



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมสตรอนเทียมเฟอไรต์โดยการเจือด้วยแลนทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์

Preparation of Strontium Ferrites Doped with Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide

โดย ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย

นายโกเมน ปาปะโธ

ศ. ดร. ทวี ตันมศิริ

พฤษภาคม 2553

สัญญาเลขที่ MRG5180113

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์โดยการเจือด้วย
แลนทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์

Preparation of Strontium Ferrites Doped with
Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide

	ผู้วิจัย	สังกัด
ผศ. ดร. วันดี	อ่อนเรียบร้อย	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
นายโกเมน	ปาปะโอ	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ. ดร. ทวี	ตันขศิริ	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) เป็นอย่างสูงที่ทำให้การสนับสนุนเงินวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยและพัฒนาครั้งนี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ใช้สถานที่และเครื่องมือต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ทวี ดันฉศิริ ที่ได้ให้คำแนะนำ และการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณครู อาจารย์ บิดามารดา และครอบครัว ที่มีส่วนส่งเสริมสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา และหากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง หัวหน้าโครงการต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่ารายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจในงานด้านนี้ต่อไปไม่มากนักน้อย

ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย
(หัวหน้าโครงการ)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5180113

ชื่อโครงการ: การเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์โดยการเจือด้วยแลนทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์

ชื่อนักวิจัย: ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย/นายโกเมน ปาปะโล/ ศ. ดร. ทวี ตันขศิริ

E-mail Address: wandeeon@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

$\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เฟอร์ไรต์เตรียมด้วยขบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิม สารประกอบถูกเตรียมจากผงของ SrCO_3 , La_2O_3 , Fe_2O_3 และ CoO และนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาผลของการเติมโคบอลต์และแลนทานัมที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่าง $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อ $x = 0.2$ และ y เท่ากับ 0.0 ถึง 1.0 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขนาดเกรนเฉลี่ยของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโคบอลต์ (y) เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1,150 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส ผลจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรต์บริสุทธิ์กับตัวอย่าง $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,250 องศาเซลเซียส สำหรับ $y \leq 0.2$ พบเฟสใหม่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ซึ่งประกอบด้วย LaFeO_3 , CoFe_2O_4 และเฟสที่ไม่ทราบสำหรับ $y > 0.2$ จากการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่าง $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่เตรียมด้วยการเติมโคบอลต์ปริมาณต่างๆ และที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ กัน ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) พบว่าค่าสภาพลี้ยงแม่เหล็ก (H_C) มีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นหรือการเติมโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่ไม่ถูกเจือ ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสมีค่าสภาพลี้ยงแม่เหล็กที่สูง 4,850 Oe ส่วนค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของตัวอย่าง

$\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด 60 emu/g สำหรับตัวอย่าง $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่มีค่า $x = 0.2$ และ $y = 1.0$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสได้ค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวสูงสุด (M_s) ประมาณ 127 emu/g และมีความสูญเสียเนื่องจากวงอิสเทอร์ริซิสต่ำสุด ในการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่มีค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวสูง มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ ($y > 1.0$) หรือการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: สตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรต์/ อุณหภูมิการเผาซินเตอร์/ สภาพลบล้างแม่เหล็ก/ สภาพแม่เหล็กค้าง

Abstract

Project Code: MRG5180113

Project Title: Preparation of Strontium Ferrites Doped with Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide

Investigator: Asst. Prof. Dr. Wandee Onreabroy/ Mr.Komane Papato/
Prof. Dr. Tawee Tunkasiri

E-mail Address: wandeeon@yahoo.com

Project Period: 2 years

Abstract:

The $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ferrites were fabricated by the conventional ceramic process. The compounds were prepared from SrCO_3 , La_2O_3 , Fe_2O_3 , and CoO powders, and then calcined at $1,100^\circ\text{C}$. In this study, the effects of cobalt and lanthanum addition on microstructures and magnetic properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ samples with $x = 0.2$ and $y = 0.0$ to 1.0 were investigated. The microstructures of the $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ specimens, sintered at different temperatures, were studied using the scanning electron microscopy (SEM). The average grain size of strontium ferrite increases when cobalt additive (y) increases and sintering temperature is increased from $1,150^\circ\text{C}$ to $1,300^\circ\text{C}$. The X-ray diffraction (XRD) results showed that the pure strontium hexaferrite phase could be observed for $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ samples sintered at $1,250^\circ\text{C}$ for $y \leq 0.2$. The second phase for as-sintered $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ sample was found to consist of LaFeO_3 , CoFe_2O_4 and unknown phases for $y > 0.2$. The magnetic properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ specimens prepared with different cobalt additives and sintering temperatures were studied using the vibrating sample magnetometer (VSM). Coercivity (H_c) was observed to decrease with increasing sintering temperatures or cobalt additives. The undoped strontium ferrite sample ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) sintered at $1,150^\circ\text{C}$ has a high coercivity of $4,850$ Oe. The

remanence of $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ sample sintered at $1,200^{\circ}\text{C}$ has the highest value of 60 emu/g. For the $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ sample with $x = 0.2$ and $y = 1.0$ sintered at $1,300^{\circ}\text{C}$, the highest magnetization saturation (M_s) of about 127 emu/g and the lowest hysteresis loss were obtained. In order to prepare the strontium ferrite with higher magnetization saturation, it might be possible to increase the amount of cobalt ($y > 1.0$) or sintered at a temperature higher than $1,300^{\circ}\text{C}$.

Keywords: Strontium Hexaferrite/ Sintering Temperature/ Coercivity/ Remanence

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญ	๗
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
สัญลักษณ์	ถ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๗

บทที่

1	Excusive Summary	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.4	แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ	3
1.5	ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในแต่ละปี	4
1.6	งบประมาณโครงการ	5
2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3	การดำเนินการทดลอง	11
3.1	สารเคมี	11
3.2	เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง	11
3.3	วิธีการทดลอง	12
3.4	การเตรียมสาร	13
3.4.1	การเผาแคลไซน์ (Calcination)	15
3.4.2	การอัดขึ้นรูป	16
3.4.3	การเผาซินเตอร์	17
3.5	การทดสอบตัวอย่าง	18

3.5.1	การวัดความหนาแน่น	18
3.5.2	การศึกษาโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
3.5.3	การหาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
3.5.4	การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM)	22
4	ผลการทดลอง	23
4.1	ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	23
4.1.1	ผลการทดสอบโครงสร้างจาก XRD	23
4.1.2	ผลการวัดขนาดเกรน	24
4.1.3	ผลการวัดความหนาแน่น	25
4.1.4	ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก	25
4.2	ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เจือแลนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน	27
4.2.1	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD	27
4.2.2	ผลการวัดขนาดเกรน	28
4.2.3	ผลการวัดความหนาแน่น	28
4.2.4	ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก	29
4.3	ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เจือแลนทานัมและ โคบอลต์	30
4.3.1	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD	30
4.3.2	ผลการวัดขนาดเกรน	31
4.3.3	ผลการวัดความหนาแน่น	32
4.3.4	ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก	33
4.4	ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เจือแลนทานัมและ โคบอลต์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน	34
4.4.1	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD	34
4.4.2	ผลการวัดขนาดเกรน	36
4.4.3	ผลการวัดความหนาแน่น	39
4.4.4	ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก	40

5	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	43
5.1	ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์	43
5.1.1	ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ต่างๆ	43
5.1.2	ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อขนาดเกรน	46
5.1.3	ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อสมบัติ แม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์	48
5.2	ผลของปริมาณการเจือปนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียม เฟอร์ไรต์	54
5.2.1	ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$	54
5.2.2	ผลการเจือปนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่มีผล ต่อเกรน	56
5.2.3	ผลการเจือปนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่มีผล ต่อสมบัติแม่เหล็ก	58
5.3	ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เจือ ปนทานัมและโคบอลต์	64
5.3.1	ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	64
5.3.2	ผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผา ซินเตอร์ต่างกัน	68
5.3.3	ผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผา ซินเตอร์ต่างกัน	69
6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	76
6.1	สรุปผลการวิจัย	76
6.1.1	ผลของอุณหภูมิของการเผาซินเตอร์ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	76
6.1.2	ผลปริมาณการเจือปนทานัมและโคบอลต์ลงใน $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$	76
6.1.3	ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	77

6.1.4	สมบัติแม่เหล็กของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เตรียมได้	78
6.2	ข้อเสนอแนะ	78
7	ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย	79
7.1	รางวัลนวัตกรรมด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา	79
7.2	The AGI Award for Young Scientists 2008	79
7.3	รางวัลประกวดโครงงานในระดับภาควิชา	79
7.4	การนำเสนอผลงาน	80
7.5	เครื่องต้นแบบ	80
7.6	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานในระดับปริญญาตรีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย	81
7.7	งานวิจัยในปัจจุบันที่ต่อยอด	81
	เอกสารอ้างอิง	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติแม่เหล็กในงานวิจัยที่ผ่านมาของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์
3.1	ปริมาณส่วนผสมของสารที่ใช้เตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ
4.1	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เพาซินเตอร์ที่ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4.2	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เพาซินเตอร์ที่ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4.3	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเพาซินเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4.4	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่อุณหภูมิการเพาซินเตอร์ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5.1	ค่าสภาพคลวล้างแม่เหล็ก สภาพแม่เหล็กคงค้าง และค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ที่อุณหภูมิการเพาซินเตอร์ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C
5.2	ค่าสภาพคลวล้างแม่เหล็ก สภาพแม่เหล็กคงค้าง และค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เจือปนทานัมและโคบอลต์เมื่ออุณหภูมิเพาซินเตอร์เป็น 1,250°C
5.3	ค่า สภาพคลวล้างแม่เหล็ก สภาพแม่เหล็กคงค้าง และค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ ที่อุณหภูมิการเพาซินเตอร์ต่างๆ

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ส่องบนพื้นผิวของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ (ก) $1,200^{\circ}\text{C}$ และ (ข) $1,250^{\circ}\text{C}$	6
2.2 ภาพถ่ายจากอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เป็นลักษณะผงโดยมีอัตราส่วนโมล $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ เท่ากับ 8 9.23 และ 10 มีค่า pH 10 เมื่อเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 900°C (ข) $1,000^{\circ}\text{C}$ และ (ค) $1,100^{\circ}\text{C}$	7
2.3 วงฮิสเทอรีซิสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ $1,000^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนโมล (Fe/Sr) เป็น 11 11.6 และ 12	8
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์	12
3.2 อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาแคลไซน์	15
3.3 แม่แบบในการอัดขึ้นรูปของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์	16
3.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่มีขดลวดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน	17
3.5 อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาซินเตอร์	17
3.6 เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius	20
3.7 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII	20
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP	21
3.9 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407	22
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	23
4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	24
4.3 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	26
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	27
4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	28

รูปที่	หน้า
4.6 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	29
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อ y มีค่า (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0	30
4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยที่ y มีค่า (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0	31
4.9 เปรียบเทียบลักษณะวงฮิสเทอรีซิสเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ โดยที่ y มีค่า (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0	33
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	34
4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	35
4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 13,00°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	35
4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	36
4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	37
4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1300°C	38
4.16 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	40
4.17 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	41
4.18 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	42

