รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยการเจือด้วยแลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์

Preparation of Strontium Ferrites Doped with Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide

โดย ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย

นายโกเมน ปาปะโถ

ศ. ดร. ทวี ตันฑศิริ

พฤษภาคม 2553

สัญญาเลขที่ MRG5180113

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยการเจือด้วย แลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์

Preparation of Strontium Ferrites Doped with Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide

ผู้วิจัย		สังกัด
ผศ. ดร. วันดี	อ่อนเรียบร้อย	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
นายโกเมน	ปาปะโถ	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ. ดร. ทวี	ตันฑศิริ	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ทวี ตันฑศิริ ที่ได้ให้คำชี้แนะ และการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณครู อาจารย์ บิดามารดา และครอบครัว ที่มีส่วนส่งเสริมสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา และหากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง หัวหน้าโครงการต้องขออภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่ารายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจในงานด้านนี้ต่อไปไม่มากก็น้อย

ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย
(หัวหน้าโครงการ)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5180113

ชื่อโครงการ: การเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยการเจือด้วยแลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์

ชื่อนักวิจัย: ผศ. ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย/นายโกเมน ปาปะโถ/ ศ. ดร. ทวี ตันฑศิริ

E-mail Address: wandeeon@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

$Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ เฟอร์ไรท์เตรียมด้วยขบวนการทางเซรามิคแบบดั้งเดิม สารประกอบถูกเตรียมจากผงของ $SrCO_3$ La_2O_3 Fe_2O_3 และ CoO และนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ในการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของการเติมโคบอลต์และแลนทานัมที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่าง $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่อ x = 0.2 และ y เท่ากับ 0.0 ถึง 1.0 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขนาดเกรนเฉลี่ยของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโคบอลต์ (y) เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1,150 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส ผลจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์บริสุทธิกับตัวอย่าง $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,250 องศาเซลเซียส สำหรับ $y \leq 0.2$ พบเฟสใหม่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ซึ่งประกอบด้วย $LaFeO_3$ $CoFe_2O_4$ และเฟสที่ไม่ทราบสำหรับ $y > 0.2$ จากการศึกษาสมบัติทางเหล็กของตัวอย่าง $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่เตรียมด้วยการเติมโคบอลต์ปริมาณต่างๆ และที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ กัน ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM) พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (H_C) มีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นหรือการเติมโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่ถูกเจือ ($SrFe_{12}O_{19}$) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กที่สูง 4,850 Oe ส่วนค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของตัวอย่าง

$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด 60 emu/g สำหรับตัวอย่าง $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่มีค่า x = 0.2 และ y = 1.0 เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวสูงสุด (M_S) ประมาณ 127 emu/g และมีความสูญเสียเนื่องจากวงฮิสเทอร์รีซิสต่ำสุด ในการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวสูง มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ (y > 1.0) หรือการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: สตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์/ อุณหภูมิการเผาซินเตอร์/ สภาพลบล้างแม่เหล็ก/ สภาพแม่เหล็กคงค้าง

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 $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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^{o}C. In this study, the effects of cobalt and lanthanum addition on microstructures and magnetic properties of $SrFe_{12}O_{19}$ and $Sr_{0.8}$ $La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ samples with x= 0.2 and y = 0.0 to 1.0 were investigated. The microstructures of the $SrFe_{12}O_{19}$ and $Sr_{0.8}$ $La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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^{o}C to 1,300^{o}C. The X-ray diffraction (XRD) results showed that the pure strontium hexaferrite phase could be observed for $SrFe_{12}O_{19}$ and $Sr_{0.8}$ $La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ samples sintered at 1,250^{o}C for $y \leq 0.2$. The second phase for as-sintered $Sr_{0.8}$ $La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ sample was found to consist of $LaFeO_3$, $CoFe_2O_4$ and unknown phases for $y > 0.2$. The magnetic properties of $SrFe_{12}O_{19}$ and $Sr_{0.8}$ $La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 ($SrFe_{12}O_{19}$) sintered at 1,150^{o}C has a high coercivity of 4,850 Oe. The

remanence of $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ sample sintered at 1,200°C has the highest value of 60 emu/g. For the $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ sample with x = 0.2 and y = 1.0 sintered at 1,300°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°C.

Keywords: Strontium Hexaferrite/ Sintering Temperature/ Coercivity/ Remanence

สารบาญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ฉ
สารบาญ		ซ
สารบาญตาราง		ฎ
สารบาญรูป		ฐ
สัญลักษณ์		ฌ
ประมวลศัพท์และคำย่อ		ธ
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 การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM) 22

4 ผลการทดลอง 23
4.1 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ 23
4.1.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจาก XRD 23
4.1.2 ผลการวัดขนาดเกรน 24
4.1.3 ผลการวัดความหนาแน่น 25
4.1.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก 25
4.2 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน 27
4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD 27
4.2.2 ผลการวัดขนาดเกรน 28
4.2.3 ผลการวัดความหนาแน่น 28
4.2.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก 29
4.3 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ 30
4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD 30
4.3.2 ผลการวัดขนาดเกรน 31
4.3.3 ผลการวัดความหนาแน่น 32
4.3.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก 33
4.4 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน 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 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 43

5.1.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ 43

5.1.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อขนาดเกรน 46

5.1.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 48

5.2 ผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 54

5.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 54

5.2.2 ผลการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีผลต่อเกรน 56

5.2.3 ผลการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีผลต่อสมบัติแม่เหล็ก 58

5.3 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ 64

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ 64

5.3.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน 68

5.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน 69

6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 76

6.1 สรุปผลการวิจัย 76

6.1.1 ผลของอุณหภูมิของการเผาซินแตอร์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ 76

6.1.2 ผลปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงใน $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 76

6.1.3 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ 77

6.1.4 สมบัติแม่เหล็กของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้ 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

สารบาญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติแม่เหล็กในงานวิจัยที่ผ่านมาของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์	10
3.1	ปริมาณส่วนผสมของสารที่ใช้เตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในอัตราส่วนต่างๆ	14
4.1	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $SrFe_{12}O_{19}$ เผาซินเตอร์ที่ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	25
4.2	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เผาซินเตอร์ที่ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	29
4.3	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	32
4.4	เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	39
5.1	ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C	50
5.2	ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เจือแลนทานัมและโคบอลต์เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เป็น 1,250°C	60
5.3	ค่า สภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ	72

สารบาญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ส่องบนพื้นผิวของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ (ก) 1,200°C และ (ข) 1,250°C	6
2.2	ภาพถ่ายจากอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เป็นลักษณะผง โดยมีอัตราส่วนโมล Fe^{3+}/Sr^{2+} เท่ากับ 8 9.23 และ 10 มีค่า pH 10 เมื่อเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (ก) 900°C (ข) 1,000°C และ (ค) 1,100°C	7
2.3	วงฮีสเทอร์รีซีสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนโมล (Fe/Sr) เป็น 11 11.6 และ 12	8
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์	12
3.2	อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาแคลไซน์	15
3.3	แม่แบบในการอัดขึ้นรูปของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์	16
3.4	เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่มีขดลวดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน	17
3.5	อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาซินเตอร์	17
3.6	เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartotius	20
3.7	เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII	20
3.8	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP	21
3.9	เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM) ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407	22
4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	23
4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	24
4.3	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	26
4.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	27
4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	28

รูปที่		หน้า
4.6	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	29
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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	เปรียบเทียบลักษณะวงฮีสเทอร์รีซีสเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	34
4.11	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1300°C	38
4.16	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	40
4.17	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	41
4.18	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ 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 $SrFe_{12}O_{19}$ 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) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$	47
5.5	วงฮีสเทอรีซีสของ (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	48
5.6	วงฮีสเทอรีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	49
5.7	ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	51
5.8	ผลของค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C	52
5.9	ผลของค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 13,00°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	53
5.10	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$	56
5.12	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อ (ก) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ (ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	57
5.13	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ โดยที่ y = 0.2 0.5 0.8 และ 1.0 เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	58

รูปที่		หน้า
5.14	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	59
5.15	ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ (ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$ (ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	61
5.16	ผลของค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ (ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$ (ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	62
5.17	ผลของสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,250°C (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ (ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$ (ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	63
5.18	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	65
5.19	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	66
5.20	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1,150°C (ข) 1,200°C (ค) 1,250°C และ (ง) 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	67
5.21	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,200°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง (ก) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	68
5.22	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	69
5.23	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	70
5.24	วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	71

รูปที่		หน้า
5.25	ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	73
5.26	แมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,150°C 1,200°C 1,250°C และ 1,300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	74
5.27	สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ 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	=	แมกเนไตเซชัน
M_r	=	ค่าแมกเนไตเซชันคงค้าง
M_s	=	แมกเนไตเซชันอิ่มตัว
m_e	=	มวลของอิเล็กตรอน
q	=	ประจุไฟฟ้า
T	=	อุณหภูมิ
T_c	=	อุณหภูมิคูรี
T_N	=	อุณหภูมินีล
θ	=	มุมที่รังสีเอกซ์ทำกับระหว่างระนาบผลึก
λ	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
μ	=	สภาพให้ซึมได้
μ_0	=	สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ
μ_r	=	สภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์
χ_m	=	Magnetic Susceptibility
ω	=	ความถี่เชิงมุม
ϕ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
A/m	=	แอมแปร์ต่อเมตร
$A\text{-}m^2$	=	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	=	อิเล็กตรอนโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์
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

แม่เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นวัสดุประเภทเซรามิกส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันจัดว่าเป็นวัสดุที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมาก แม่เหล็กเฟอร์ไรท์ถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันของเราอย่างแพร่หลาย เช่น ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น อาทิ เช่น ลำโพง โทรศัพท์ มอเตอร์ อุปกรณ์ไมโครเวฟ ของเด็กเล่น แม่เหล็กติดตู้เย็นหรือติดกระดานไวท์บอร์ด และผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกมากมาย แม่เหล็กเฟอร์ไรท์สามารถแบ่งออกตามสมบัติการใช้งานได้อีก 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ แม่เหล็กเฟอร์ไรท์ชั่วคราว (Soft Ferrite) และ แม่เหล็กเฟอร์ไรท์ถาวร (Hard Ferrite) สมบัติทางแม่เหล็กที่โดดเด่นของแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ชั่วคราวคือ การสร้างสภาวะแม่เหล็ก และทำลายสภาวะแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนแม่เหล็กโลหะ แต่แม่เหล็กเฟอร์ไรท์มีความต้านทานสูง จึงนิยมใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ที่ต้องการความถี่สูง อาทิเช่น แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไมโครเวฟ เพราะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสีย ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ตัวอย่างแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ชั่วคราวได้แก่ แมงกานีสซิงก์เฟอร์ไรต์ ($Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$) และนิกเกิลซิงก์เฟอร์ไรท์ ($Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$) เป็นต้น ส่วนแม่เหล็กอีกประเภทหนึ่งคือ แม่เหล็กเฟอร์ไรท์ถาวร สมบัติเด่นของแม่เหล็กประเภทนี้คือเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ยากและหมดสภาพได้ยาก จึงนิยมใช้เป็นแม่เหล็กถาวรในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ มอเตอร์ และเทปแม่เหล็ก ตัวอย่างของแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ถาวร ได้แก่ แบเรียมเฟอร์ไรท์ และสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ การเตรียมเฟอร์ไรท์นั้นสามารถเตรียมได้หลายเช่น วิธี coprecipitation, วิธี glass crystallization, วิธี organic resin, วิธี sol–gel และวิธีทางเซรามิกส์ แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือวิธีทางเซรามิกส์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับงานวิจัยสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ได้มีงานวิจัยที่ศึกษา $Sr_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$, $La_{1-x}Sr_xFeO_3$, และ $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ เป็นต้น ในปัจจุบันการวิจัยและการพัฒนาด้านวัสดุแม่เหล็กในประเทศไทยยังมีค่อนข้างน้อย ในระบบการผลิตเฟอร์ไรท์เป็นความลับทางการค้า และอาศัยเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทำให้มีข้อกำจัดในการใช้งานบางประเภทที่ต้องการเฟอร์ไรท์ที่มีรูปแบบพิเศษที่แตกต่างจากท้องตลาดทำให้การใช้งานของเฟอร์ไรท์มีข้อกำกัดในเรื่องขนาดและรูปร่าง ในงานวิจัยนี้มุ่งเพื่อให้ได้เฟอร์ไรท์ที่มีประสิทธิภาพและตรงความต้องการ ในการใช้งานด้านต่างๆ ให้หลากหลายมากขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นปริมาณเหล็กและโคบอลท์ที่เหมาะสมต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยทำการศึกษากับระบบ $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ เพื่อหาสัดส่วน x และ y ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีประสิทธิภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเจือแลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์ที่มีต่อสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

