~1.216emu/g at room temperature.

Introduction

The ceramics of BaTiO₃ perovskite have structural characteristics which make it appropriate for doping with 3d transition metals (Mn, Fe, Co, Ni) that have been predicted to enhance magnetic properties [1]. They were doped by Fe (iron) for investigation of ferroelectricity and ferrimagnetism as BaTiO₃ in solid [2], and thin-film [3]. Additionally, some of the research investigating magnetic properties has involved doping another metal for improving material such as Co and Mn [4], Fe and Ni [5, 6]. However, most of the application for doping metal into BaTiO₃ is that electrospun heterostructured nanofiber [7]. Therefore, technological applications arise such as piezoelectric and ultrasonic actuators [8], pyroelectric detectors [9], posistors, multilayer ceramic capacitors [10], temperature sensors and controllers as well as tuneable elements in microwave circuits [11-14].

Following on from previous research on the calcined material and sintering at high temperature of samples [15-18]. A vibrating sample magnetometer (VSM instrument) is used to study the

magnetic properties or magnetic behaviour of BaFeTiO_3 samples. This instrument can find the samples magnetization using an applied magnetic field (H). Resulting in a characteristic M-H curve and M-T curve, which is used to classify the kind of magnetic behaviour as revealed in samples.

Experimental Details

The BaFeTiO_3 bulk were synthesized using a 2:1:1 ratio of BaCO_3 (Barium carbonate, 99.9%), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Iron(III) nitrate, 99.0%) and TiO_2 (Titanium dioxide, 99.0%). The starting precursors were prepared by mixing the powders with deionized (DI) water at a ratio of 1:7.5. The mixture was stirred up to 700 rpm for 72 hours to achieve homogeneity. A calcined sample was prepared by heating the solution at temperatures 500 °C rate 5 °C /min hold on 2 hours for preparing powder sample. Next the powder was compressed by compressor for use in the part of sintering. Sintering of the resulting sample was achieved by heating to 800 °C for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours.

To reveal the magnetic behaviour, the BaFeTiO_3 bulk were measured by a vibrating sample magnetometer (VSM). In this case we measured at temperature from 50K to 350K for M-T curve and investigating of Curie constant(C), an effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-temperature (θ) and susceptibility (χ), whereas the applied magnetic fields (H) were from -30 kOe to +30 kOe. On the other hand, in the case of M-H curve, we can find the saturation magnetic (M_s), remanence magnetic (M_r) and coercive force (H_c) at temperature 50K, 150K and 300K under applied magnetic fields (H) were from -30 kOe to +30 kOe.

Results and Discussion

Figure 1(a-d) presents plots M-H curve of magnetization(M) dependence of applied magnetic field (H) for the BaFeTiO_3 perovskite produced from the temperature conditions of 800 °C for sintering at 4 hours, 6 hours, 8 hours, and 10 hours, measurements were made at a temperature of 50K, 150K and 300K. From the data of BTFO samples we can be summary as shown in Table1 all condition, it was found that the high values of M_s presented by sintering as 800 °C for 6 hours at 1.898 emu/g, which is magnetization strength material more than sintering at 4 hours, 8 hours, 10 hours as 1.794 emu/g, 1.333 emu/g and 1.192 emu/g at measured of low temperature, respectively. The value of M_r has consistent with the saturation magnetic at 800 °C for 6 hours at 0.650emu/g, whereas the less value ~0.520 emu/g in condition at 8 hours. In addition, M_s were measured by low temperature are shown to have high values for all conditions, comparison of temperature 150K and 300K, it can be correlated to Figure1(a-d). Therefore, these results present that the values of M_s depend on applied temperature, which show to strength magnetic of BTFO material and M_r was attributed to the permanent magnet in BTFO sample. Then, this material can be observed to time for sintering to elucidate the possibility of apparitions as M-H curve in perovskite ceramics. According to the preparation method presented in this work, it is observed they behaviour was ascribed to a close ferromagnetic material for any conditions. Finally, this investigation proposed BTFO samples as magnetic material with applied temperature and time sintering effect associates with magnetic properties.