รูปที่	หน้า
5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	44
5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	45
5.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ แสดงผลการเพิ่มขนาดของเกรนเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	46
5.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,150°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	47
5.5 วงฮิสเทอรีซิสของ (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	48
5.6 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	49
5.7 ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	51
5.8 ผลของค่าแมกเนโตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C	52
5.9 ผลของค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 13,00°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	53
5.10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดย y เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0	55
5.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ และ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	56
5.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อ (ก) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_{19}$ (ค) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ (ง) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	57
5.13 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ โดยที่ y = 0.2 0.5 0.8 และ 1.0 เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	58

รูปที่	หน้า
5.14 วงฮีสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	59
5.15 ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ (ค) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{19}$ (ง) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ (จ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_{19}$ (ฉ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{Co}_{0.4}\text{O}_{19}$ (ช) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ (ซ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.2}\text{Co}_{0.8}\text{O}_{19}$ และ (ณ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	61
5.16 ผลของค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ (ค) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{19}$ (ง) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ (จ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_{19}$ (ฉ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{Co}_{0.4}\text{O}_{19}$ (ช) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ (ซ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.2}\text{Co}_{0.8}\text{O}_{19}$ และ (ณ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	62
5.17 ผลของสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ (ก) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ (ค) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{19}$ (ง) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ (จ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_{19}$ (ฉ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{Co}_{0.4}\text{O}_{19}$ (ช) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ (ซ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.2}\text{Co}_{0.8}\text{O}_{19}$ และ (ณ) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	63
5.18 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	65
5.19 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	66
5.20 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) $1,150^{\circ}\text{C}$ (ข) $1,200^{\circ}\text{C}$ (ค) $1,250^{\circ}\text{C}$ และ (ง) $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	67
5.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ และ $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง (ก) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ (ข) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ (ค) $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$	68
5.22 วงฮีสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$ $1,200^{\circ}\text{C}$ $1,250^{\circ}\text{C}$ และ $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	69
5.23 วงฮีสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.9}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$ $1,200^{\circ}\text{C}$ $1,250^{\circ}\text{C}$ และ $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	70
5.24 วงฮีสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$ $1,200^{\circ}\text{C}$ $1,250^{\circ}\text{C}$ และ $1,300^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	71

รูปที่	หน้า
5.25 ผลของค่าสภาพลบลิ้งแม่เหล็ก (Hc) ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	73
5.26 แมกเนไคเซชันอิมิตัว (Ms) ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	74
5.27 สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{19}$ และ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11}\text{CoO}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	75

สัญลักษณ์

B	=	สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ
B_r	=	สภาพแม่เหล็กคงค้าง
$(BH)_{\max}$	=	พลังงานสูญเสียภายในแกน
d_{hkl}	=	ระยะห่างระหว่างระนาบ hkl
E	=	พลังงานรวม
e	=	ประจุของอิเล็กตรอน
E_{ex}	=	พลังงาน Exchange
H	=	สนามแม่เหล็กภายนอก
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์มีค่า 6.6261×10^{-34} จูล-วินาที
H_c	=	สนามลบล้างแม่เหล็ก
H_d	=	สนาม Demagnetizing
I	=	กระแสไฟฟ้า
M	=	แมกเนไทเซชัน
M_r	=	ค่าแมกเนไทเซชันคงค้าง
M_s	=	แมกเนไทเซชันอิ่มตัว
m_e	=	มวลของอิเล็กตรอน
q	=	ประจุไฟฟ้า
T	=	อุณหภูมิ
T_c	=	อุณหภูมิคูรี
T_N	=	อุณหภูมิเนล
θ	=	มุมที่รังสีเอกซ์ทำกับระนาบผลึก
λ	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
μ	=	สภาพให้ซึมได้
μ_0	=	สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ
μ_r	=	สภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์
χ_m	=	Magnetic Susceptibility
ω	=	ความถี่เชิงมุม
ϕ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
A/m	=	แอมแปร์ต่อเมตร
A-m ²	=	แอมแปร์ตารางเมตร
BCC	=	body center cubic
emu	=	electron mass unit
emu/cm ³	=	electron mass unit ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
emu/g	=	electron mass unit ต่อกรัม
eV/unit cell	=	อิเล็กตรอน โวลต์ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์
G	=	เกาส์
g/cm ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
H	=	เฮนรี
H/m	=	เฮนรีต่อเมตร
J/m ³	=	จูลต่อลูกบาศก์เมตร
Oe	=	Oersted
Pa	=	พาสคัล
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
T	=	เทสลา
VSM	=	Vibrating Sample Magnetometer
Wb	=	เวเบอร์
Wb/A-m	=	เวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร
Wb/m ²	=	เวเบอร์ต่อตารางเมตร

บทที่ 1

Excusive Summary

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แม่เหล็กเฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเซรามิกส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันจัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมาก แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันของเราอย่างแพร่หลาย เช่น ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น อาทิเช่น ลำโพง โทรศัทพ์ มอเตอร์ อุปกรณ์ไมโครเวฟ ของเด็กเล่น แม่เหล็กติดตู้เย็นหรือติดกระดานไวท์บอร์ด และผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกมากมาย แม่เหล็กเฟอร์ไรต์สามารถแบ่งออกตามสมบัติการใช้งานได้อีก 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชั่วคราว (Soft Ferrite) และ แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ถาวร (Hard Ferrite) สมบัติทางแม่เหล็กที่โดดเด่นของแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชั่วคราวคือ การสร้างสภาวะแม่เหล็ก และทำลายสภาวะแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนแม่เหล็กโลหะ แต่แม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีความต้านทานสูง จึงนิยมใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการความถี่สูง อาทิเช่น แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไมโครเวฟ เพราะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสีย ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ตัวอย่างแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชั่วคราวได้แก่ แมงกานีสซิงก์เฟอร์ไรต์ ($\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$) และนิเกิลซิงก์เฟอร์ไรต์ ($\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$) เป็นต้น ส่วนแม่เหล็กอีกประเภทหนึ่งคือ แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ถาวร สมบัติเด่นของแม่เหล็กประเภทนี้คือเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ยากและหมดสภาพได้ยาก จึงนิยมใช้เป็นแม่เหล็กถาวรในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ มอเตอร์ และเทปแม่เหล็ก ตัวอย่างของแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ถาวร ได้แก่ แบเรียมเฟอร์ไรต์ และสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ การเตรียมเฟอร์ไรต์นั้นสามารถเตรียมได้หลายเช่น วิธี coprecipitation, วิธี glass crystallization, วิธี organic resin, วิธี sol-gel และวิธีทางเซรามิกส์ แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือวิธีทางเซรามิกส์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับงานวิจัยสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ ได้มีงานวิจัยที่ศึกษา $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$, และ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ เป็นต้น ในปัจจุบันการวิจัยและการพัฒนาด้านวัสดุแม่เหล็กในประเทศไทยยังมีค่อนข้างน้อย ในระบบการผลิตเฟอร์ไรต์เป็นความลับทางการค้า และอาศัยเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานบางประเภทที่ต้องการเฟอร์ไรต์ที่มีรูปแบบพิเศษที่แตกต่างจากท้องตลาดทำให้การใช้งานของเฟอร์ไรต์มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดและรูปร่าง ในงานวิจัยนี้มุ่งเพื่อให้ได้เฟอร์ไรต์ที่มีประสิทธิภาพและตรงความต้องการ ในการใช้งานด้านต่างๆ ให้หลากหลายมากขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นปริมาณเหล็กและโคบอลต์ที่เหมาะสมต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยทำการศึกษาที่ระบบ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เพื่อหาสัดส่วน x และ y ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเจือปนทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ที่มีต่อสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์
- 1.2.3 เพื่อหาเงื่อนไขการเตรียมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เฟอร์ไรต์ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่สูง
- 1.2.4 เพื่อศึกษาหาแนวทางในการนำสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์มาประยุกต์ใช้งาน

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.3.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายกลไกการแทนที่ของ La และ Co
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ เช่น อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ การอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เป็นต้น
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลการเจือปนทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ที่มีต่อสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์
- 1.3.4 ตรวจสอบความเป็นผลึกของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เจือด้วยทานัมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ ด้วย XRD
- 1.3.5 วัดและวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของแต่ละเงื่อนไข ด้วย VSM
- 1.3.6 ศึกษาหาปริมาณเหล็กและโคบอลต์ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่มีต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เพื่อหาสัดส่วน x และ y ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน
- 1.3.7 ศึกษาหาแนวทางการนำมาประยุกต์ใช้งาน

แผนงานปีที่ 2

แผนการดำเนินงาน	ปีที่ 2											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. สั่งซื้ออุปกรณ์และสารเคมี	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
2. ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเตรียม สตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่มีประสิทธิภาพ	/	/	/	/	/	/	/	/	/			
3. ออกแบบ/สร้างชุดวัดวงฮิสเทอรีซิส เบื้องต้น	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
4. วัดและวิเคราะห์สมบัติความเป็น แม่เหล็กของแต่ละเงื่อนไข	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
5. ศึกษาหาปริมาณเหล็กและโคบอลต์ ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ ที่มีต่อสมบัติความเป็น แม่เหล็ก										/	/	/
6. เตรียมผลงานเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสาร ต่างประเทศ	/	/	/							/	/	/
7. ศึกษาหาแนวทางการนำมาประยุกต์ใช้ งาน											/	/
8. สรุปรายงานฉบับสมบูรณ์												/

ผลงาน/หัวข้อที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในแต่ละปี

ปีที่ 1 ชื่อเรื่องที่จะตีพิมพ์.....-

ชื่อวารสารที่จะตีพิมพ์.....-

ปีที่ 2 ชื่อเรื่องที่จะตีพิมพ์..... Effect of Cobalt on the Structure and Magnetic Properties of Strontium Ferrites

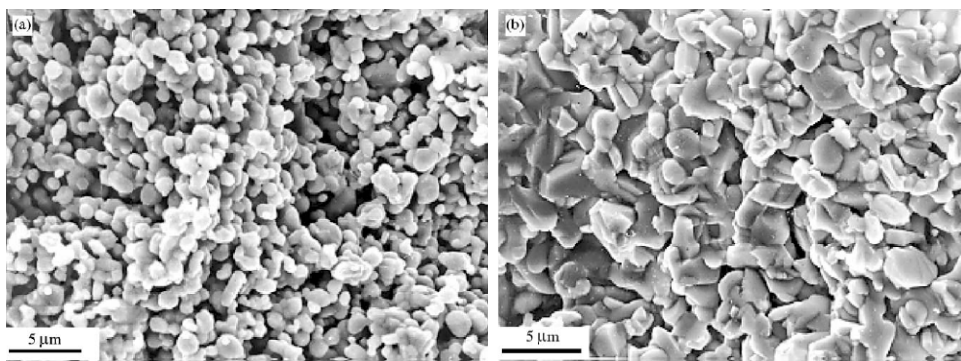
ชื่อวารสารที่จะตีพิมพ์..... Journal of magnetism and magnetic materials*