1.2.3 เพื่อหาเงื่อนไขการเตรียมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เฟอร์ไรท์ที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่สูง

1.2.4 เพื่อศึกษาหาแนวทางในการนำสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์มาประยุกต์ใช้งาน

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายกลไกการแทนที่ของ La และ Co

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ เช่น อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ การอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เป็นต้น

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลการเจือแลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์ที่มีต่อสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

1.3.4 ตรวจสอบความเป็นผลึกของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือด้วยแลนทานัมออกไซด์และโคบอลท์ออกไซด์ ด้วย XRD

1.3.5 วัดและวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของแต่ละเงื่อนไข ด้วย VSM

1.3.6 ศึกษาหาปริมาณเหล็กและโคบอลท์ของ $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่มีต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เพื่อหาสัดส่วน x และ y ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

1.3.7 ศึกษาหาแนวทางการนำมาประยุกต์ใช้งาน

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

แผนงานปีที่ 1

แผนการดำเนินงาน	ปีที่ 1											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$)	/	/										
2. สั่งซื้ออุปกรณ์และสารเคมี	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ เช่น อุณหภูมิการเผาแคลไซน์		/	/	/	/							
4. สร้างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขนาดไม่น้อยกว่า 700 mT	/	/	/	/	/	/	/	/	/			
5. สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระตรงเพื่อใช้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	/	/	/	/	/	/	/	/	/			
6. ศึกษาปัจจัยในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก										/	/	/
7. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในเงื่อนไขต่างๆ										/	/	/
8. ตรวจสอบความเป็นผลึกของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในเงื่อนไขต่างๆ										/	/	/
9. รายงานความก้าวหน้า												/

แผนงานปีที่ 2

แผนการดำเนินงาน	ปีที่ 2											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1. สั่งซื้ออุปกรณ์และสารเคมี	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
2. ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีประสิทธิภาพ	/	/	/	/	/	/	/	/	/			
3. ออกแบบ/สร้างชุดวัดวงฮิสเทอร์รีซิสเบื้องต้น	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
4. วัดและวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของแต่ละเงื่อนไข	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
5. ศึกษาหาปริมาณเหล็กและโคบอลท์ของ $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่มีต่อสมบัติความเป็นแม่เหล็ก										/	/	/
6. เตรียมผลงานเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศ	/	/	/							/	/	/
7. ศึกษาหาแนวทางการนำมาประยุกต์ใช้งาน											/	/
8. สรุปรายงานฉบับสมบูรณ์												/

ผลงาน/หัวข้อที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในแต่ละปี

ปีที่ 1 ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์.....-.....

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์.....-.....

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

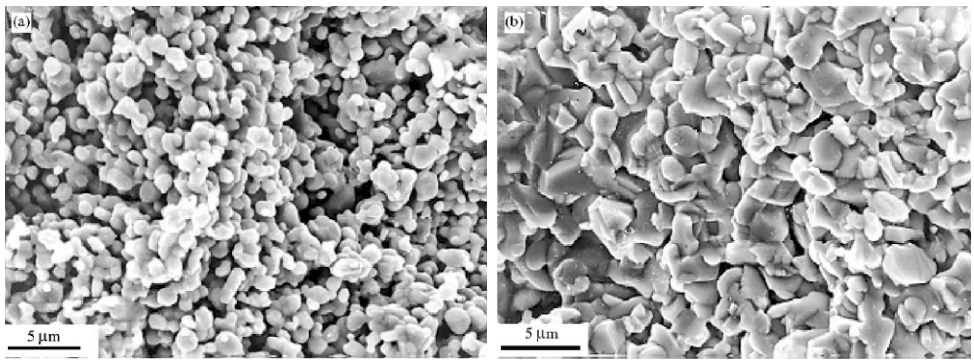
ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์.....**Journal of magnetism and magnetic materials***.....

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

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Puneet Sharma และคณะ (2006) [1] ได้ศึกษาปัจจัยที่จะทำให้ความหนาแน่นของเนื้อสาร ค่า Remanence ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กและพลังงานสูญเสียภายในแกนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ให้เพิ่มมากขึ้น โดยในกระบวนการผลิตแม่เหล็กของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์จะใช้กระบวนการทางเซรามิก ในการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Fe_2O_3/SrO เพิ่มขึ้นจาก 5.0 ถึง 6.0 ความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Remanence ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของสารแม่เหล็กซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เวลาในการบดนาน อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่ต่ำจะได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กส่งผลให้ได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กที่สูง

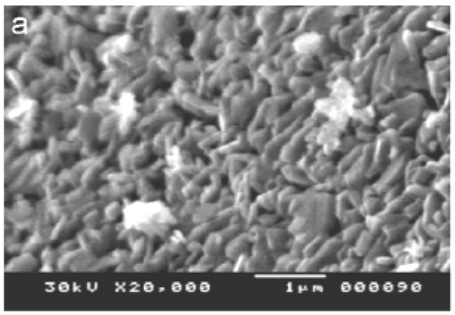


(ก) (ข)

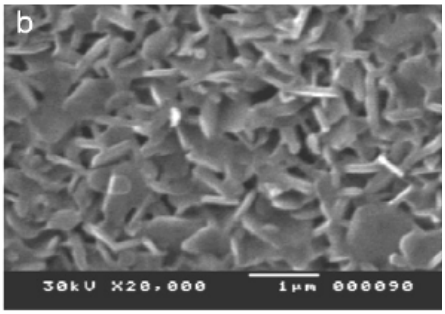
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ส่องบนพื้นผิวของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ (ก) 1200°C และ (ข) 1250°C [1]

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

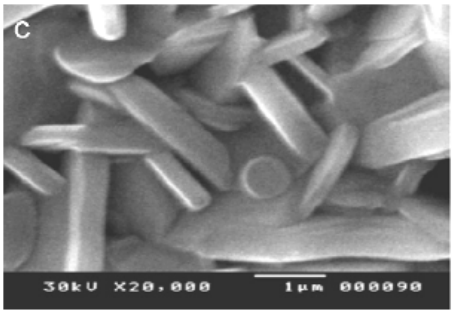
M. M. Hessien และคณะ (2008) [3] ได้ศึกษาการควบคุมสัดส่วน และสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยใช้กระบวนการ co-precipitation จากการศึกษาพบว่า สารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้จะมี $SrFe_{12}O_{19}$ เฟสเดียว ได้ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดผลิตจากอัตราส่วนของ Fe^{3+}/Sr^{2+} เท่ากับ 9.28 หลังจากเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900-1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากรูปที่ 2.2 แสดงขนาดอนุภาคที่มีอัตราส่วนโมล Fe^{3+}/Sr^{2+} เท่ากับ 9.23 และมีค่า pH = 10 พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น และจาการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่ม pH ของสารตั้งต้นจาก 10 ถึง 11.5 ที่อัตราส่วน Fe^{3+}/Sr^{2+} เท่ากับ 10 ทำให้เกิด $SrFe_{12}O_{19}$ เฟสเดียวมากขึ้น การเกิดโครงสร้างของผง $SrFe_{12}O_{19}$ จะทำให้ค่าอิ่มตัวทางแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 64.72 ถึง 84.15 emu/g และ intrinsic coercivity 2937-5609 Oe



(ก)



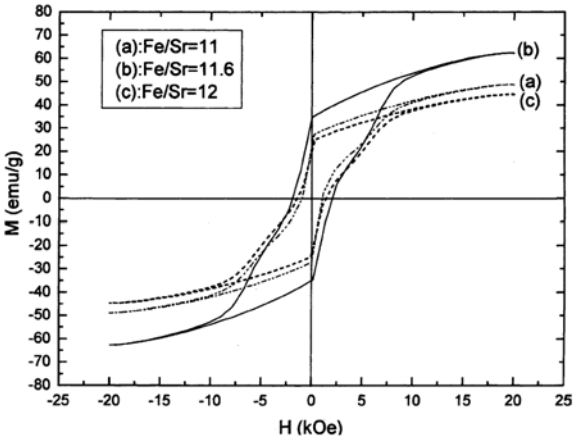
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายจากอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เป็นลักษณะผง โดยมีอัตราส่วนโมล Fe^{3+}/Sr^{2+} เท่ากับ 8 9.23 และ 10 มีค่า pH 10 เมื่อเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (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 Fr/Sr ที่มีค่า 11 ถึง 12 และเผาที่อุณหภูมิจาก 850°C ถึง 1050°C ค่าที่ดีที่สุดของผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนโมลเท่ากับ 11 เมื่อเผาที่ 1000°C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง ได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว 62 emu/g และมีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1950 Oe วงฮีสเทอร์รีซีสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000°C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนโมล (Fe/Sr) เป็น 11 11.6 และ 12 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงฮีสเทอร์รีซีสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 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 โครงสร้างที่ ศึกษาได้จะพบเฟสหลัก 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 เพิ่มจาก 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 2.89×10^{8} Ω-cm เมื่อเวลาในการเผาซินเตอร์เป็น 8 ชั่วโมง

Frank Kool และคณะ (2002) [7] ศึกษาผลของการเติม La และ Co ลงในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ซึ่งจะเพิ่มค่าสมบัติแม่เหล็กเมื่อ x มีค่าน้อยๆ เมื่อ x มีค่ามากกว่า 0.25 สมบัติแม่เหล็กจะมีค่าต่ำลง Frank Kool และคณะ ได้ศึกษา 1) การขยายตัวของเกรนเทียบกับอุณหภูมิการเผา 2) อันตรกิริยาของการเผา calcination 3) เปรียบเทียบสมบัติของสารประกอบแบเรียมเฟอร์ไรท์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ผลที่ศึกษาได้คือ การยับยั้งการลดลงของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจากการเพิ่มขนาดเกรนที่มาจากเฟสเกินของ Co โดยการเพิ่มซิลิกอนเพื่อลดการขยายของเกรน ผลของ La/Co จะทำให้ความเป็นเหลี่ยมของวงฮีสเทอร์รีซีสลดลงเมื่อ $x > 0.25$

Jean-Marie Le Breton (2004) [8] ศึกษาโครงสร้างของผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยวิธี co-precipitated ผง $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ($x = 0 - 0.4$) ใช้ Mössbauer spectrometry และ x-ray diffraction ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ x มากขึ้นเรื่อยๆ ผงของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์มีเฟสอื่นปนอยู่ นั่นคือเฟส $(La,Sr)(Fe,Co)O_{3-\delta}$ และเฟส $(Co,Fe)Fe_2O_4$ 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+} ลงในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เป็นไปตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ ($x = 0 - 0.25$) เตรียมโดยกระบวนการทางเซรามิก ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มของ La^{3+} และ Co^{2+} จะไปเพิ่มค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวเมื่อเพิ่มค่า x มีผลทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และพบว่าค่า Remanence (Br) ไม่ได้ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวน La^{3+} และ Co^{2+}

ตารางที่ 2.1 สมบัติแม่เหล็กในงานวิจัยที่ผ่านมาของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

กระบวนการ	เจือ	Hc		Ms	Mr	Br	
		kA/m	Oe	(emu/g)	(emu/g)	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