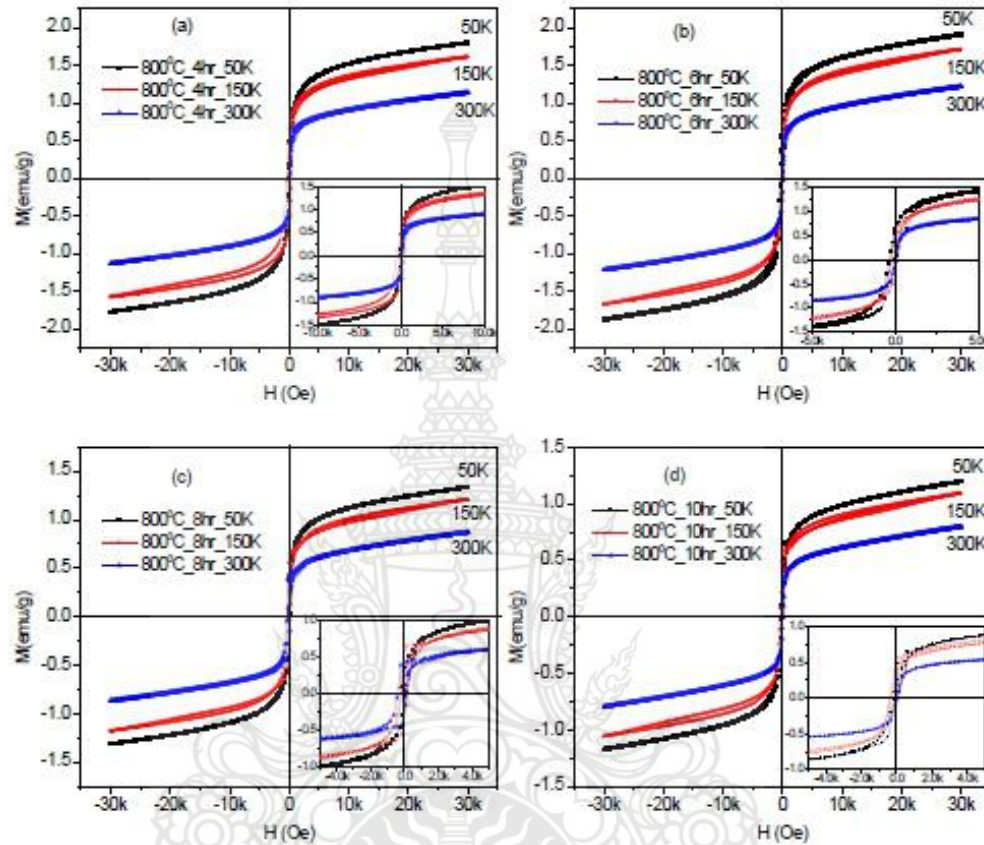


Figure 1. M–H curves of perovskite BaFeTiO₃ samples measured at a temperature of 50 K, 150K and 300K. BaFeTiO₃ sintered at 800 °C (a) 4 hours, (b) 6 hours, (c) 8 hours and (d) 10 hours. The insets show H_c and M_r each condition.

Table 1. To show the saturation magnetic (M_s), remanent magnetic (M_r) and coercive force (H_c) at temperature 50K, 150K and 300K under applied magnetic fields (H) were from -30 kOe to +30 kOe.

Sample	Temperature 50K			Temperature 150K			Temperature 300K		
	M _s	M _r	H _c	M _s	M _r	H _c	M _s	M _r	H _c
BTFO 800°C 4hr	1.794	0.650	-	1.601	0.650	-	1.133	0.500	-
BTFO 800°C 6hr	1.898	0.650	-	1.702	0.500	-	1.216	0.250	-
BTFO 800°C 8hr	1.333	0.520	-	1.200	0.480	-	0.871	0.450	-
BTFO 800°C 10hr	1.192	0.586	-	1.084	0.545	-	0.797	0.198	-