***Impact factor of this journal: 1.2**

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Puneet Sharma และคณะ (2006) [1] ได้ศึกษาปัจจัยที่จะทำให้ความหนาแน่นของเนื้อสาร ค่า Remanence ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กและพลังงานสูญเสียภายในแกนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ให้เพิ่มมากขึ้น โดยในกระบวนการผลิตแม่เหล็กของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์จะใช้กระบวนการทางเซรามิก ในการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่าง $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SrO}$ เพิ่มขึ้นจาก 5.0 ถึง 6.0 ความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Remanence ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของสารแม่เหล็กซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เวลาในการบดนาน อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่ต่ำจะได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กที่สูง



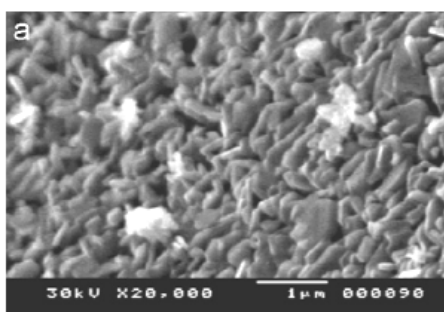
(ก)

(ข)

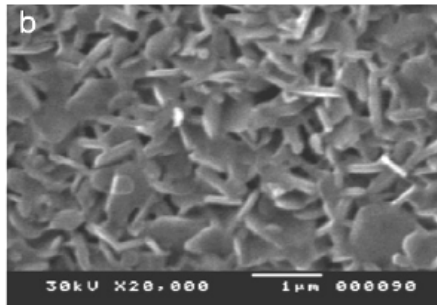
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ส่องบนพื้นผิวของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ (ก) 1200°C และ (ข) 1250°C [1]

Zai-Bing Guo และคณะ(1997) [2] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ด้วยวิธีการ salt-melt method โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผาจาก 500°C ถึง 1300°C และเวลาที่ใช้ในการเผา พบว่าจะเกิดเฟส $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 850°C ส่วนขนาดอนุภาคของสารจะมีขนาด 0.66 ไมโครเมตร เมื่อเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะใหญ่ขึ้นเป็น 1.12 ไมโครเมตร เมื่อเผาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ส่วนสมบัติแม่เหล็กที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาโดยวิธีการนี้ พบว่าได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก 5140 Oe ค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวมีค่า 60.2 emu/g และค่า Remanence มีค่า 33.5 emu/g

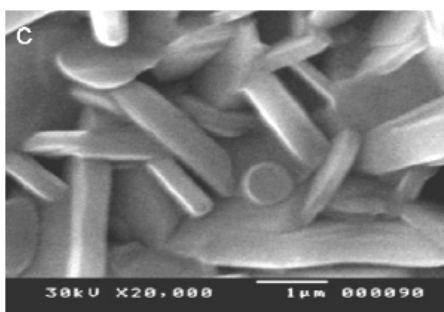
M. M. Hessian และคณะ (2008) [3] ได้ศึกษาการควบคุมสัดส่วน และสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก สตรอนเทียมเฟอร์ไรต์โดยใช้กระบวนการ co-precipitation จากการศึกษพบว่า สารแม่เหล็ก สตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เตรียมได้จะมี $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เฟสเดียว ได้ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดผลิตจาก อัตราส่วนของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ เท่ากับ 9.28 หลังจากเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900-1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากรูปที่ 2.2 แสดงขนาดอนุภาคที่มีอัตราส่วนโมล $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ เท่ากับ 9.23 และมีค่า pH = 10 พบว่า ขนาดอนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่ม pH ของสารตั้ง ต้นจาก 10 ถึง 11.5 ที่อัตราส่วน $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ เท่ากับ 10 ทำให้เกิด $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เฟสเดียวมากขึ้น การเกิด โครงสร้างของผง $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ จะทำให้ค่าอิมิตวาทแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 64.72 ถึง 84.15 emu/g และ intrinsic coercivity 2937-5609 Oe



(ก)



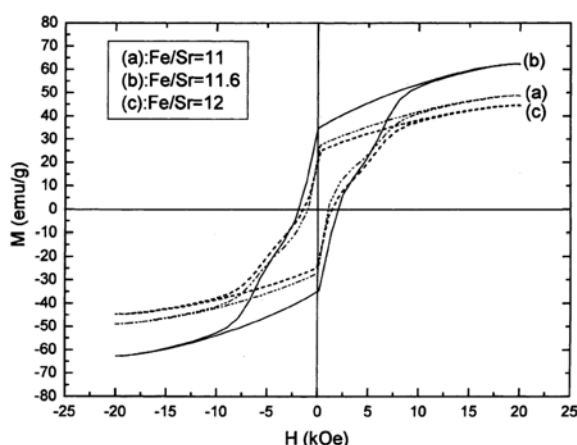
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายจากอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่เป็นลักษณะผง โดยมี อัตราส่วนโมล $\text{Fe}^{3+}/\text{Sr}^{2+}$ เท่ากับ 8 9.23 และ 10 มีค่า pH 10 เมื่อเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิ (ก) 900°C (ข) 1000°C และ (ค) 1100°C [3]

Yen-Pei Fu และ Cheng-Hsiung Lin (2005) [4] ได้ศึกษาสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ microwave-induced combustion โดยศึกษาอัตราส่วนของ Fe/Sr ที่มีค่า 11 ถึง 12 และเผาที่อุณหภูมิจาก 850°C ถึง 1050°C ค่าที่ดีที่สุดของผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนโมลเท่ากับ 11 เมื่อเผาที่ 1000°C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง ได้ค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว 62 emu/g และมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1950 Oe วงฮิสเทอรีซิสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000°C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนโมล (Fe/Sr) เป็น 11 11.6 และ 12 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงฮิสเทอรีซิสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C ใช้เวลาในการเผาซินเตอร์ 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนโมล (Fe/Sr) เป็น 11 11.6 และ 12 [4]

Shahid Hussain และคณะ (2006) [5] ได้ศึกษาผลของการเติม SiO_2 เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางไฟฟ้าของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ โดยใช้วิธีเตรียมแบบ solid state reaction ซึ่งจะผสม SiO_2 ประมาณ 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โครงสร้างที่ศึกษาได้จะพบเฟสหลัก ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนอยู่ในระดับไมครอน โดยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอน ขณะที่เพิ่มซิลิกอนขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า สภาพลบล้างแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเติมซิลิกอนเกินกว่านี้ และเมื่อเพิ่มซิลิกอนจะทำให้ค่า Remanence ลดลง

Shahid Hussain และ A. Magsood (2007) [6] ได้ศึกษาอุณหภูมิซินเตอร์ที่มีผลต่อโครงสร้าง สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางไฟฟ้าของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ผสม Si-Ca โดยจะใช้วิธีการ solid-state reaction โดยจะผสม Si (0.5 wt%) และ Ca (0.5 wt%) ขนาดเกรนเฉลี่ยจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อในการเผาอยู่เป็น 2 ชั่วโมง และสำหรับสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ทั้งที่ไม่ผสม Si และ Ca และ

ผสม ความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Vicker hardness เพิ่มขึ้นจาก 512 ถึง 702 H_v ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) สูงที่สุดเมื่อเวลาในการเผาเป็น 2 ชั่วโมง มีค่าเป็น 4255 Oe และค่า Remanence จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเจือ Si และ Ca ซึ่งเพิ่มจาก 516 ถึง 529 เกาส์ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $2.89 \times 10^8 \Omega\text{-cm}$ เมื่อเวลาในการเผาซินเตอร์เป็น 8 ชั่วโมง

Frank Kool และคณะ (2002) [7] ศึกษาผลของการเติม La และ Co ลงในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ตามสูตร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ซึ่งจะเพิ่มค่าสมบัติแม่เหล็กเมื่อ x มีค่าน้อยๆ เมื่อ x มีค่ามากกว่า 0.25 สมบัติแม่เหล็กจะมีค่าต่ำลง Frank Kool และคณะ ได้ศึกษา 1) การขยายตัวของเกรน เทียบกับอุณหภูมิการเผา 2) อันตรกิริยาของการเผา calcination 3) เปรียบเทียบสมบัติของสารประกอบแบเรียมเฟอร์ไรต์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ ผลที่ศึกษาได้คือ การยับยั้งการลดลงของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจากการเพิ่มขนาดเกรนที่มาจากเฟสเกินของ Co โดยการเพิ่มซิลิกอนเพื่อลดการขยายของเกรน ผลของ La/Co จะทำให้ความเป็นเหลี่ยมของวงฮิสเทอรีซิสลดลงเมื่อ $x > 0.25$

Jean-Marie Le Breton (2004) [8] ศึกษาโครงสร้างของผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์โดยวิธี co-precipitated ผง $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0 - 0.4$) ใช้ Mössbauer spectrometry และ x-ray diffraction ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ x มากขึ้นเรื่อยๆ ผงของสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์มีเฟสอื่นปนอยู่นั้นคือเฟส $(\text{La,Sr})(\text{Fe,Co})\text{O}_{3.8}$ และเฟส $(\text{Co,Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$ เพิ่มขึ้นมา ผลของการวัด Mössbauer พบว่า La^{3+} และ Co^{2+} จะไปแทนที่ Sr^{2+} และ Fe^{3+} ในตำแหน่ง 2b ตามลำดับ

Xiansong Liu และคณะ (2006) [9] ได้ศึกษาผลของการเติม La^{3+} และ Co^{2+} ลงในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์เป็นไปตามสูตร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0 - 0.25$) เตรียมโดยกระบวนการทางเซรามิก ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มของ La^{3+} และ Co^{2+} จะไปเพิ่มค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวเมื่อเพิ่มค่า x มีผลทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และพบว่าค่า Remanence (Br) ไม่ได้ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวน La^{3+} และ Co^{2+}

ตารางที่ 2.1 สมบัติแม่เหล็กในงานวิจัยที่ผ่านมาของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์

กระบวนการ	เจือ	Hc		Ms (emu/g)	Mr (emu/g)	Br	
		kA/m	Oe			mT	Gauss
Ceramic [1]	-	230	-	-	-	-	-
Salt-melt [2]	-	-	5180	73	39	270	-
co-precipitation [3]	-	-	5607	84	45	-	-
Microwave induced combution [4]	-	-	4600	68	-	-	-
Solid state reaction [5]	-	-	4900	-	-	-	900
Ceramic [9]	La - Co	400	-	73	-	388	
Sol - gel [10]	-	-	4783	57	-	-	-
Ceramic [11]	La	-	4800	70	-	-	-

บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมี

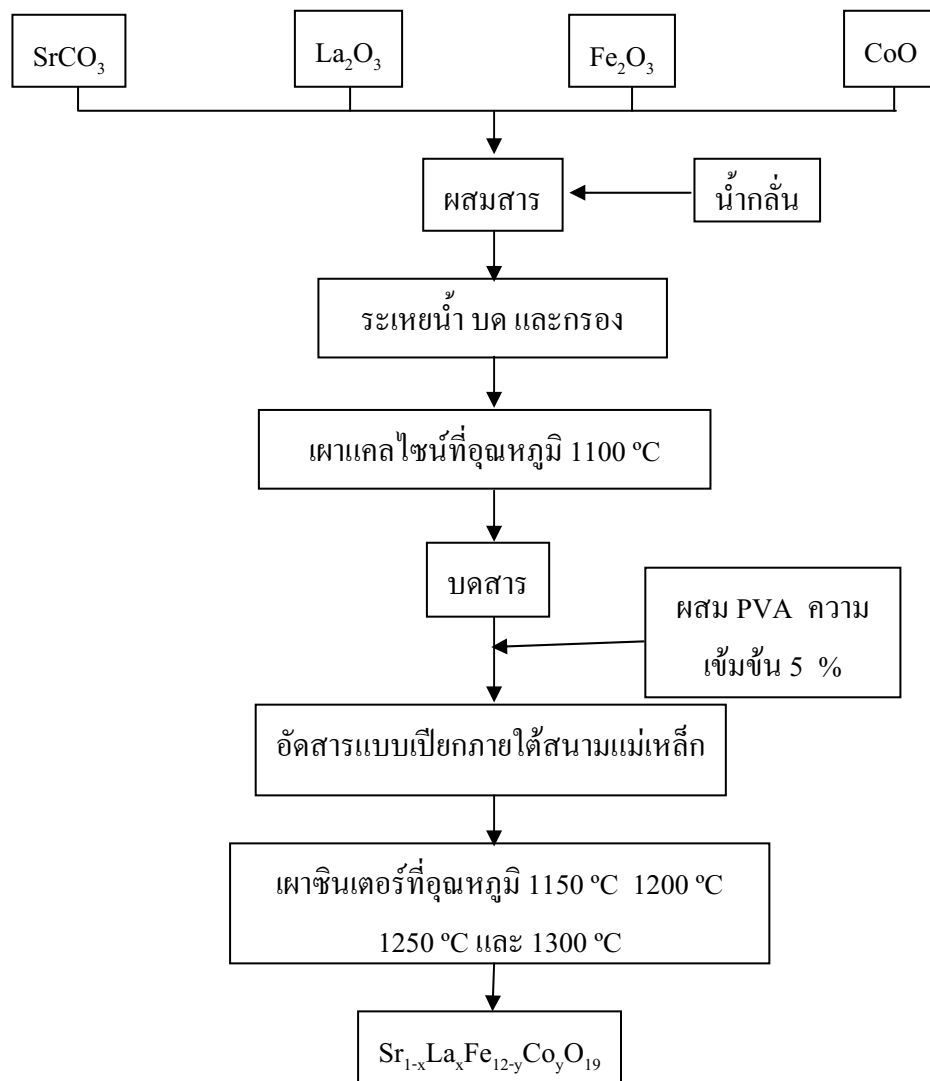
- 1) สตรอนเทียมคาร์บอเนต SrCO_3 99.9% (Aldrich)
- 2) เหล็กออกไซด์ Fe_2O_3 99% (Sigma-Aldrich)
- 3) โคบอลต์ออกไซด์ CoO -325 MESH (Aldrich)
- 4) แลนทานัมออกไซด์ La_2O_3 99.99% (Sigma-Aldrich)
- 5) Polyvinyl alcohol (PVA)
- 6) น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง

- 1) ช้อนตักสารและปิเกตอร์
- 2) เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius
- 3) เครื่องบดสาร ยี่ห้อ SPEX Certiprep รุ่น 8000-D Mixer MILL
- 4) เตาแผ่นความร้อน (hot plate)
- 5) เตาเผาสาร ยี่ห้อ CARBOLITE
- 6) เครื่องอัดสารภายใต้สนามแม่เหล็ก
- 7) เครื่องขัดชิ้นงานตัวอย่าง
- 8) เครื่องอัลตราโซนิก
- 9) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII
- 10) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP
- 11) เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407
- 12) ครอบบดสาร
- 13) ผ้ากรอง ขนาดประมาณ 5 ไมครอน
- 14) ถ้วยเพาะอะลูมินา
- 15) บล็อกอัดเม็ดสาร

3.3 วิธีการทดลอง

การเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ด้วยกระบวนการทางเซรามิกส์ เพื่อศึกษาผลของการเจือปนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ โดยที่ $x = 0$ และ 0.2 ส่วน $y = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8$ และ 1.0 และผลของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่มีผลต่อโครงสร้าง และสภาพแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์มีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.1



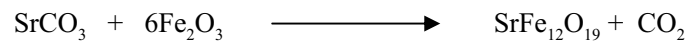
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์

3.4 การเตรียมสาร

ขั้นตอนการผสมสาร โดยจะคำนวณน้ำหนักของสารตั้งต้นแต่ละชนิด และนำมาผสมกันตามสูตรที่ต้องการ

ตัวอย่าง 1 การคำนวณส่วนผสมของ SrCO_3 (147.63 g/mol) และ Fe_2O_3 (159.69 g/mol) ตามสูตร $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (1,061.77 g/mol) โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม (เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องบดสาร)

จากการคำนวณสัดส่วนโมล



$$\text{ต้องการ SrFe}_{12}\text{O}_{19} \text{ 10 กรัม จะได้ SrFe}_{12}\text{O}_{19} = \frac{10\text{g}}{1061.77\text{g/mol}} = 0.0094 \text{ mol}$$

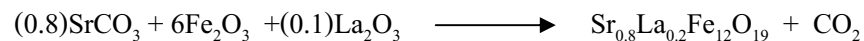
ดังนั้นต้องใช้

$$\text{SrCO}_3 = 0.0094 \times 1 \text{ mol} \times 147.63 \text{ g/mol} = 1.3877 \text{ g}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.0094 \times 6 \text{ mol} \times 159.69 \text{ g/mol} = 9.0065 \text{ g}$$

ตัวอย่าง 2 การคำนวณส่วนผสมของ SrCO_3 , Fe_2O_3 และ La_2O_3 (325.82 g/mol) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามสูตร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อ $x = 0.2$ โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม

จากการคำนวณสัดส่วนโมล



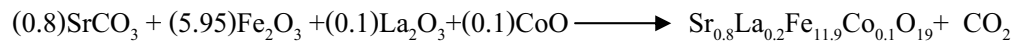
ดังนั้นต้องใช้

$$\text{SrCO}_3 = 0.0094 \times 0.8 \text{ mol} \times 147.63 \text{ g/mol} = 1.1102 \text{ g}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.0094 \times 6 \text{ mol} \times 159.69 \text{ g/mol} = 9.0065 \text{ g}$$

$$\text{La}_2\text{O}_3 = 0.0094 \times 0.1 \text{ mol} \times 325.82 \text{ g/mol} = 0.3063 \text{ g}$$

ตัวอย่าง 3 การคำนวณส่วนผสมของ SrCO_3 Fe_2O_3 La_2O_3 และ CoO (74.93 g/mol) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามสูตร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อ $x = 0.2$ ส่วน $y = 0.1$ โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม



ดังนั้นต้องใช้

$$\text{SrCO}_3 = 0.0094 \times 0.8 \text{ mol} \times 147.63 \text{ g/mol} = 1.1102 \text{ g}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.0094 \times 5.95 \text{ mol} \times 159.69 \text{ g/mol} = 8.9315 \text{ g}$$

$$\text{La}_2\text{O}_3 = 0.0094 \times 0.1 \text{ mol} \times 325.82 \text{ g/mol} = 0.3063 \text{ g}$$

$$\text{CoO} = 0.0094 \times 0.1 \text{ mol} \times 74.93 \text{ g/mol} = 0.0704 \text{ g}$$

รายละเอียดปริมาณส่วนผสมของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมของสารที่ใช้เตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในอัตราส่วนต่างๆ

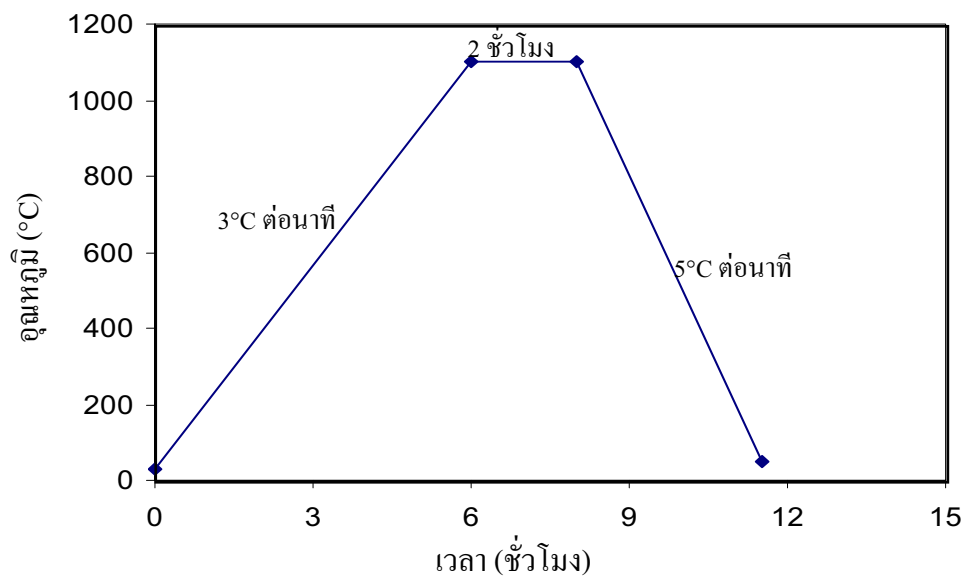
สูตรของสาร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$		ปริมาณสารที่ใช้ (กรัม)			
x	y	SrCO_3	Fe_2O_3	La_2O_3	CoO
0	0	1.3877	9.0065	-	-
0.2	0	1.1102	9.0065	0.3063	-
0.2	0.1	1.1102	8.9315	0.3063	0.0704
0.2	0.2	1.1102	8.8564	0.3063	0.1409
0.2	0.3	1.1102	8.7814	0.3063	0.2113
0.2	0.4	1.1102	8.7063	0.3063	0.2817
0.2	0.5	1.1102	8.6313	0.3063	0.3522
0.2	0.8	1.1102	8.4061	0.3063	0.5635
0.2	1.0	1.1102	8.2560	0.3063	0.7043

เมื่อคำนวณปริมาณที่ต้องใช้แล้ว จากนั้นจะนำสารที่ได้รับการชั่งน้ำหนักแล้วมาผสมกัน ลงใน ครอบผสมสาร แล้วนำไปเข้าเครื่องบดสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.1 การเผาแคลไซน์ (Calcination)

เมื่อผสมสารในเครื่องบดสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีน้ำตาล แดง จากนั้นนำไประเหยด้วยเตาแผ่นความร้อนอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สารที่ได้จะแห้งแต่ ยังจับตัวเป็นก้อนดังนั้นต้องนำไปบดด้วยครกบดให้ละเอียด แล้วนำไปกรองด้วยผ้ากรองขนาดของรู ประมาณ 5 ไมครอน ผงที่ได้จากการกรองจะนำไปสู่ขั้นตอนเผาแคลไซน์