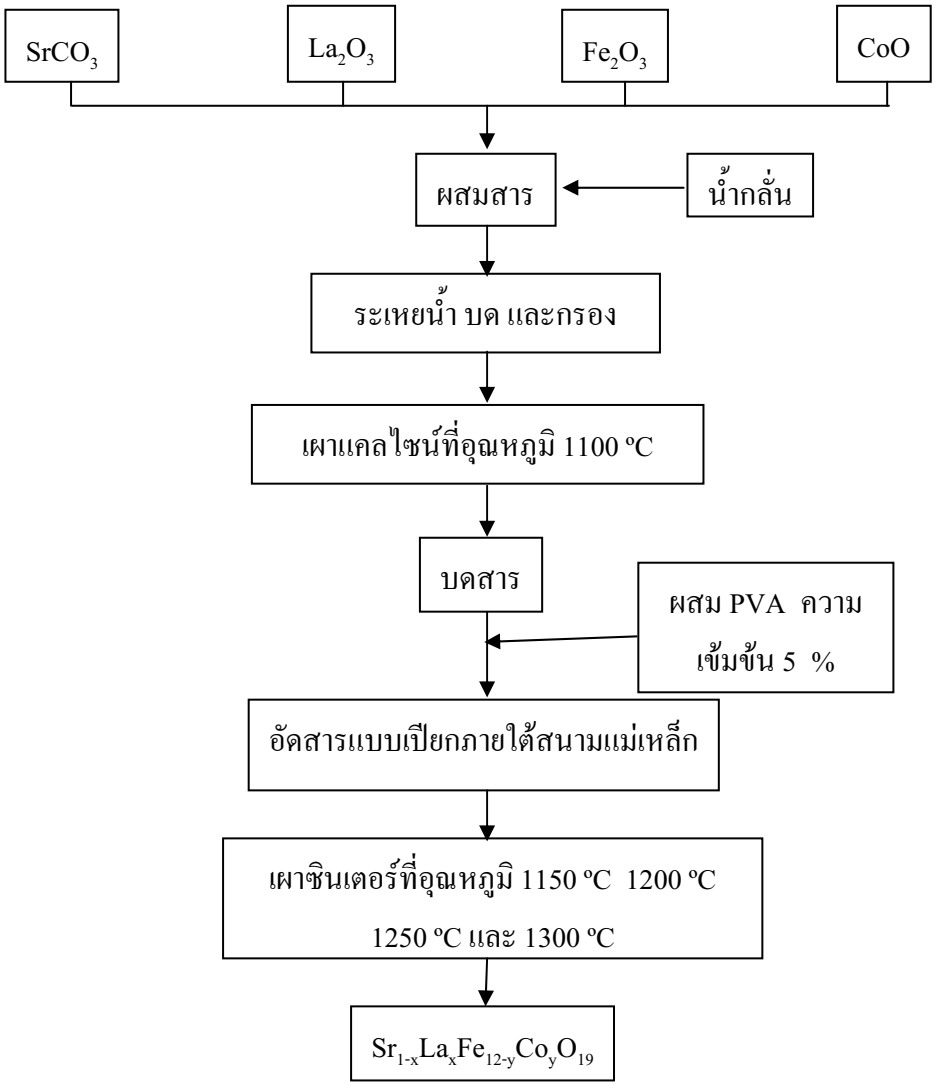
1) สตรอนเทียมคาบอร์เนต $SrCO_3$ 99.9% (Aldrich)
2) เหล็กออกไซด์ Fe_2O_3 99% (Sigma-Aldrich)
3) โคบอลต์ออกไซด์ CoO -325 MESH (Aldrich)
4) แลนทานัมออกไซด์ La_2O_3 99.99% (Sigma-Aldrich)
5) Polyvinyl alcohol (PVA)
6) น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง

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

3.3 วิธีการทดลอง

การเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ด้วยกระบวนการทางเซรามิกส์ เพื่อศึกษาผลของการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 และสภาพแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์มีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

3.4 การเตรียมสาร

ขั้นตอนการผสมสารโดยจะคำนวณน้ำหนักของสารตั้งต้นแต่ละชนิด และนำมาผสมกันตามสูตรที่ต้องการ

<u>ตัวอย่าง</u> 1 การคำนวณส่วนผสมของ $SrCO_3$ (147.63 g/mol) และ Fe_2O_3 (159.69 g/mol) ตามสูตร $SrFe_{12}O_{19}$ (1,061.77 g/mol) โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม (เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องบดสาร)

จากการคำนวณสัดส่วนโมล

$$SrCO_3 + 6Fe_2O_3 \longrightarrow SrFe_{12}O_{19} + CO_2$$

ต้องการ $SrFe_{12}O_{19}$ 10 กรัม จะได้ $SrFe_{12}O_{19} = \dfrac{10\,g}{1061.77\,g/mol} = 0.0094$ mol

ดังนั้นต้องใช้

$SrCO_3 = 0.0094 \times 1$ mol $\times 147.63$ g/mol $= 1.3877$ g

$Fe_2O_3 = 0.0094 \times 6$ mol $\times 159.69$ g/mol $= 9.0065$ g

<u>ตัวอย่าง</u> 2 การคำนวณส่วนผสมของ $SrCO_3$ Fe_2O_3 และ La_2O_3 (325.82 g/mol) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ เมื่อ x = 0.2 โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม

จากการคำนวณสัดส่วนโมล

$$(0.8)SrCO_3 + 6Fe_2O_3 + (0.1)La_2O_3 \longrightarrow Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19} + CO_2$$

ดังนั้นต้องใช้

$SrCO_3 = 0.0094 \times 0.8$ mol $\times 147.63$ g/mol $= 1.1102$ g

$Fe_2O_3 = 0.0094 \times 6$ mol $\times 159.69$ g/mol $= 9.0065$ g

$La_2O_3 = 0.0094 \times 0.1$ mol $\times 325.82$ g/mol $= 0.3063$ g

<u>ตัวอย่าง</u> 3 การคำนวณส่วนผสมของ $SrCO_3$ Fe_2O_3 La_2O_3 และ CoO (74.93 g/mol) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่อ x = 0.2 ส่วน y = 0.1 โดยต้องการน้ำหนักของสารตั้งต้นรวมกันได้น้ำหนักประมาณ 10 กรัม

$$(0.8)SrCO_3 + (5.95)Fe_2O_3 + (0.1)La_2O_3 + (0.1)CoO \longrightarrow Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19} + CO_2$$

ดังนั้นต้องใช้

$SrCO_3$ = 0.0094 × 0.8 mol × 147.63 g/mol = 1.1102 g

Fe_2O_3 = 0.0094 × 5.95 mol × 159.69 g/mol = 8.9315 g

La_2O_3 = 0.0094 × 0.1 mol × 325.82 g/mol = 0.3063 g

CoO = 0.0094 × 0.1 mol × 74.93 g/mol = 0.0704 g

รายละเอียดปริมาณส่วนผสมของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมของสารที่ใช้เตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในอัตราส่วนต่างๆ

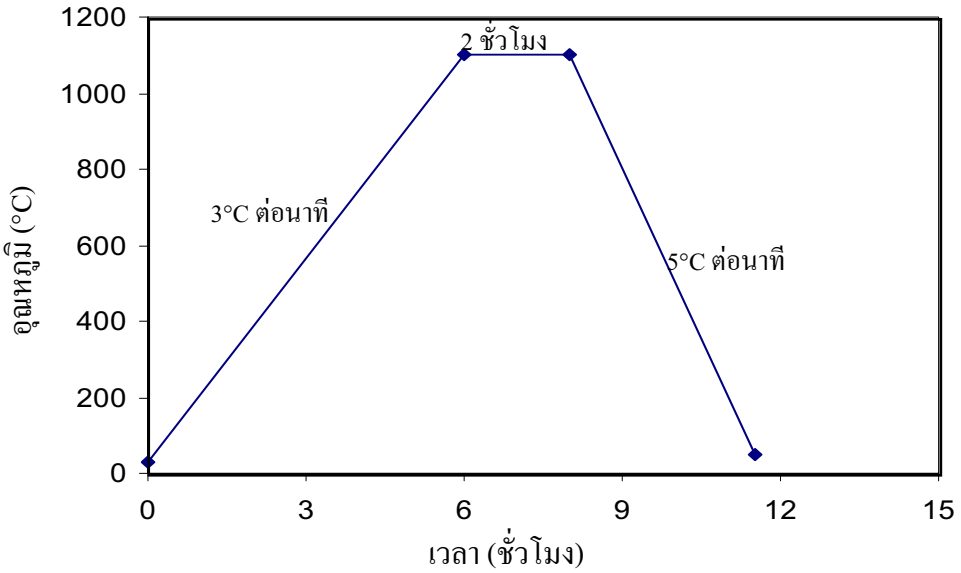
สูตรของสาร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$		ปริมาณสารที่ใช้ (กรัม)			
x	y	$SrCO_3$	Fe_2O_3	La_2O_3	CoO
0	0	1.3877	9.0065	-	-
0.2	0	1.1102	9.0065	0.3063	-
0.2	0.1	1.1102	8.9315	0.3063	0.0704
0.2	0.2	1.1102	8.8564	0.3063	0.1409
0.2	0.3	1.1102	8.7814	0.3063	0.2113
0.2	0.4	1.1102	8.7063	0.3063	0.2817
0.2	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 จากนั้นจะนำสารที่ได้รับการชั่งน้ำหนักแล้วมาเทผสมกัน ลงในกระบอกผสมสาร แล้วนำไปเข้าเครื่องบดสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.1 การเผาแคลไซน์ (Calcination)

เมื่อผสมสารในเครื่องบดสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีน้ำตาลแดง จากนั้นนำไประเหยด้วยเตาแผ่นความร้อนอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สารที่ได้จะแห้งแต่ยังจับตัวเป็นก้อนดังนั้นต้องนำไปบดด้วยครกบดให้ละเอียด แล้วนำไปกรองด้วยผ้ากรองขนาดของรูประมาณ 5 ไมครอน ผงที่ได้จากการกรองจะนำไปสู่ขั้นตอนเผาแคลไซน์

การเผาแคลไซน์เป็นกรรมวิธีการใช้ความร้อนสูงแต่ยังไม่ถึงอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในถ้วยเผาที่ทำจากอลูมินา โดยให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 3°C ต่อนาที และอัตราการลดลงของอุณหภูมิเป็น 5°C ต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.2

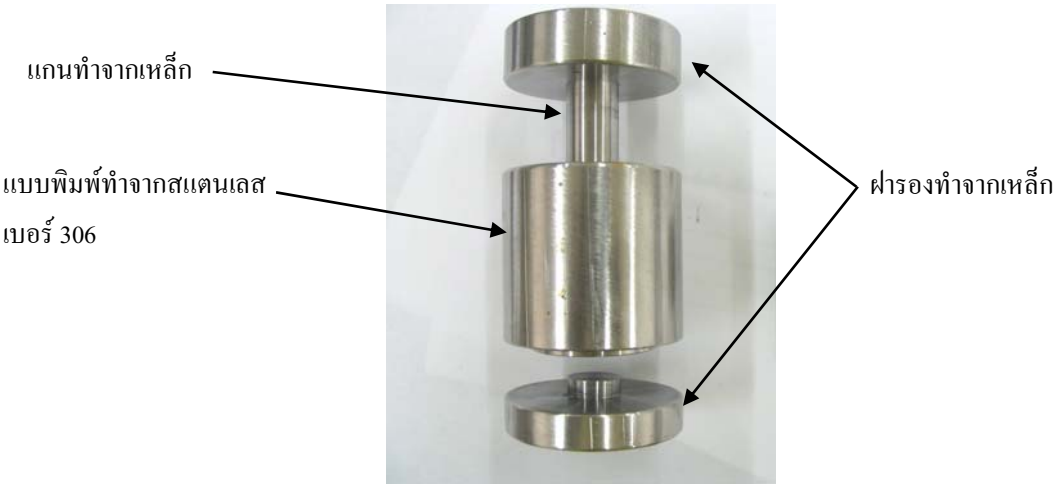


รูปที่ 3.2 อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาแคลไซน์

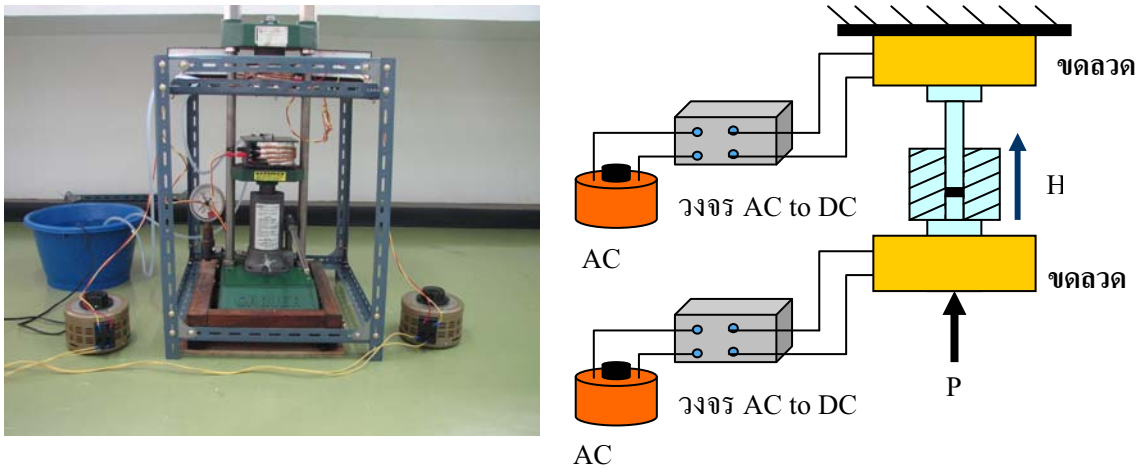
3.4.2 การอัดขึ้นรูป

ผงที่ได้จากการเผาแคลไซน์จะถูกนำมาบดอีกครั้งด้วยครกบดเพื่อทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กจากนั้นจะนำสารที่บดแล้วข้างต้นไปสู่ขั้นตอนการอัดขึ้รูปต่อไป

ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเป็นการเพิ่มแรงยึดเกาะของอะตอมของสารที่อยู่ลักษณะเป็นผงให้สามารถจับตัวกันอยู่เป็นรูปทรง ในการทดลองนี้ต้องการอัดขึ้นรูปสารให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายเม็ดยา โดยในการทดลองต้องการจัดให้แกน easy ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน 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



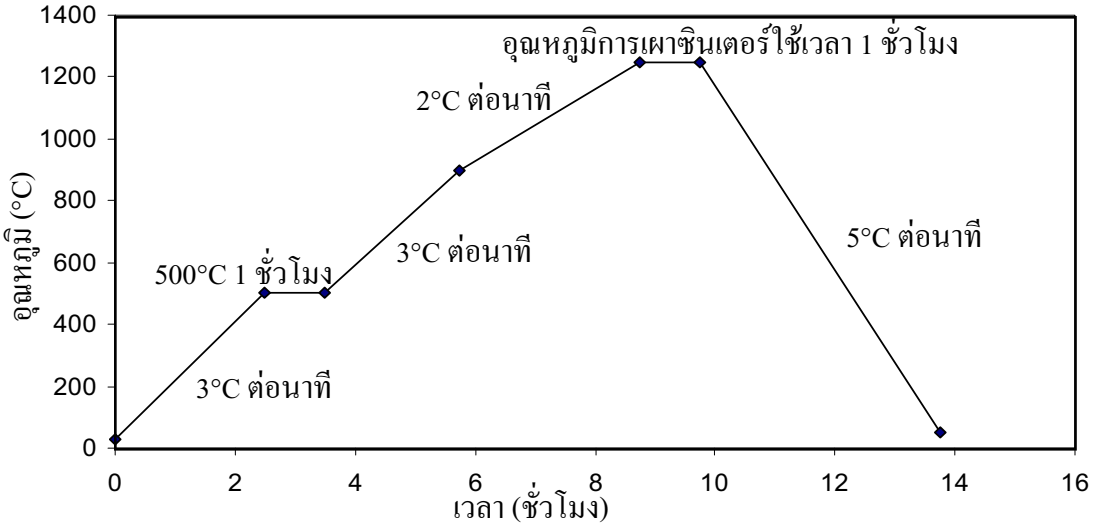
รูปที่ 3.3 แม่แบบในการอัดขึ้นรูปของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่มีขดลวดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน

3.4.3 การเผาซินเตอร์

การเผาซินเตอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบและชิดกันมากขึ้น แต่ไม่เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกัน ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ความร้อนกับสารที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปจะสามารถคงรูป ซึ่งทำให้อยู่ในลักษณะเม็ดสารดังกล่าวอย่างแข็งแรง กล่าวคือ เมื่อให้อุณหภูมิสูงกับเม็ดสารตัวอย่างจะกระตุ้นให้อะตอมต่างๆ เกิดการแพร่เข้าหากัน ทำให้จุดสัมผัสที่ผิวของแต่ละอะตอมมีพื้นที่มากขึ้น เข้าใกล้กันมากขึ้น เม็ดสารที่ได้จากการอัด (Green body) จะถูกวางในถ้วยเผาทำจากอลูมินาแล้วนำเข้าสู่เตาเผาเพื่อนำไปเผาในขั้นตอนการเผาซินเตอร์ สำหรับการเผาซินเตอร์ในการทดลองนี้จะทำการเผาที่ อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250 °C และ 1300°C ในอากาศ เป็นเวลา 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

เม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วจะนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ คือ วัดความหนาแน่น ศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) วัดขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM)

3.5.1 การวัดความหนาแน่น

เม็ดสารที่ได้จากการเผาซินเตอร์จะถูกนำมาขัดให้เม็ดสารมีความเรียบ จากนั้นนำเม็ดสารที่ขัดเสร็จไปล้างโดยใช้เครื่องอุลตราโซนิค และนำสารที่ได้ไปต้มภายใต้อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกในรูพรุนภายในเม็ดสาร จากนั้นนำ เม็ดสารที่ต้มแล้วไปชั่งด้วยวิธีการชั่งในน้ำ จะได้น้ำหนักของสารที่ชั่งในน้ำ W(fl) จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เพื่อไล่น้ำออกจากภายในเม็ดสาร เสร็จแล้วนำเม็ดสารที่ผ่าน การอบไปชั่งได้น้ำหนักของสารที่ชั่งในอากาศ W(a) และนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้มาหาความหนาแน่นของเม็ดสาร จากหลักการของอะคิมิดิสที่กล่าวว่า “ของแข็งที่จุ่มลงในของเหลวจะมีแรงของการลอยตัว (G) กระทำ ซึ่งแรงลอยตัวนี้จะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยของแข็งนั้น โดยปริมาตรของของแข็งที่จมลงในของเหลว V(s) จะเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่ V(fl)”

ความหนาแน่นหาได้จาก

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

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(fl) เมื่อ W(a) คือ น้ำหนัก ที่อ่านค่าได้ในเครื่องชั่งของของแข็งที่ถูกชั่งในอากาศ และ W(fl) คือ น้ำหนักที่อ่านค่าได้ในเครื่องชั่งของของแข็งที่ถูกชั่งในของเหลว

ความหนาแน่นของของแข็งในที่ถูกชั่งในอากาศ (ρ) หาได้จาก

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

เมื่อ V(s) คือปริมาตรของวัตถุ

V(fl) คือปริมาตรของของเหลว

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ถ้ารู้ความหนาแน่นของของเหลว ρ (fl)

$$V(fl) = \frac{M(fl)}{\rho(fl)} \tag{3.3}$$

เนื่องจากแรงลอยตัวหาได้จาก

$$G = \rho Vg \tag{3.4}$$

จากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) จะได้สมการ

$$V(fl) = \frac{G}{\rho(fl)g} \tag{3.5}$$

เมื่อ $M = \rho V$

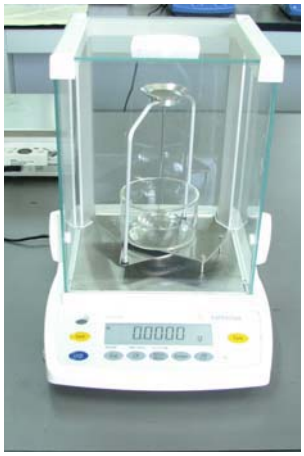
นำสมการ (3.5) แทนในสมการที่ (3.2)

$$\rho = \frac{W(a)\cdot\rho(fl)}{G} \tag{3.6}$$

จะได้

$$\rho = \frac{W(a)\cdot\rho(fl)}{W(a)-W(fl)} \tag{3.7}$$

สมการที่ (3.7) เป็นสมการที่จะนำไปใช้หาความหนาแน่นของสารต่อไป



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartotius

3.5.2 การศึกษาโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิควิเคราะห์วัสดุพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยจะใช้เครื่องดิฟแฟรกโทมิเตอร์ทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Rigaku การนำไปทดสอบจะต้องนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วไปขัดให้ผิวเรียบก่อนที่จะนำไปวัด ข้อมูลที่ได้จากเครื่องดิฟแฟรกโทมิเตอร์จะถูกบันทึกเป็นกราฟระหว่างมุม 2θ กับจำนวนสัญญาณที่เครื่องตรวจนับสัญญาณนับได้ในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากได้ข้อมูลจากดิฟแฟรกโทมิเตอร์แล้ว จะนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Dtandard) เพื่อนำมาเปรียบเทียบโครงสร้างต่อไป ในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII

รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น TTRAXIII

3.5.3 การหาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM การถ่ายภาพด้วย SEM วัสดุที่จะนำไปทดสอบต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า สารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ตัวอย่างมีความเป็นฉนวน ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ต้องนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองด้วยวิธีสปัตเตอริง เมื่อผ่านการถ่ายภาพที่กำลังขยายต่างๆ ต่อจากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นในปัจจัยการสังเคราะห์ต่างๆ

รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP

3.5.4 การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM)

การศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM) ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะแสดงในรูปวงฮีสเทอร์รีซีส ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอก (H) กับแมกเนไตเซชัน (M) เนื่องจากการวัดด้วย VSM มีข้อจำกัดในการเตรียมชิ้นสารนั่นคือสารที่จะวัดต้องมีลักษณะเป็นผง หรือถ้าต้องการวัดสภาพแม่เหล็กของตัวอย่างที่เป็นเม็ด ขนาดของเม็ดต้องมีขนาดเล็ก ขนาดโดยประมาณ คือ กว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร โดยในการวัดสภาพแม่เหล็กจะให้สนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization) สภาพแม่เหล็กคงค้าง (remanace) ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และรูปร่างของวงฮีสเทอร์รีซีส ในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407 ดังแสดงรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM) ยี่ห้อ LakeShore รุ่น Model 7407

บทที่ 4

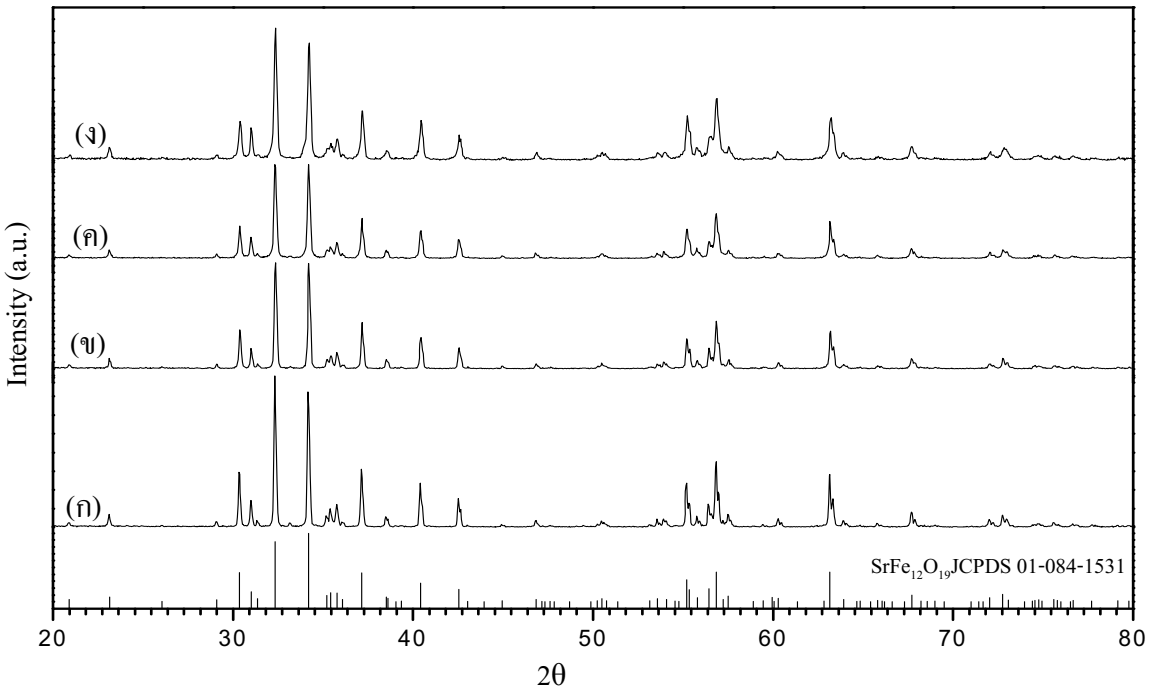
ผลการทดลอง

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

4.1 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.1 ผลการทดสอบโครงสร้างจาก XRD