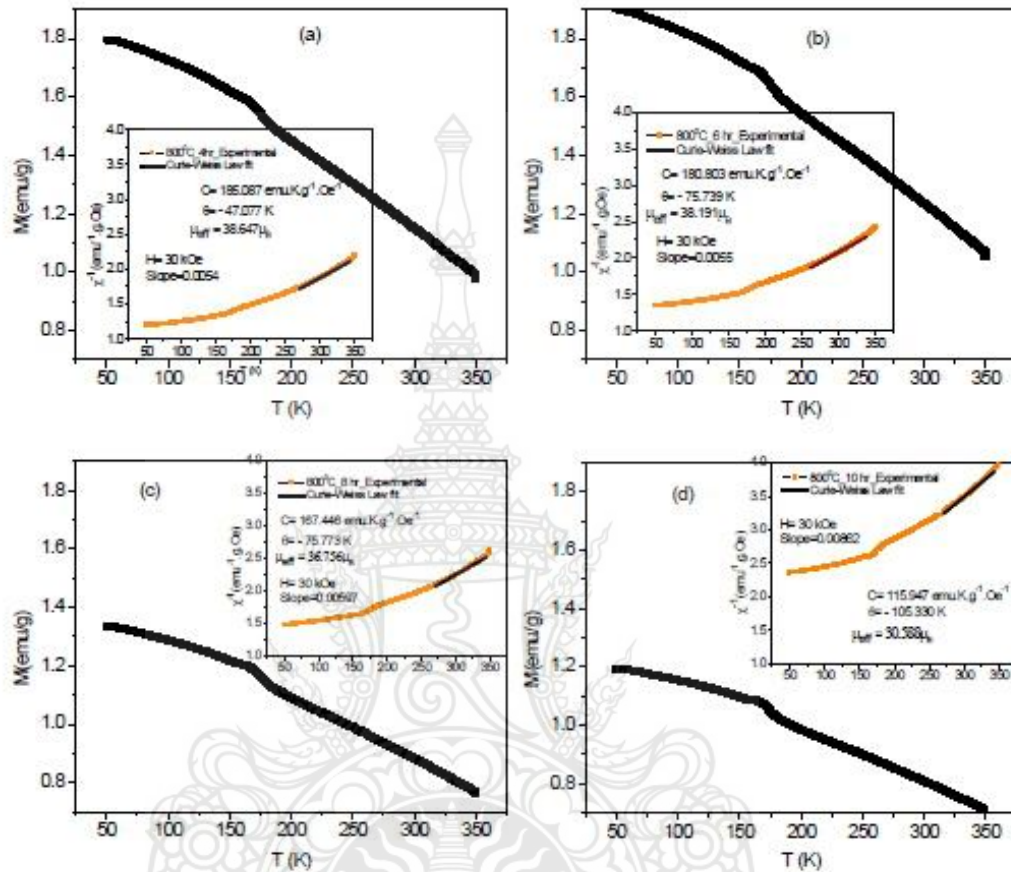


Figure 2. (M-T) curves of BaFeTiO₃ perovskites for H= 30 kOe. Thermal magnetization with temperatures (K) for samples sintering at 800 °C in (a) 4 hours, (b) 6 hours, (c) 8 hours and (d) 10 hours, respectively. Insets show the inverse magnetic susceptibility (χ^{-1}) and magnetic field (H=30 kOe).

Table 2. Effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-Weiss temperature (θ), Curie constant (C) obtained from Curie-Weiss law fitting results for sintering BaFeTiO₃ sample.

Sample	μ_{eff} (μ_B)	θ (K)	C ($\text{emu.K.g}^{-1}.\text{Oe}^{-1}$)	M (at 50K) (emu/g)	M (at 350K) (emu/g)
BTFO 800°C 4hr	38.647	-47.077	185.087	1.791	0.977
BTFO 800°C 6hr	38.191	-75.739	180.803	1.898	1.051
BTFO 800°C 8hr	36.756	-75.773	167.446	1.333	0.757
BTFO 800°C 10hr	30.589	-105.33	115.947	1.192	0.705