การเผาแคลไซน์เป็นกรรมวิธีการใช้ความร้อนสูงแต่ยังไม่ถึงอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ในการทดลองนี้ จะใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในถ้วยเผาที่ทำจากอลูมินา โดยให้อัตรา การเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 3°C ต่อนาที และอัตราการลดลงของอุณหภูมิเป็น 5°C ต่อนาที ดังแสดงใน รูปที่ 3.2

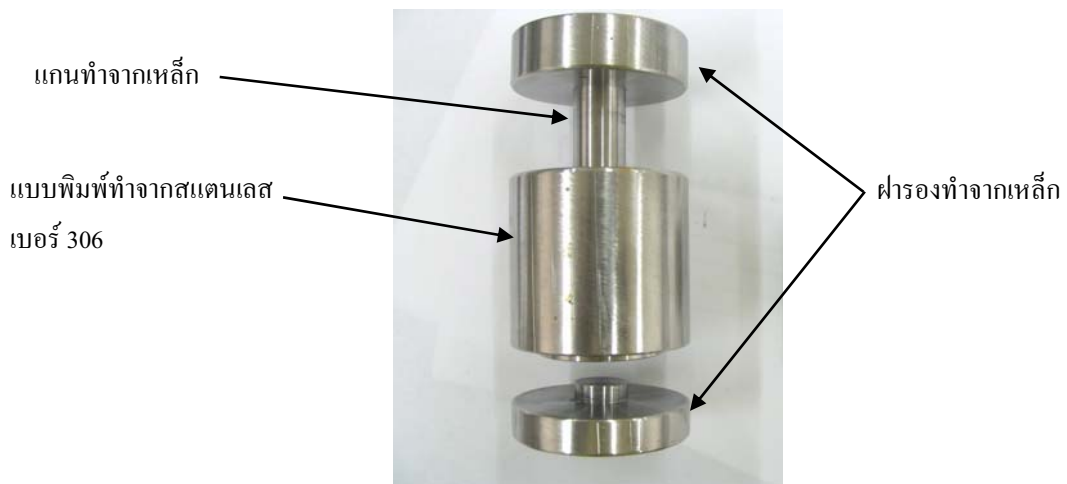


รูปที่ 3.2 อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาแคลไซน์

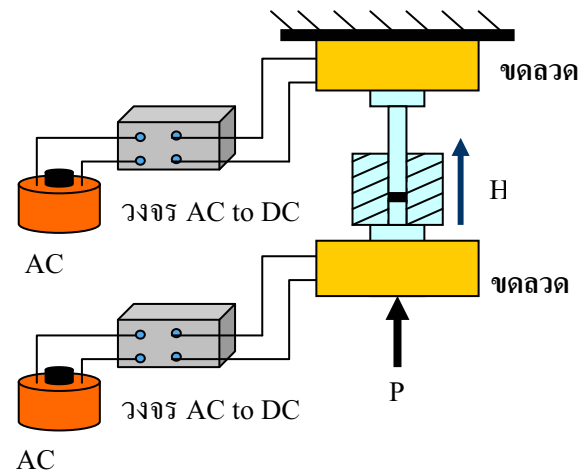
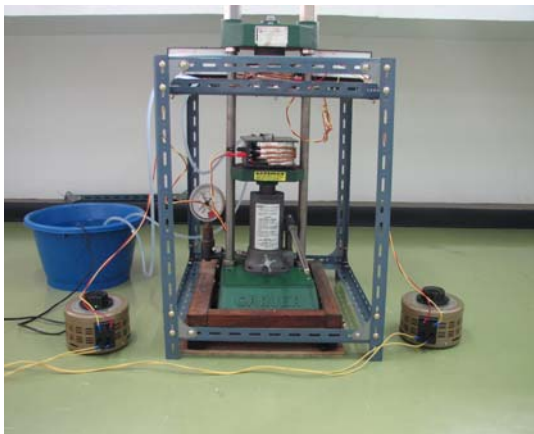
3.4.2 การอัดขึ้นรูป

ผงที่ได้จากการเผาแคลไซน์จะถูกนำมาบดอีกครั้งด้วยครกบดเพื่อให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กจากนั้นจะนำสารที่บดแล้วข้างต้นไปสู่ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปต่อไป

ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเป็นการเพิ่มแรงยึดเกาะของอะตอมของสารที่อยู่ลักษณะเป็นผงให้สามารถจับตัวกันอยู่เป็นรูปทรง ในการทดลองนี้ต้องการอัดขึ้นรูปสารให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายเม็ดยา โดยในการทดลองต้องการจัดให้แกน easy ขึ้นในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในการอัดขึ้นรูปสารต้องใช้กระบวนการอัดแบบเปียกภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกจะนำสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์และนำมาบดแล้วมาผสมกับ PVA ความเข้มข้น 5% โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 25-32% ของน้ำหนักของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์บดให้เข้ากัน จากนั้นจะนำสารที่ได้มาเทใส่แม่แบบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ดังในรูปที่ 3.3 ขั้นตอนต่อมาจะนำแม่แบบมาอัดภายใต้สนามแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำให้สารแม่เหล็กมีทิศทางของแกน easy ทิศทางเดียวกัน โดยจะให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ระหว่างแม่แบบดังรูปที่ 3.4 ขดลวดทั้งสองนี้จะมีแกนเหล็กตรงกลางขดลวดทำให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กขนาดความเข้ม 1.3 เทสลา ส่วนการอัดจะใช้แรงดันในการอัดขนาดประมาณ 1 เมตริกตัน



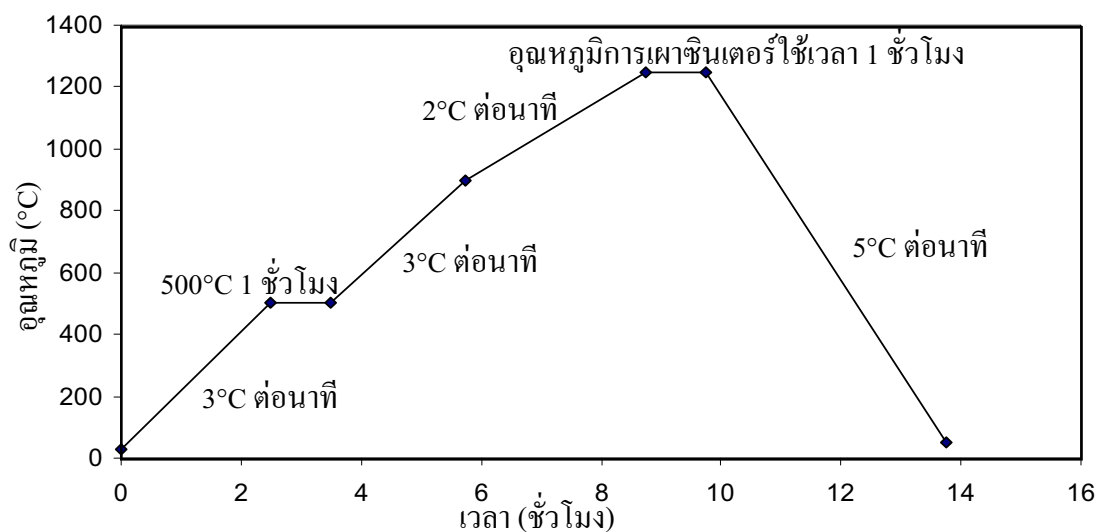
รูปที่ 3.3 แม่แบบในการอัดขึ้นรูปของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่มีขดลวดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน

3.4.3 การเผาซินเตอร์

การเผาซินเตอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบและชิดกันมากขึ้น แต่ไม่เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกัน ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ความร้อนกับสารที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปจะสามารถคงรูป ซึ่งทำให้อยู่ในลักษณะเม็ดสารดังกล่าวอย่างแข็งแรง กล่าวคือ เมื่อให้อุณหภูมิสูงกับเม็ดสารตัวอย่างจะกระตุ้นให้อะตอมต่างๆ เกิดการแพร่เข้าหากัน ทำให้จุดสัมผัสที่ผิวของแต่ละอะตอมมีพื้นที่มากขึ้น เข้าใกล้กันมากขึ้น เม็ดสารที่ได้จากการอัด (Green body) จะถูกวางในถ้วยเผาทำจากอลูมินาแล้วนำเข้าเตาเผาเพื่อนำไปเผาในขั้นตอนการเผาซินเตอร์ สำหรับการเผาซินเตอร์ในการทดลองนี้จะทำการเผาที่ อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250 °C และ 1300°C ในอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งในการเผาซินเตอร์จะใช้อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาซินเตอร์

ในรูปที่ 3.5 ขั้นแรกจะเพิ่มอุณหภูมิเตาจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 500°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา 3°C ต่อนาที จากนั้นจะคงอุณหภูมิไว้ที่ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อเผาไล่ PVA ต่อมาจะเพิ่มอุณหภูมิเตาจนถึงอุณหภูมิ 900°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา 3°C ต่อนาที จากนั้นเพื่อทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของเตากับโปรแกรมที่ตั้งไว้ตรงกันมากที่สุด การเพิ่มจากอุณหภูมิ 900°C ถึงอุณหภูมิซินเตอร์จึงใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 2°C ต่อนาที จากนั้นจะคงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิซินเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการลดอุณหภูมิการเผาเป็น 5°C ต่อนาที

3.5 การทดสอบตัวอย่าง

เม็ดยาที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วจะนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ คือ วัดความหนาแน่น ศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) วัดขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM)

3.5.1 การวัดความหนาแน่น

เม็ดยาที่ได้จากการเผาซินเตอร์จะถูกนำมาขัดให้เม็ดยามีความเรียบ จากนั้นนำเม็ดยาที่ขัดเสร็จไปล้างโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก และนำสารที่ได้ไปต้มภายใต้อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกในรูพรุนภายในเม็ดยา จากนั้นนำ เม็ดยาที่ต้มแล้วไปชั่งด้วยวิธีการชั่งในน้ำ จะได้น้ำหนักของสารที่ชั่งในน้ำ $W(l)$ จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เพื่อไล่น้ำออกจากภายในเม็ดยาเสร็จแล้วนำเม็ดยาที่ผ่าน การอบไปชั่งได้น้ำหนักของสารที่ชั่งในอากาศ $W(a)$ และนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้มาหาความหนาแน่นของเม็ดยา จากหลักการของอะคิมิดีสที่กล่าวว่า “ของแข็งที่จุ่มลงในของเหลวจะมีแรงของการลอยตัว (G) กระทำ ซึ่งแรงลอยตัวนี้จะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยของแข็งนั้น โดยปริมาตรของของแข็งที่จุ่มลงในของเหลว $V(s)$ จะเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่ $V(l)$ ”

$$\text{ความหนาแน่นหาได้จาก} \quad \rho = \frac{M(g)}{V(\text{cm}^3)} \quad (3.1)$$