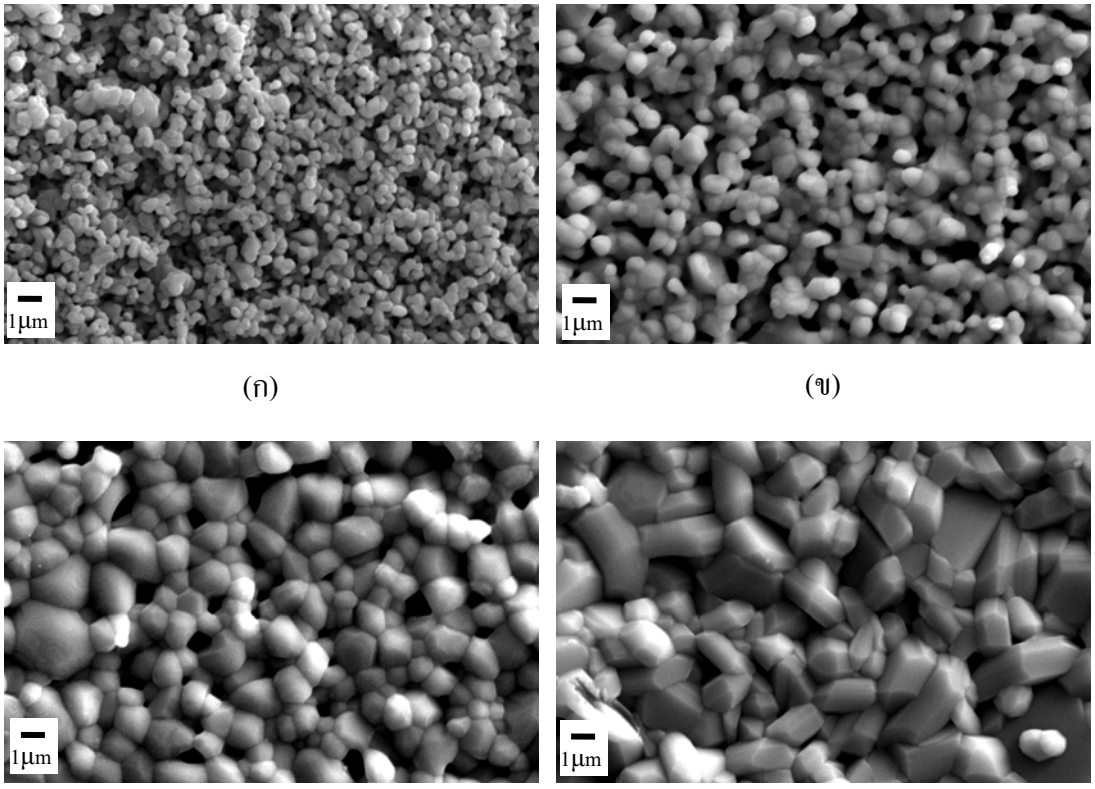
การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ ทำให้ทราบว่าสารแม่เหล็กที่เตรียมได้เป็นสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.2 ผลการวัดขนาดเกรน

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



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.3 ผลการวัดความหนาแน่น

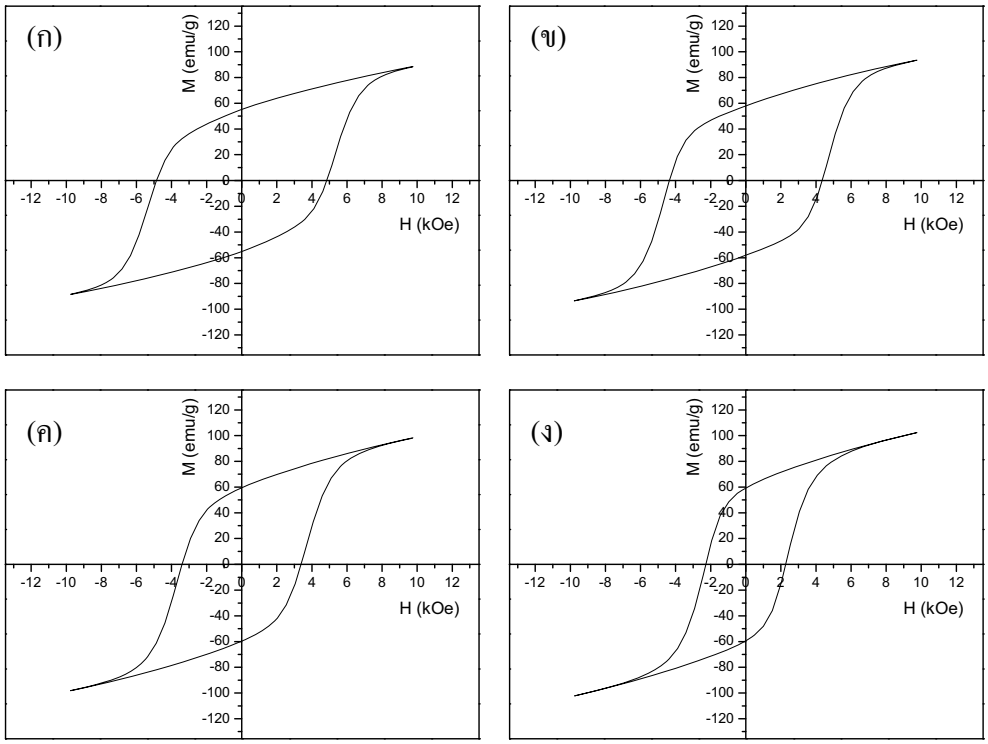
ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1200°C จะมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1300°C จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $SrFe_{12}O_{19}$ 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

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกันภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะลดลง ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.3

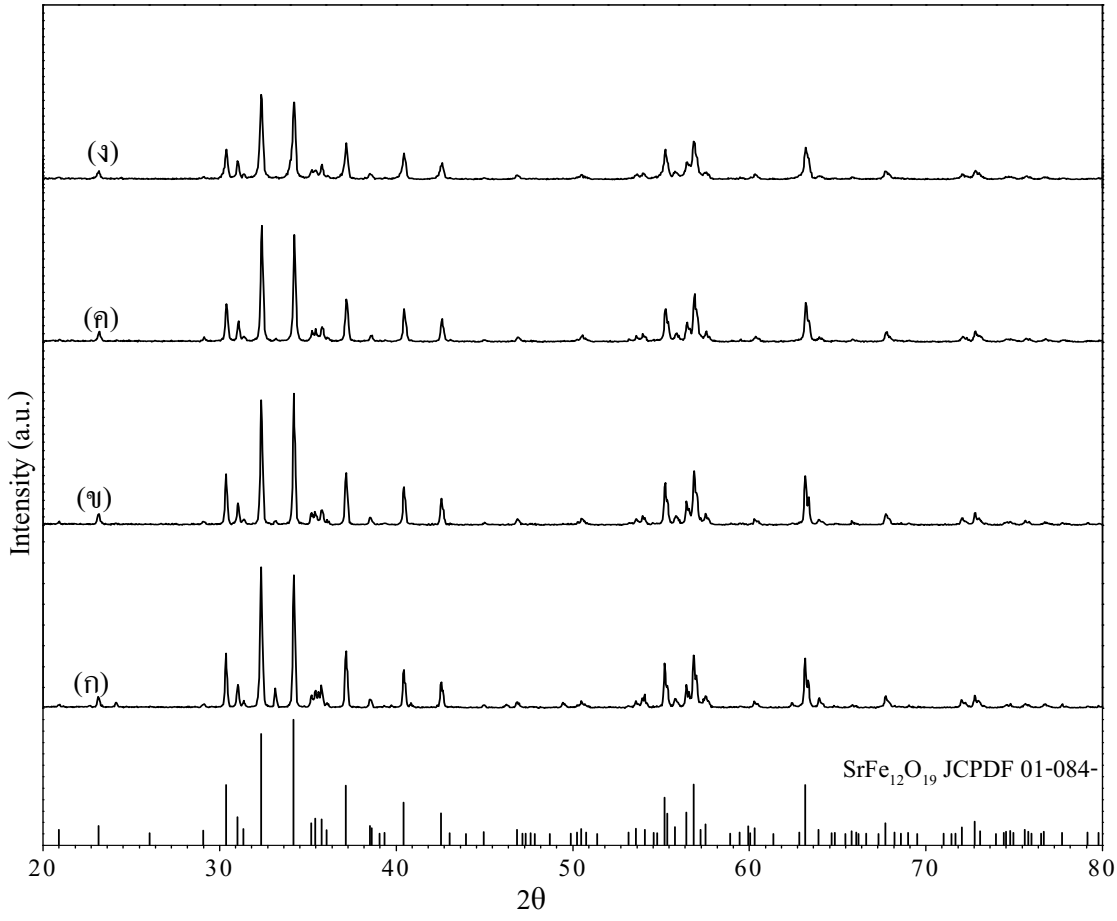


รูปที่ 4.3 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD

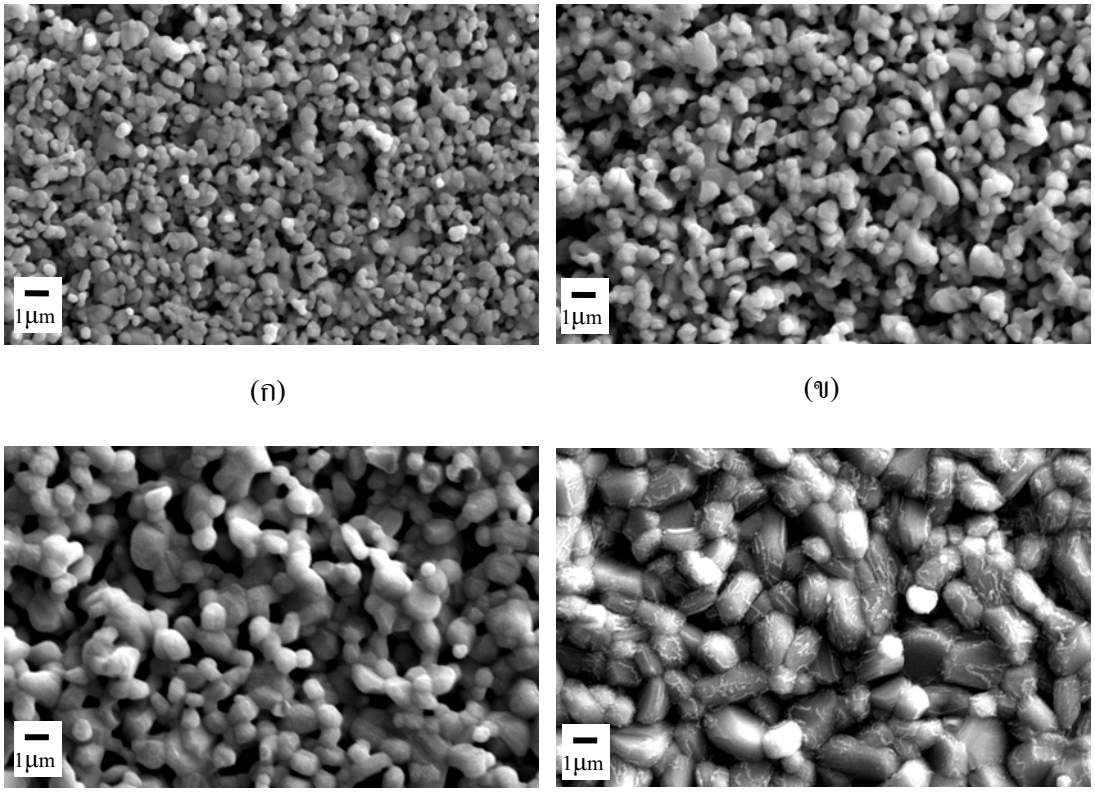
การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัม ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าความเข้มจะมีค่าต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ ทำให้ทราบว่าสารแม่เหล็กที่เตรียมได้เป็นสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.2 ผลการวัดขนาดเกรน

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเจือแลนทานัมที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผามากขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 1150°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม สำหรับอุณหภูมิการเผา 1200°C และ 1250°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิการเผา 1300°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 4.5