Figure 2(a-d) the temperature dependence of magnetization of BFMO sample sintered at temperature 800 °C, for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours, respectively. The Curie-Weiss law [16] was used to determine magnetic susceptibility by linear fit to the data between 250 K and 350 K at 30 kOe, which is shown in figure 2 insets. The equation of Curie-Weiss law is demonstrated that $\chi = C/(T-\theta)$, where χ is susceptibility, θ is Curie-Weiss temperature, T is temperature and C defines the Curie constant. The Curie constant is given by

$C = [\mu_0(\mu_B)^2/3k_B] \cdot Ng^2s(s+1)$, where N is the number of magnetic ions per unit volume, g is the Lande g -factor, μ_B is the Bohr magneton, k_B is Boltzmann's constant, and s is $1/2$ *unpaired electrons (for Fe^{3+} is 5). Furthermore, $\mu_{eff} = g \cdot \mu_B [s(s+1)]^{1/2}$, which is effective magnetic moment (μ_{eff}). Firstly, we can be found the slope from the inverse magnetic susceptibility ($\chi^{-1}(T)$) curves of temperature dependence and fitting line in the temperature range are revealed in the inset of the figure. Secondly, nonlinear curve fit from the equation of Curie-Weiss law for investigation of parameter Curie law. For all samples, the results of the effective magnetic moment (μ_{eff}), Curie-Weiss temperature (θ), Curie constant (C) obtained from Curie-Weiss law fitting results for sintering BaFeTiO₃ perovskite are summarized in Table 2. However, χ can be shown versus magnetic field or temperature, but in this case it can be inhibited to apply 50 K to 350 K. In theory, the calculated magnetic moment of high spin Fe^{3+} and low spin Fe^{3+} are $5.92\mu_B$ and $1.73\mu_B$ respectively. As a result, the effective magnetic moment was $\mu_{eff} \sim 38.647\mu_B$, $\mu_{eff} \sim 38.191\mu_B$, $\mu_{eff} \sim 36.756\mu_B$ and $\mu_{eff} \sim 30.589\mu_B$ for 4 hours, 6 hours, 8 hours and 10 hours, respectively. The different values of the theoretical and the experimental effective magnetic moment (μ_{eff}) indicate that all the magnetic ions are in the high spin configuration and decrease with elevated sintered time. For the values of Curie-Weiss temperature (θ) were exhibited in all negative values, it was found that the magnetic property present to antiferromagnetic characteristics due to magnetic pole show opposite spin with ferromagnetic. As clearly seen that in Figure 2(a-d) presents the temperature dependent of magnetization ($M-T$) curves can be correlated to the inverse magnetic susceptibility. In addition, it was observed that the decreasing magnetizations were consistent with the high sintering time of material, whereas the sintering at 10 hours had decreased for in the case of measured 50K at $M \sim 1.1925$ emu/g and 350K at $M \sim 0.705$ emu/g.

Summary

Magnetic properties of bulk BaFeTiO₃ sample are influenced by the sintering temperature and sintering time. BTFO sintering at the high temperature of 800 °C for 6 hours exhibited the high $M_s \sim 1.898$ emu/g at 50 K and ~ 1.216 emu/g at room temperature. In addition, the values of M_s and M_r indicate ferromagnetic behaviour in the bulk BTFO sample due to high spin of Fe, which is confirm by using Curie-Weiss law fitting. Furthermore, BTFO sample show negative values of Curie-Weiss temperature is meaning to antiferromagnetic characteristic of material all conditions. Finally, the value of magnetization was reduced by applied high temperature.

Acknowledgments

The authors thank the Advanced Materials Physics Laboratory (Amp.), School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima and the division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP).

References

- [1] H. Nakayama and H. Katayama-Yoshida, Theoretical prediction of magnetic properties of Ba(Ti_{1-x}Mx)O₃ (M=Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu), *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2001) L1355–L1358.
- [2] R. Maier, J. Cohn, J. Neumeier and L. Bendersky, Ferroelectricity and ferrimagnetism in iron doped BaTiO₃, *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 2536–2538.
- [3] R. Maier and J. Cohn, Ferroelectric and ferrimagnetic iron-doped thin-film BaTiO₃: Influence of iron on physical properties, *J. Appl. Phys.* 92 (2002) 5429–5436.
- [4] J. Lee, Z. Khim, Y. Park, D. Norton, N. Theodoropoulou, A. Hebard, J. Budai, L. Boatner, S. Pearton and R. Wilson, Magnetic properties of Co- and Mn-implanted BaTiO₃, SrTiO₃ and KTaO₃, *Solid-State Electron.* 47 (2003) 2225–2230.