เมื่อ M คือ มวลของของแข็ง มีหน่วยเป็นกรัม (g)

V คือ ปริมาตรของของแข็ง มีหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

ในการหาความหนาแน่นต้องทราบตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- 1) น้ำหนักที่อ่านค่าได้ในเครื่องชั่งของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ $W(a)$
- 2) แรงลอยตัวของของแข็งในของเหลว G โดยที่ $G = W(a) - W(f)$ เมื่อ $W(a)$ คือ น้ำหนัก ที่อ่านค่าได้ในเครื่องชั่งของของแข็งที่ถูกชั่งในอากาศ และ $W(f)$ คือ น้ำหนักที่อ่านค่าได้ในเครื่องชั่งของของแข็งที่ถูกชั่งในของเหลว

ความหนาแน่นของของแข็งในที่ถูกชั่งในอากาศ (ρ) หาได้จาก

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{W(a)}{V(s)g} = \frac{W(a)}{V(f)g} \quad (3.2)$$

เมื่อ $V(s)$ คือปริมาตรของวัตถุ

$V(f)$ คือปริมาตรของของเหลว

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ถ้ารู้ความหนาแน่นของของเหลว $\rho(f)$

$$V(f) = \frac{M(f)}{\rho(f)} \quad (3.3)$$

เนื่องจากแรงลอยตัวหาได้จาก

$$G = \rho V g \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) จะได้สมการ

$$V(f) = \frac{G}{\rho(f)g} \quad (3.5)$$

เมื่อ $M = \rho V$

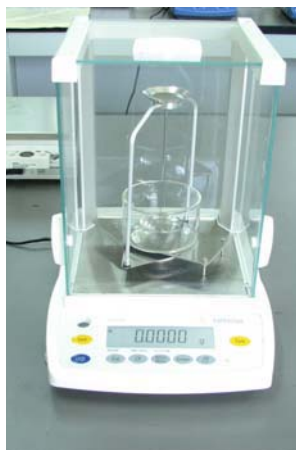
นำสมการ (3.5) แทนในสมการที่ (3.2)

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(f)}{G} \quad (3.6)$$

จะได้

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(f)}{W(a) - W(f)} \quad (3.7)$$

สมการที่ (3.7) เป็นสมการที่จะนำไปใช้หาความหนาแน่นของสารต่อไป



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งความละเอียดชนิด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius

3.5.2 การศึกษาโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิควิเคราะห์วัสดุพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยจะใช้เครื่องดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Rigaku การนำไปทดสอบจะต้องนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วไปจัดให้ผิวเรียบก่อนที่จะนำไปวัด ข้อมูลที่ได้จากเครื่องดิฟแฟร็กโทมิเตอร์จะถูกบันทึกเป็นกราฟระหว่างมุม 2θ กับจำนวนสัญญาณที่เครื่องตรวจนับสัญญาณนับได้ในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากได้ข้อมูลจากดิฟแฟร็กโทมิเตอร์แล้ว จะนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เพื่อนำมาเปรียบเทียบโครงสร้างต่อไป ในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII

3.5.3 การหาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM การถ่ายภาพด้วย SEM วัสดุที่จะนำไปทดสอบต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า สารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ตัวอย่างมีความเป็นฉนวน ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ต้องนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองด้วยวิธีสปัตเตอริง เมื่อผ่านการถ่ายภาพที่กำลังขยายต่างๆ ต่อจากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นในปัจจัยการสังเคราะห์ต่างๆ



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP

3.5.4 การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM)

การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะแสดงในรูปวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอก (H) กับแมกเนไทเซชัน (M) เนื่องจากการวัดด้วย VSM มีข้อจำกัดในการเตรียมชิ้นสารนั้นคือสารที่จะวัดต้องมีลักษณะเป็นผง หรือถ้าต้องการวัดสภาพแม่เหล็กของตัวอย่างที่เป็นเม็ด ขนาดของเม็ดต้องมีขนาดเล็ก ขนาดโดยประมาณ คือ กว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร โดยในการวัดสภาพแม่เหล็กจะให้สนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization) สภาพแม่เหล็กคงค้าง (remanence) ค่าสภาพลบถ่วงแม่เหล็ก และรูปร่างของวงฮิสเทอรีซิส ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407 ดังแสดงรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407

บทที่ 4

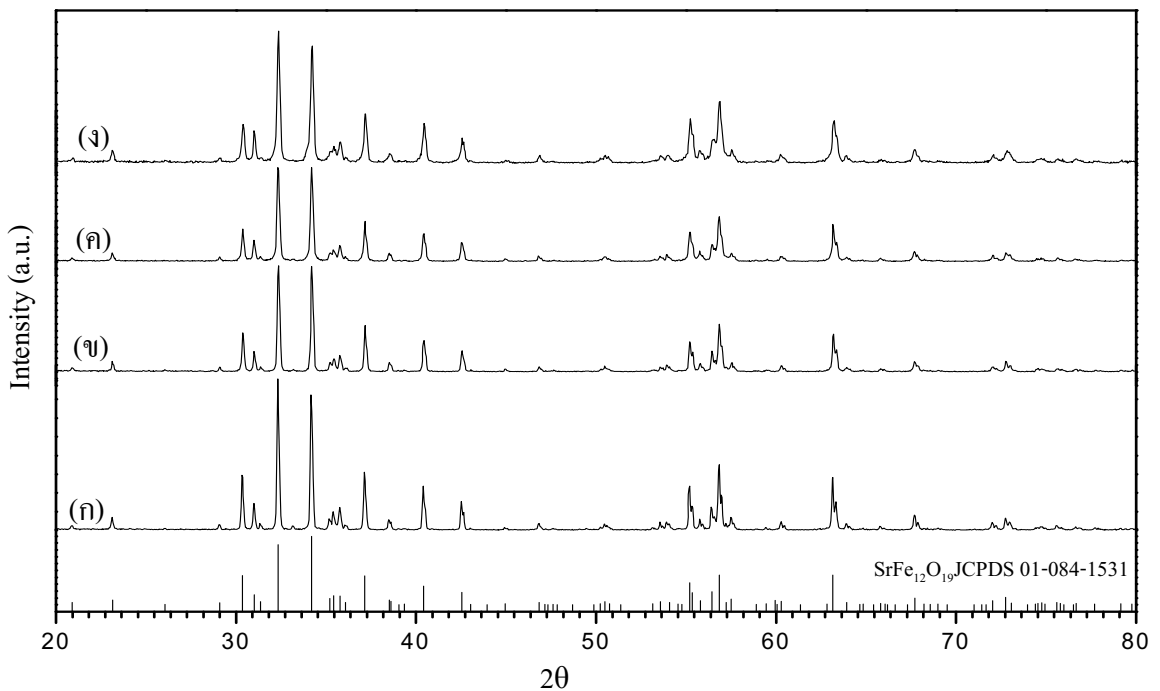
ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดลองของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ผลของการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ผลการทดลองของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ผลของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ และผลการของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน โดยผลที่ได้จะแสดงในผลการทดลองจากเครื่อง XRD SEM VSM และความหนาแน่น

4.1 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจาก XRD

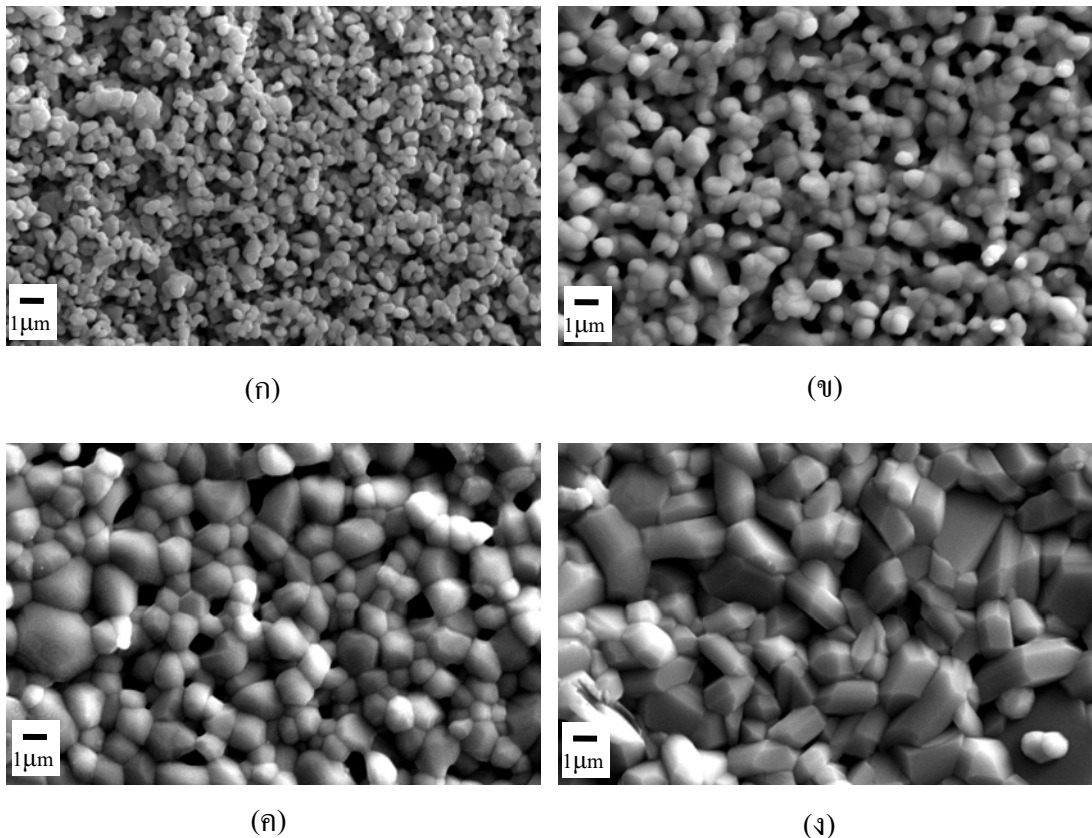
การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ทำให้ทราบว่าสารแม่เหล็กที่เตรียมได้เป็นสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.2 ผลการวัดขนาดเกรน

การศึกษาขนาดเกรนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเพอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C และ 1250°C ลักษณะเกรนจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ส่วนอุณหภูมิ 1300°C เกรนจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.3 ผลการวัดความหนาแน่น