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.3 ผลการวัดความหนาแน่น

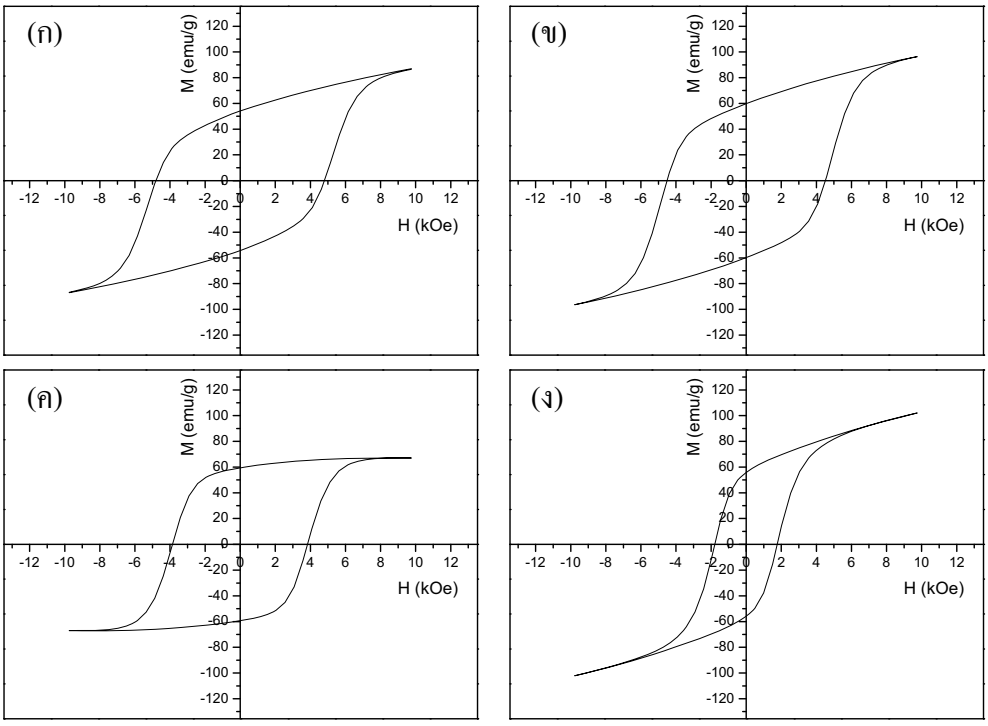
ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1150°C จะมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1300°C จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ 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

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะลดลง สำหรับค่า สภาพแม่เหล็กคงค้างจะใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะสูงขึ้น เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาจาก 1150°C เป็น 1200°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 1250°C พบว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าลดลง และรูปร่างของวงฮีสเทอร์รีซีสจะลักษณะเป็นมุมมากขึ้น และถ้าอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1300°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ส่วนรูปร่างของวงฮีสเทอร์รีซีสจะมีลักษณะเป็นมุมลดลง ดังรูปที่ 4.6

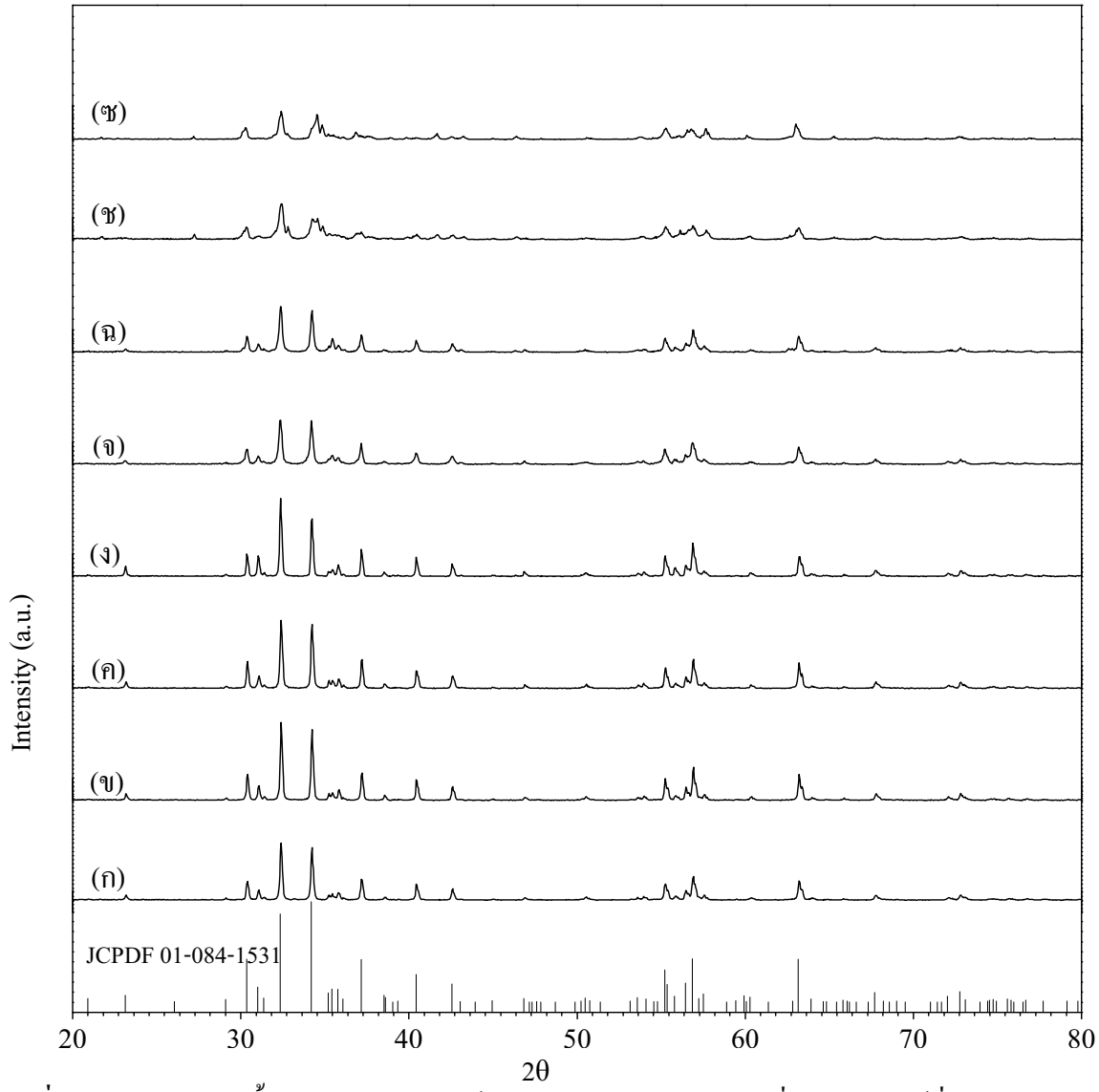


รูปที่ 4.6 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง)1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์

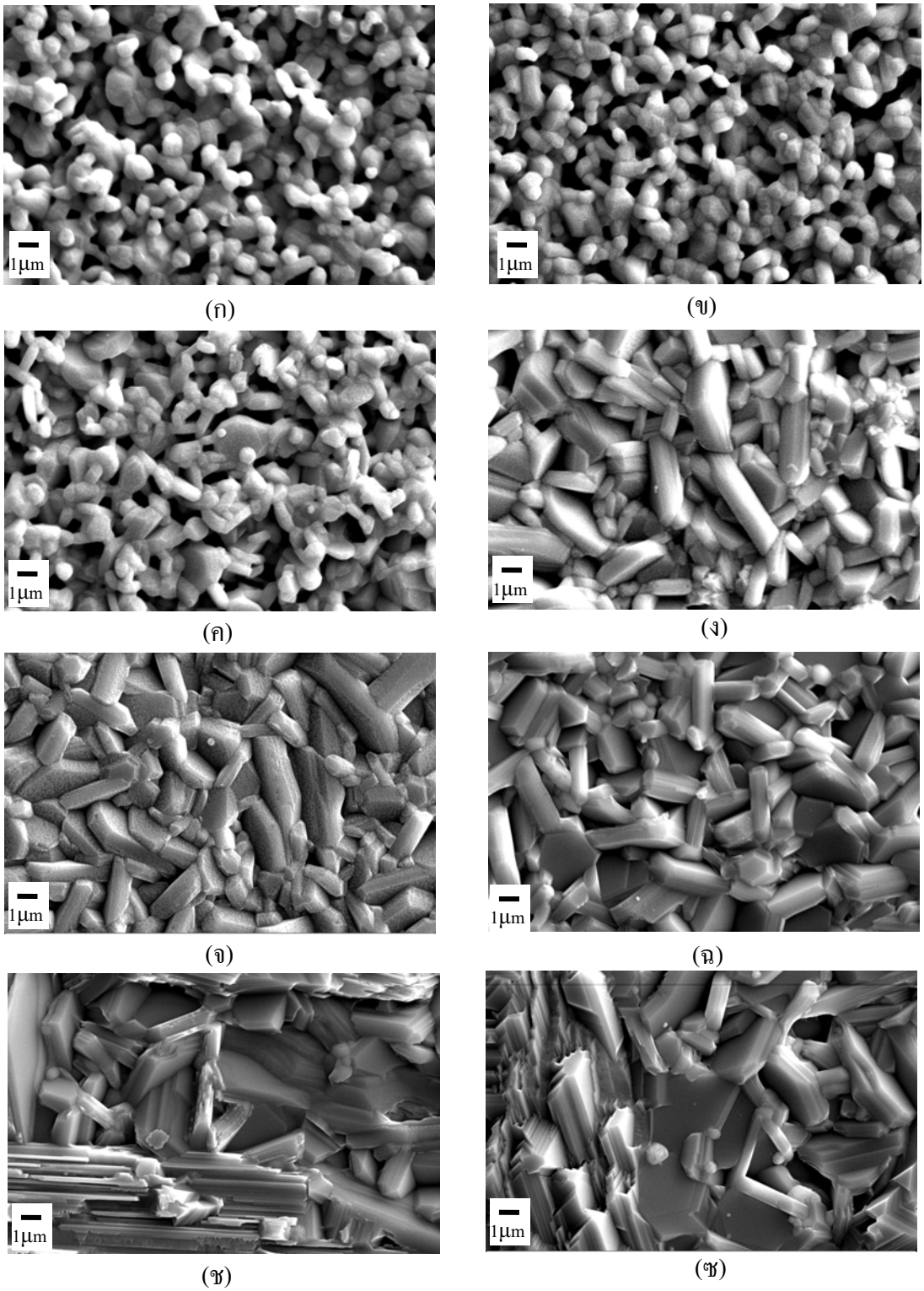
4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD

การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$) โดยที่ y = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8 และ 1.0 ผลช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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 (ซ) 1.0

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$) 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

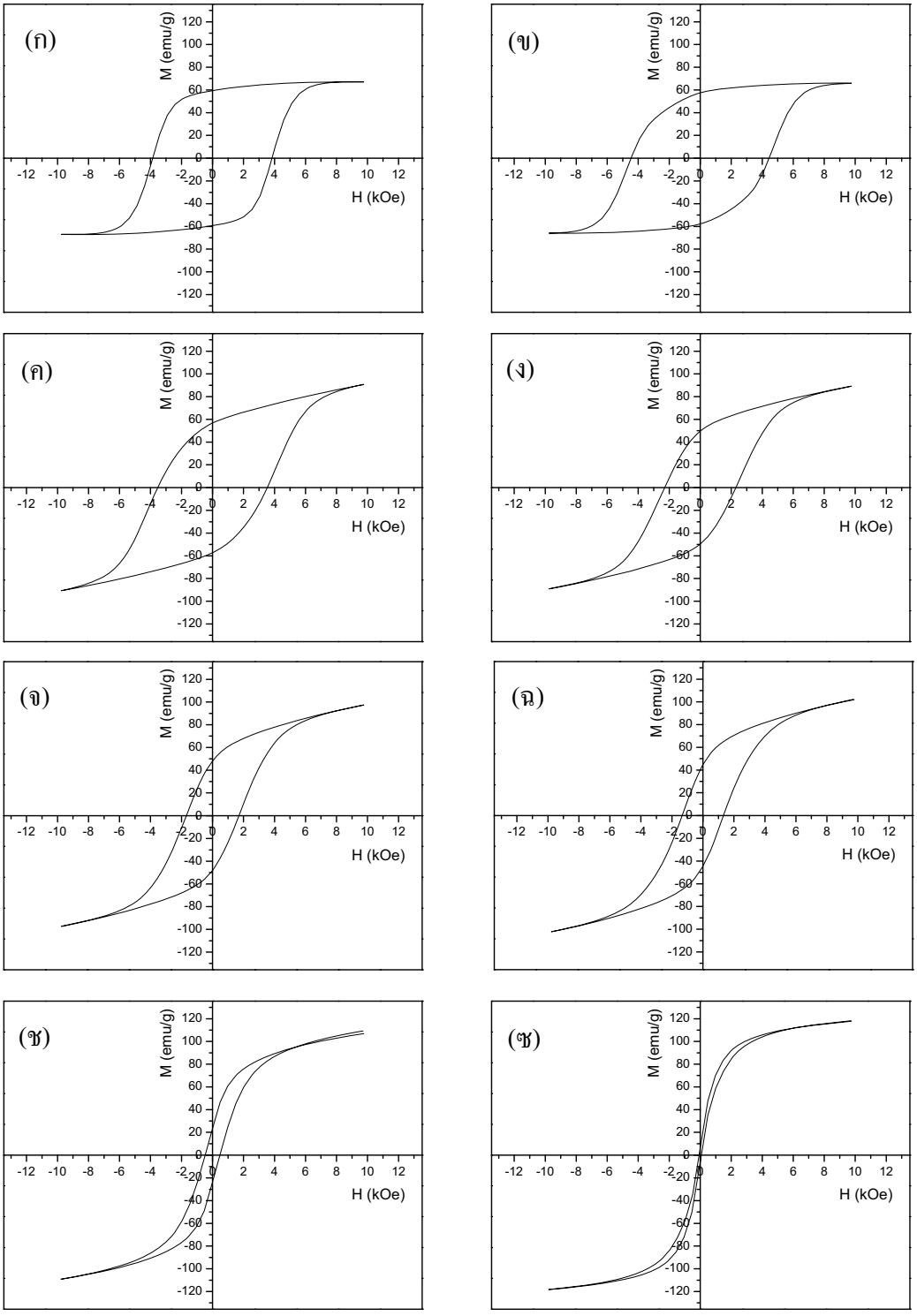
4.3.3 ผลการวัดความหนาแน่น

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 $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ 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