- [5] A. Rajamani, G. Dionne, D. Bono and C. Ross, Faraday rotation, ferromagnetism, and optical properties in Fe-doped BaTiO₃, *J. Appl. Phys.* 98 (2005) 063907.
- [6] F. Maldonado, S. Jácome and A. Stashans, Codoping of Ni and Fe in tetragonal BaTiO₃, *Computational Condensed Matter* (2017) 1-18.
- [7] L. Heping, X. Lihong and Y. Youwei, Preparation and magnetic properties of electrospun Co/BaTiO₃ heterostructured nanofibers, *J. of Alloys and Compounds* 611 (2014) 38-42.
- [8] G. Jonker, Some aspects of semiconducting barium titanate, *Solid. State Electron.* 7 (1964) 895-903.
- [9] W. Heywang, Semiconducting barium titanate, *J. Mater. Sci.* 6 (1971) 1214-1224.
- [10] B. Brahmecha and K. Sinha, Resistivity anomaly in semiconducting BaTiO₃, *Jpn. J. Appl. Phys.* 10 (1971) 496-504.
- [11] S. Park, J. Ha and H. Wadley, Preparation of BaTiO₃ films for MLCCs by direct vapor deposition, *Integr. Ferroelectr.* 95 (2007) 251-259.
- [12] Z. Tian, X. Wang, L. Shu, T. Wang, T. Song, Z. Gui and L. Li, Preparation of nano BaTiO₃-based ceramics for multilayer ceramic capacitor application by chemical coating method, *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (2009) 830-833.
- [13] V. Sreenivas Puli, P. Adireddy and D. Chrisey, Crystal structure, dielectric, ferroelectric and energy storage properties of La-doped BaTiO₃ semiconducting ceramics, *J. Adv. Dielectrics* 5 (2015) 1550027.
- [14] A.C. Ianculescu, C.A. Vasilescu, M. Crisan, M. Raileanu, B.S. Vasile, M. Calugaru, D. Crisan, N. Dragan, L. Curecheriu, L. Mitoseriu, Formation mechanism and characteristics of lanthanum-doped BaTiO₃ powders and ceramics prepared by the sol-gel process, *Mater. Charact.* 106 (2015) 195-207.
- [15] S. Theeranum, N. Chathirat, M. Chivalrat and Y. Teerapon, Synthesis, characterization, and dielectric properties of Y₂NiMnO₆ ceramics prepared by a simple thermal decomposition route. *J Mater Sci: Mater Electron*, vol 25 (2014) 1361-1368.
- [16] P. Deeyai, T. Sareein, B. Putasaeng, N. Chathirat, Dielectric properties of Y₂NiMnO₆ ceramics at various sintering times and temperatures, *AMM.* 804(2015) 16-20.
- [17] T. Sareein, P. Deeyai, B. Putasaeng, N. Chathirat, The Dielectric property of Y₂NiMnO₆ ceramics sintered at high temperature, *AMM.* 804(2015) 108-112.
- [18] T. Sareein, P. Deeyai, B. Putasaeng, N. Chathirat, Electrical properties of Y₂NiMnO₆ ceramics sintered at high temperature, *AMM.* 804(2015) 55-58.

ประวัติการศึกษา



ชื่อ นามสกุล นายวนันันท์ อิชฎิวิริยะพรรณ
 วัน เดือน ปีเกิด 15 มกราคม 2534
 ที่อยู่ 11/260 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง	2009
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2014

ประวัติการทำงาน

2559-ปัจจุบัน บริษัท ฟรอนท์ไลน์ เอ็นจิเนียริง จำกัด
 50/280 หมู่ 6 ถนนแจ้งวัฒนะ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด
 นนทบุรี 11120