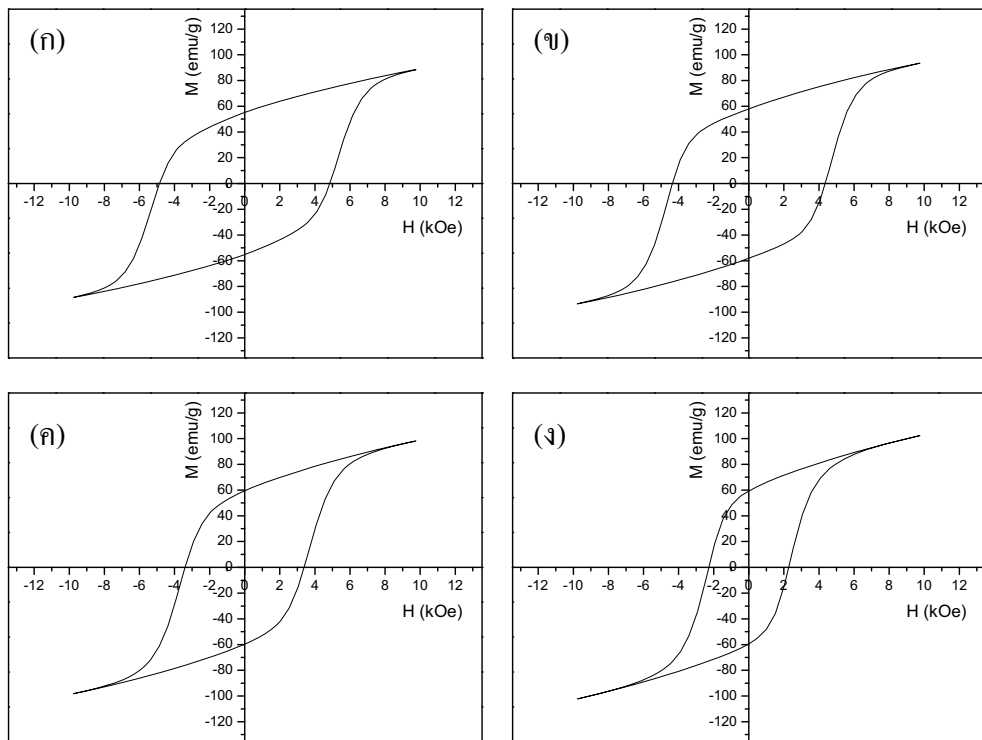
ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1200°C จะมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1300°C จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (°C)	การหดตัวตามแนวรัศมี (%)	มวลชั่งในอากาศ (g)	มวลชั่งในน้ำ (g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
S1	1150	2.86	0.2891	0.2319	5.03
S2	1200	1.97	0.3754	0.3026	5.14
S3	1250	12.81	0.4450	0.3576	5.07
S4	1300	18.72	0.3871	0.3063	4.77

4.1.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก

ผลการศึกษาวงฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าสภาพลบข้างแม่เหล็ก จะลดลง ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.3

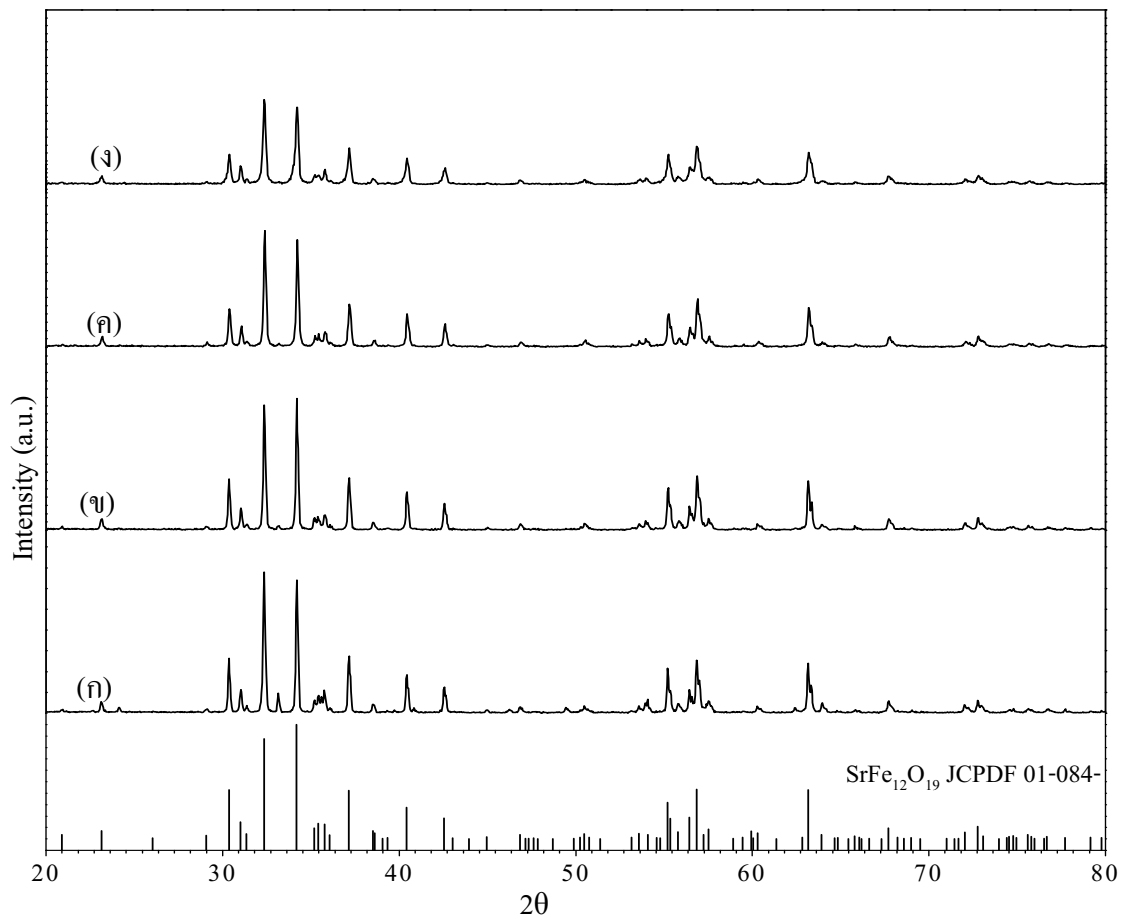


รูปที่ 4.3 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD

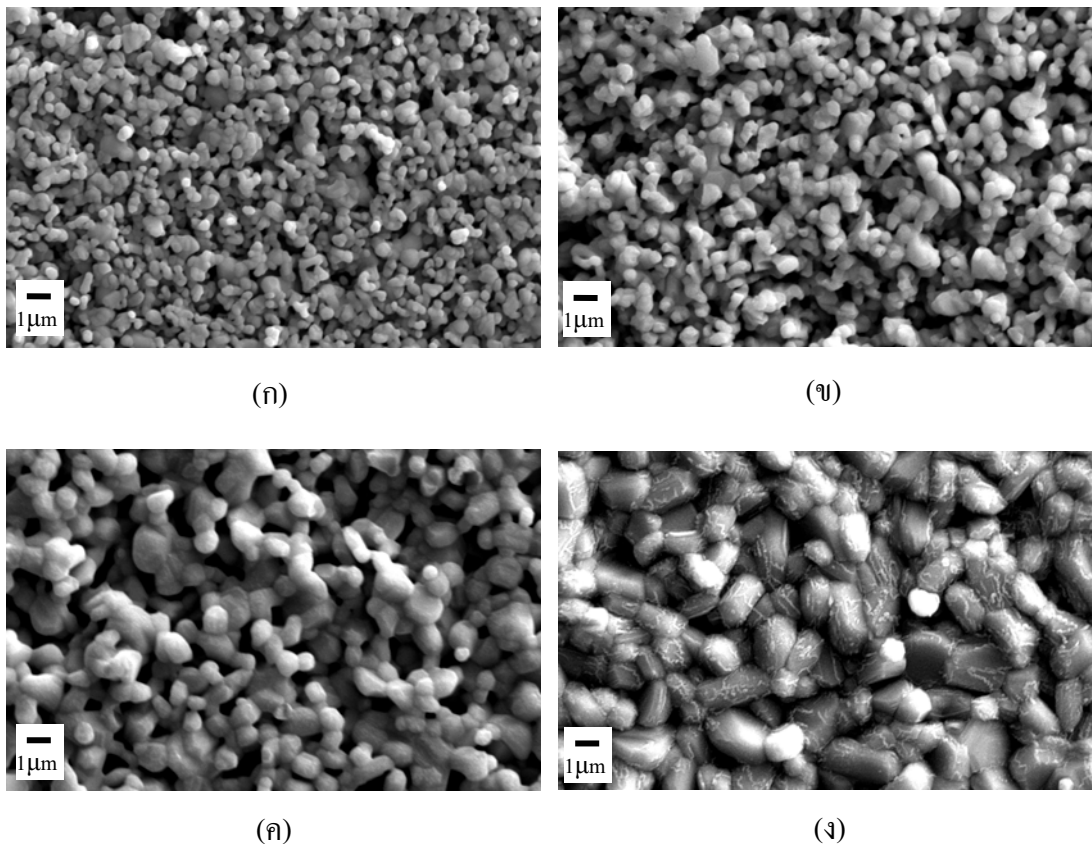
การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัม ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$) ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าความเข้มจะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ทำให้ทราบว่าสารแม่เหล็กที่เตรียมได้เป็นสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.2 ผลการวัดขนาดเกรน

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์เมื่อเจือปนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 1150°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลมสำหรับอุณหภูมิการเผา 1200°C และ 1250°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิการเผา 1300°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.3 ผลการวัดความหนาแน่น

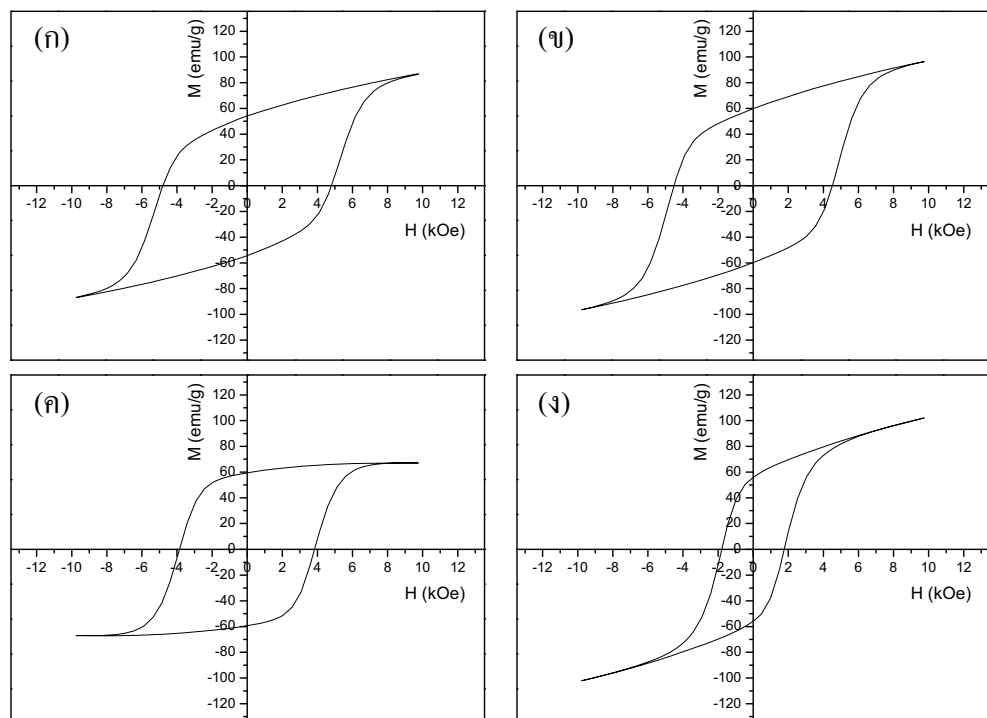
ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1150°C จะมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1300°C จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (°C)	การหดตัวตามแนวรัศมี (%)	มวลที่ชั่งในอากาศ (g)	มวลที่ชั่งในน้ำ (g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
SL1	1150°C	3.25	0.2951	0.2378	5.13
SL2	1200°C	5.42	0.3646	0.2918	4.99
SL3	1250°C	11.63	0.3890	0.3116	5.00
SL4	1300°C	18.82	0.4783	0.3790	4.80