4.3.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก



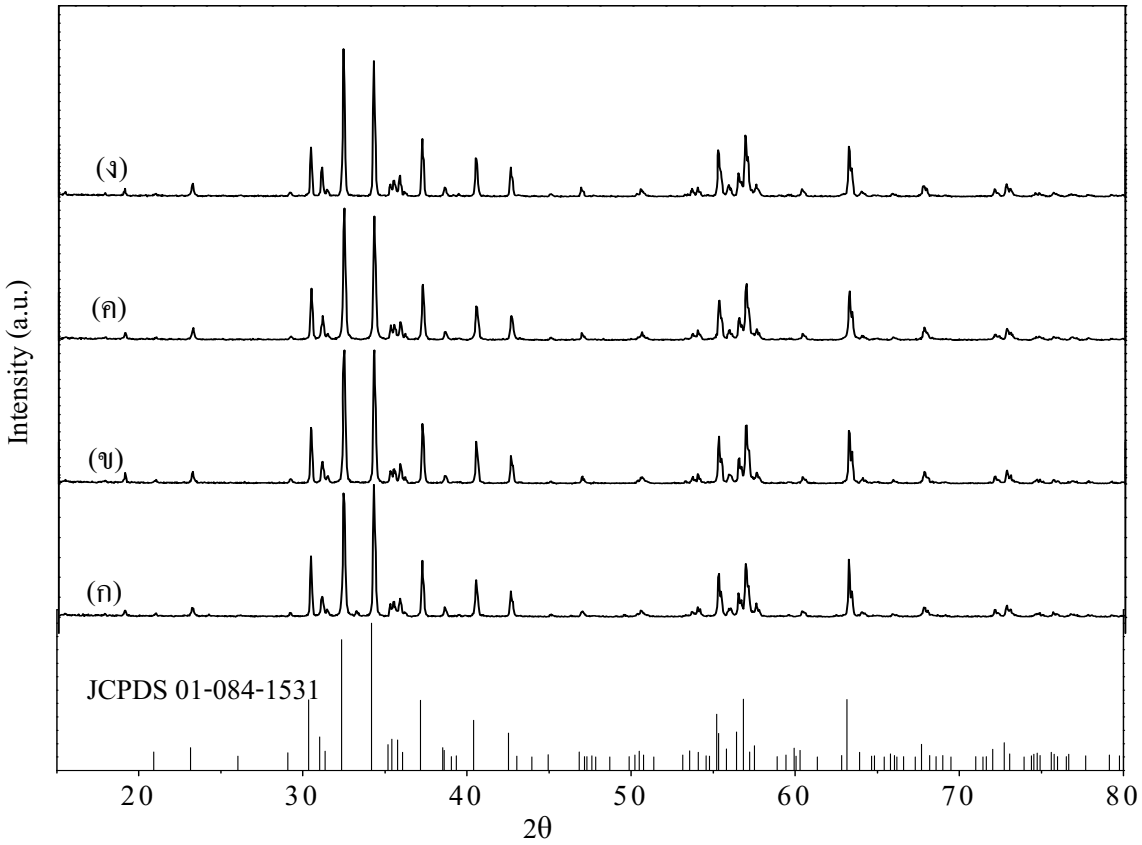
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบลักษณะวงฮีสเทอร์รีซีสเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ โดยที่ y มีค่า (ก) 0 (ข) 0.1 (ค) 0.2 (ง) 0.3 (จ) 0.4 (ฉ) 0.5 (ช) 0.8 และ (ซ) 1.0

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียม ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$) ที่เจือโคบอลต์แตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe พบว่าเมื่อเจือเฉพาะแลนทานัมพบว่ารูปร่างวงฮีสเทอร์รีซีสจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น y = 0.1 การเป็นเหลี่ยมมุมของวงฮีสเทอร์รีซีสจะลดลง แต่ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะสูงขึ้น และถ้าปริมาณโคบอลต์เพิ่มมากขึ้นค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะลดลง ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงรูปที่ 4.9

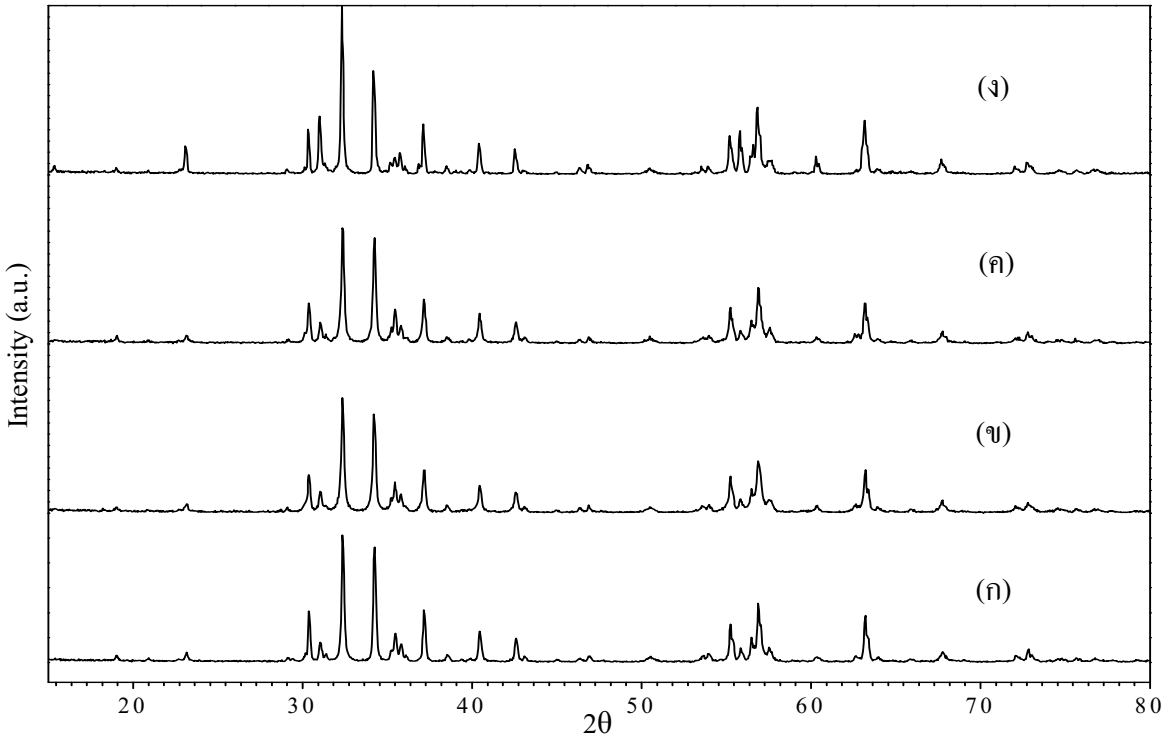
4.4 ผลการทดลองสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

4.4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจาก XRD

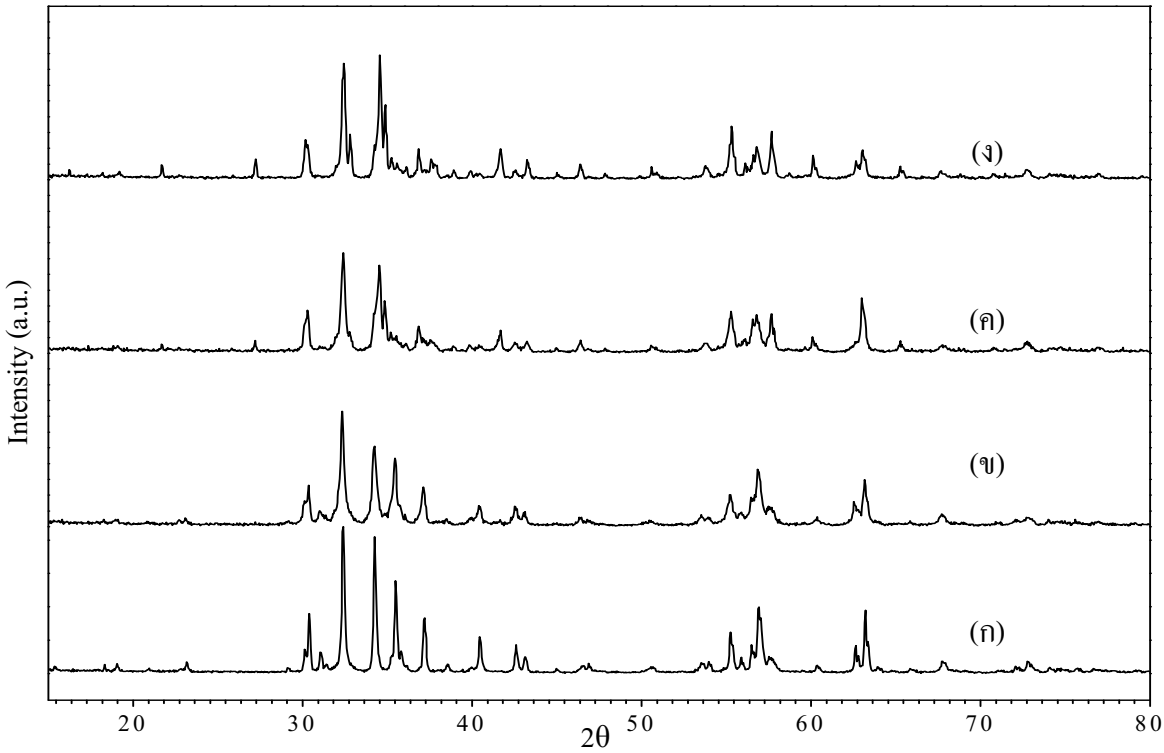
การศึกษาเฟสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ ที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$) โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่ากราฟที่ได้สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนใน JCPDS หมายเลข 01-084-1531 ทำให้ทราบว่าสารแม่เหล็กที่เตรียมได้เป็นสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลดังรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.1 1 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