4.2.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก

ผลการศึกษาวงฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพลบถ่วงแม่เหล็ก จะลดลง สำหรับค่า สภาพแม่เหล็กคงค้างจะใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะสูงขึ้น เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาจาก 1150°C เป็น 1200°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 1250°C พบว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าลดลง และรูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสจะลักษณะเป็นมุมมากขึ้น และถ้าอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1300°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ส่วนรูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสจะมีลักษณะเป็นมุมลดลง ดังรูปที่ 4.6

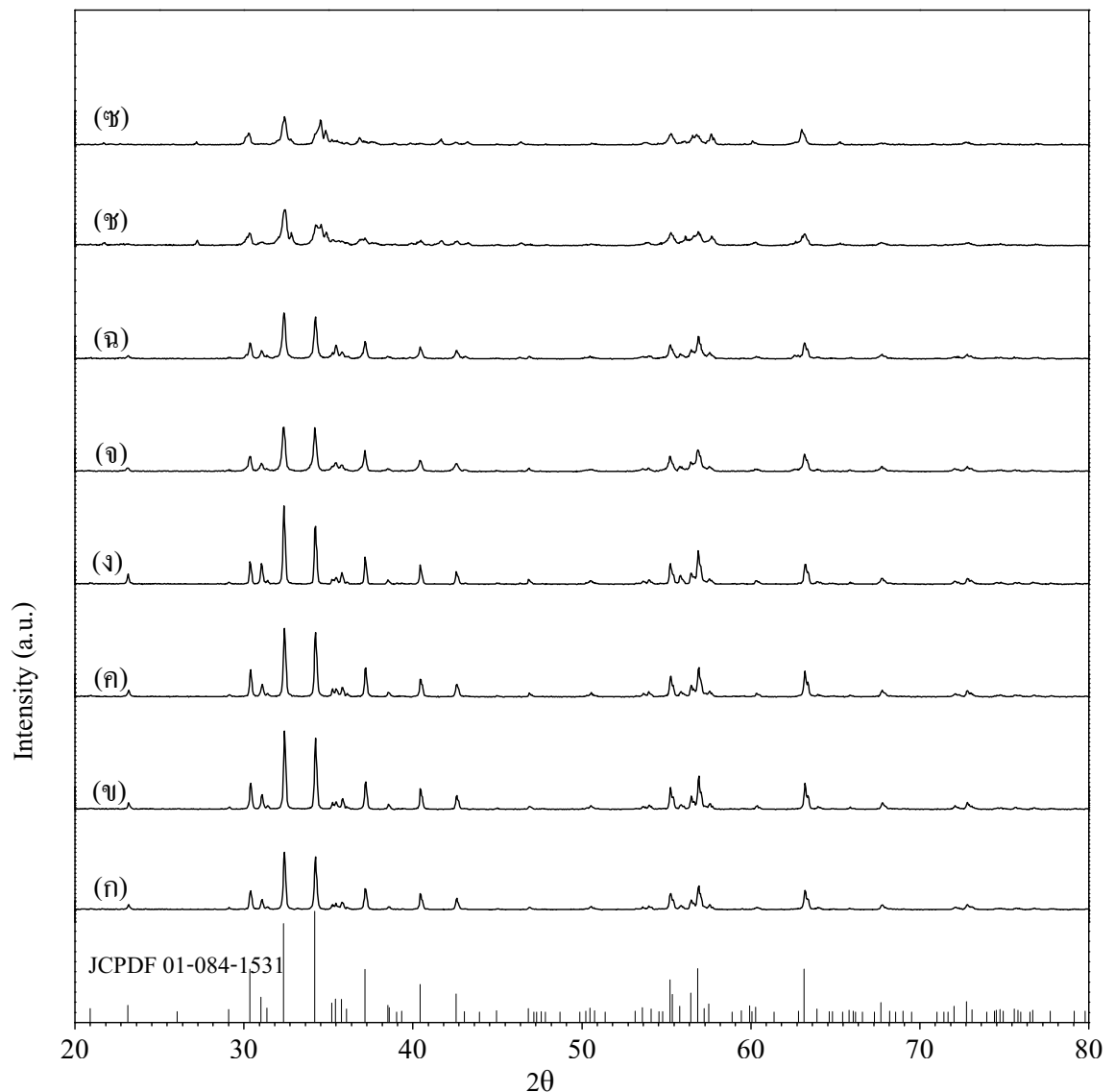


รูปที่ 4.6 วงฮิสเทอรีซิสของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์

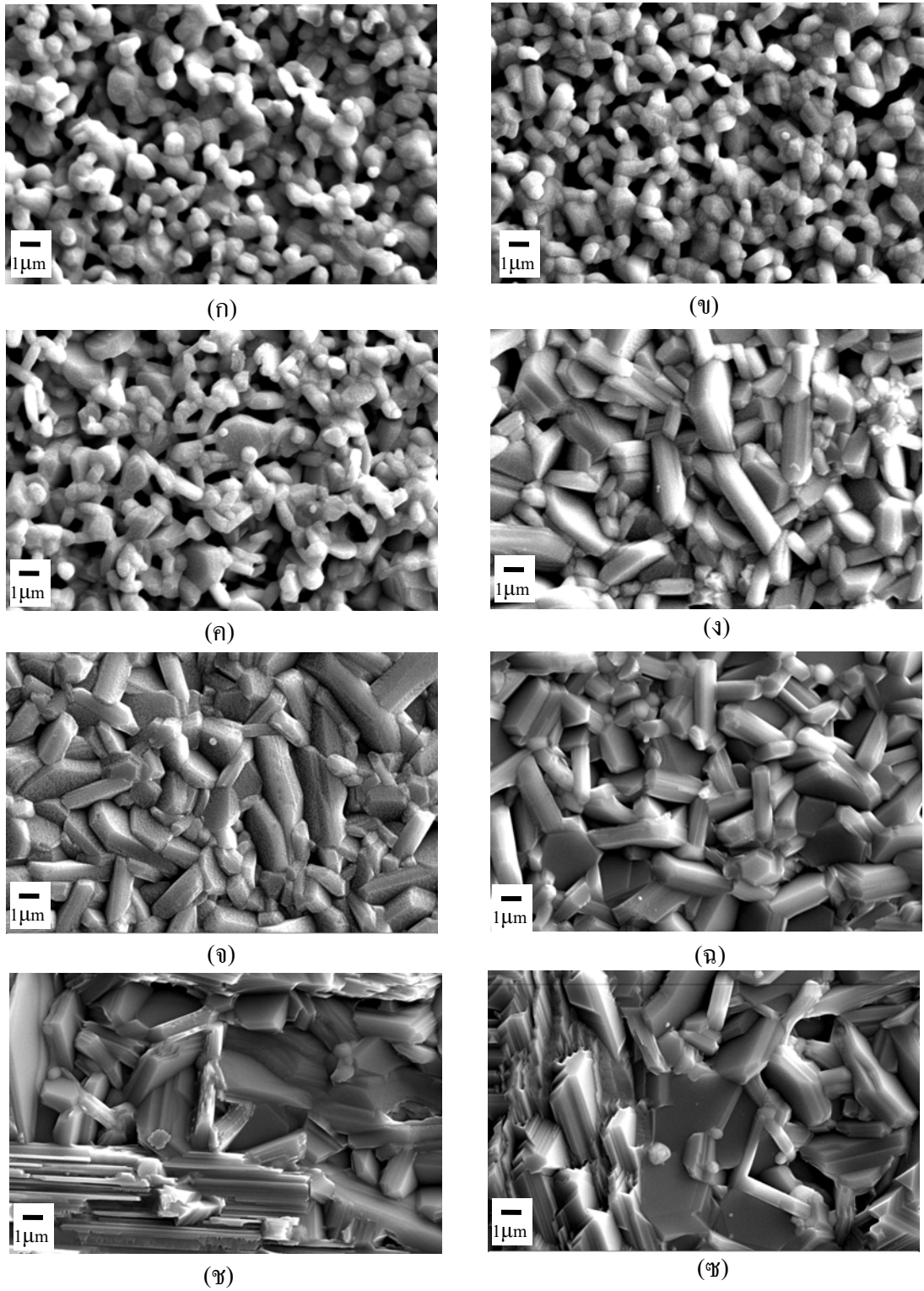
4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD

การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$) โดยที่ $y = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8$ และ 1.0 ผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อ y มีค่า (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0

4.3.2 ผลการวัดขนาดเกรน



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยที่ y มีค่าเท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ฮ) 1.0

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ ($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$) เมื่อ $y = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8$ และ 1.0 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อปริมาณโคบอลต์มากขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกรนจะมีลักษณะที่เป็นแท่งและเป็นแผ่นเมื่อปริมาณโคบอลต์ $y = 0.2$ และถ้า $y = 0.3, 0.4$ และ 0.5 พบว่าเกรนที่มีลักษณะที่เป็นแท่งและเป็นแผ่นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้น และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 พบว่า $y = 0.8$ และ 1.0 เกรนที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น และมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนเกรนที่มีลักษณะเป็นแท่งจะลดลง

4.3.3 ผลการวัดความหนาแน่น

ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่ปริมาณการเจือโคบอลต์และแลนทานัมต่างกัน พบว่าที่ปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ไม่เกิน 0.2 ความหนาแน่นจะมีค่าประมาณ 5.0 g/cm^3 เมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น $y = 0.3, 0.4$ และ 0.5 พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเฉลี่ยลดลงเป็น 4.8 g/cm^3 และเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น $y = 0.8$ และ 1.0 ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งประมาณ 5.0 g/cm^3 ที่ใกล้เคียงกับสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่ได้เจือด้วยโคบอลต์ (SL3) ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวตามแนวรัศมีและความหนาแน่นของ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	y	การหดตัวตามแนวรัศมี (%)	มวลชั่งในอากาศ (g)	มวลชั่งในน้ำ (g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
SL3	0	11.63	0.3890	0.3116	5.00
SLC3-01	0.1	9.66	0.3891	0.3120	5.02
SLC3-02	0.2	9.56	0.3835	0.3073	5.01
SLC3-03	0.3	17.54	0.5090	0.4020	4.74
SLC3-04	0.4	18.72	0.5333	0.4234	4.83
SLC3-05	0.5	18.23	0.4893	0.3869	4.76
SLC3-08	0.8	18.52	0.5228	0.4180	4.97
SLC3-10	1.0	18.13	0.5086	0.4071	4.99