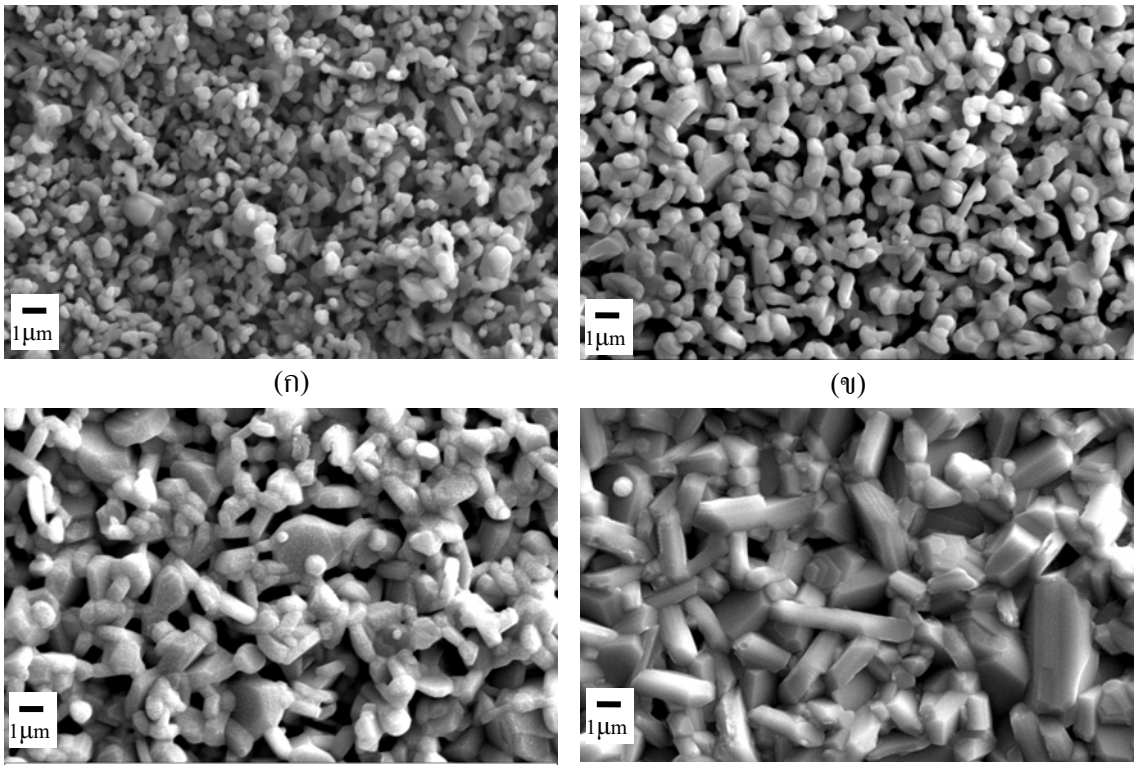
รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.4.2 ผลการวัดขนาดเกรน

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ x = 0.2 และ y = 0.2 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์มากขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C และ 1200°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 1250°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม เป็นแท่ง และมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิการเผา 1300°C เกรนที่มีลักษณะกลมจะหายไป เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมดัง รูปที่ 4.13

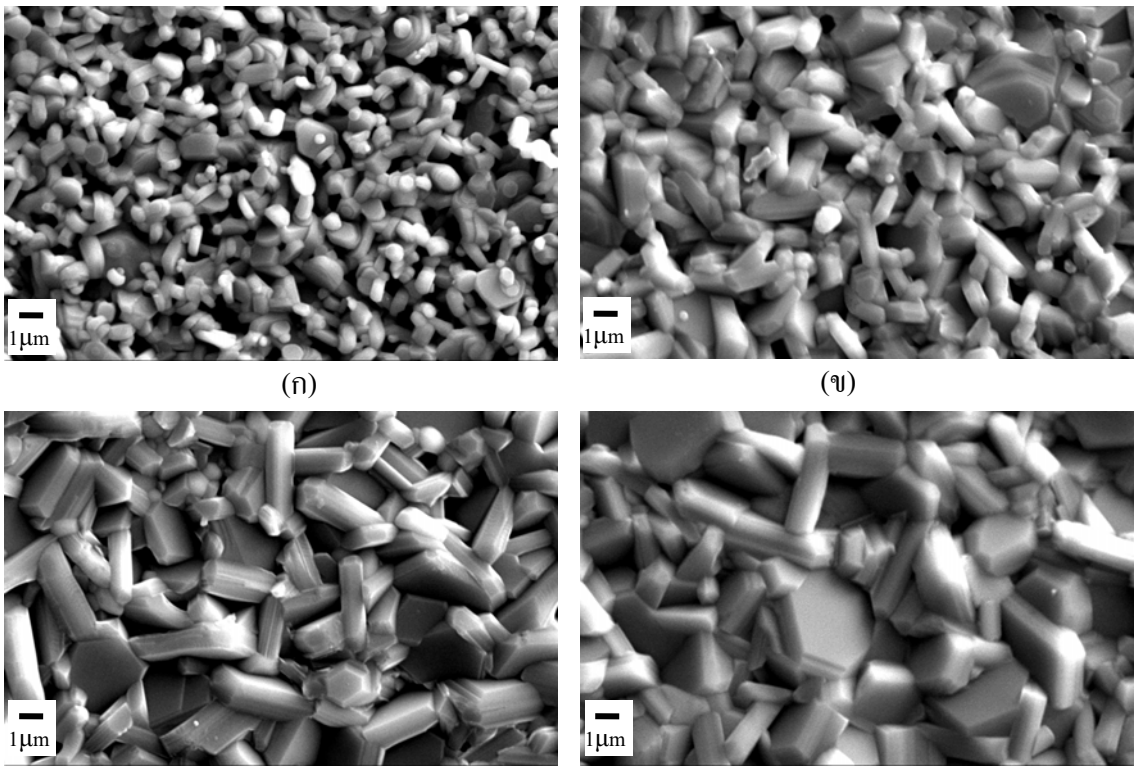


(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ x = 0.2 และ y = 0.5 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$) เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผามากขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 1150°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม สำหรับอุณหภูมิการเผา 1200°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นแท่งและเป็นแผ่นมากขึ้น และพบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1250°C เกรนมีลักษณะคล้ายกับที่อุณหภูมิการเผา 1200°C แต่มีขนาดใหญ่กว่า ส่วนอุณหภูมิการเผา 1300°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน

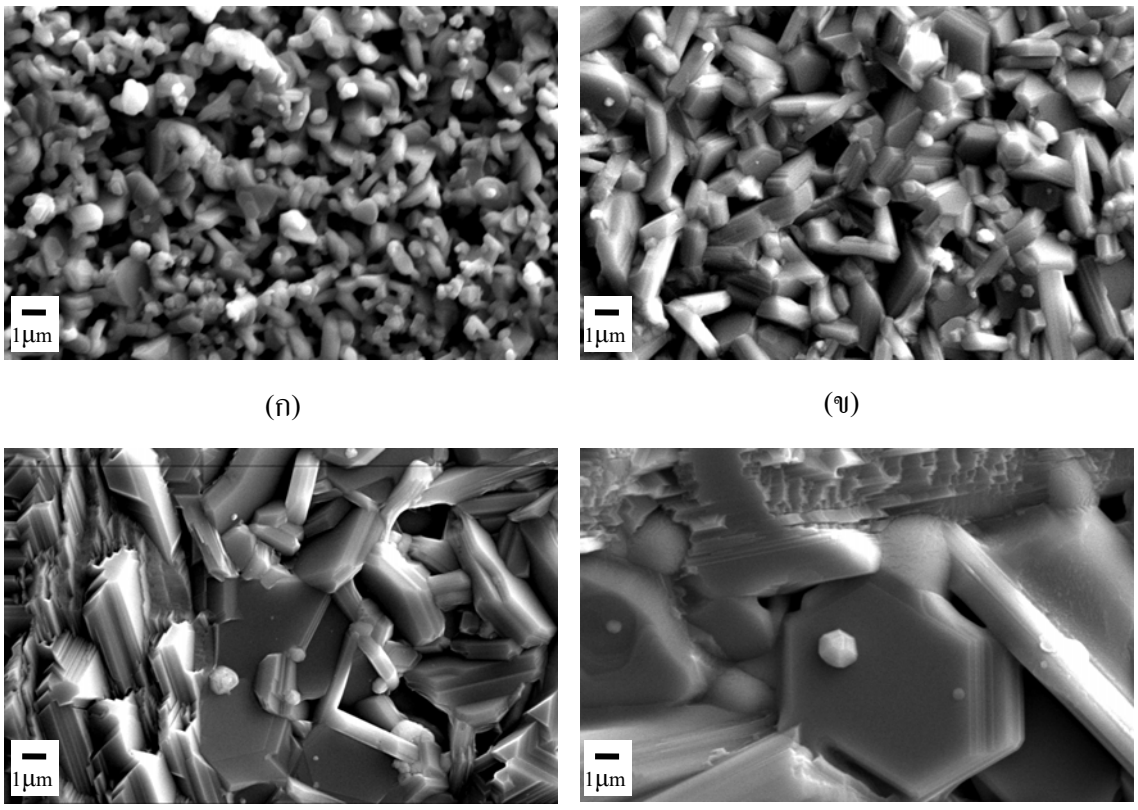


(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ(ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การศึกษาขนาดเกรนของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ x = 0.2 และ y = 1.0 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์มากขึ้นขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C เกรนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1200°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นแท่งและเป็นแผ่นใหญ่ขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะจะเป็นแผ่นมากขึ้นและมีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกัน และถ้าอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1300°C เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกรนมีลักษณะคล้ายกับเงื่อนไขการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C

4.4.3 ผลการวัดความหนาแน่น

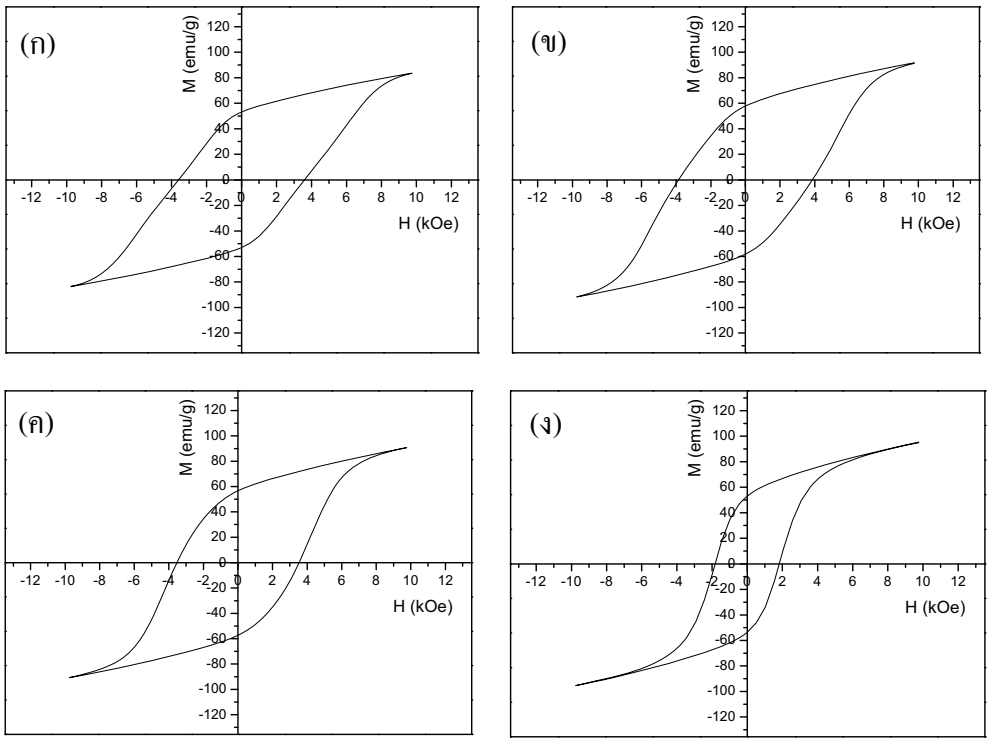
ผลการหาความหนาแน่นของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมที่ปริมาณการเจือโคบอลต์และแลนทานัมเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1150°C 1200°C และ 1250°C พบว่าเมื่อเปลี่ยนปริมาณการเจือโคบอลต์จาก y = 0.2 เป็น y = 0.5 ความหนาแน่นจะลดลง แต่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น y = 1.0 ส่วนในกรณีอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1300°C ความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลง จากตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวตามแนวรัศมีและความหนาแน่นของ Sr0.8La0.2Fe12-yCoyO19 ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C สารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเจือโคบอลต์เป็น y = 0.2 และ y = 1.0 พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มจาก 1150°C เป็น 1200°C และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1250°C แต่จะลดลงอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1300°C ส่วนในกรณีที่เจือโคบอลต์ y = 0.5 พบว่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มจาก 1150°C เป็น 1200°C แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1250°C และ 1300°C

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การหดตัวตามแนวรัศมีและความหนาแน่นของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (°C)	การหดตัวตามแนวรัศมี (%)	มวลชั่งในอากาศ (g)	มวลชั่งในน้ำ (g)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$	1150	2.17	0.2946	0.2371	5.10
	1200	4.33	0.3612	0.2898	5.04
	1250	9.56	0.3835	0.3073	5.01
	1300	18.33	0.5303	0.4218	4.87
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$	1150	11.33	0.3797	0.3041	5.00
	1200	17.14	0.4369	0.3419	4.58
	1250	18.23	0.4893	0.3869	4.76
	1300	19.41	0.5374	0.4299	4.98
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	1150	8.67	0.3876	0.3108	5.03
	1200	17.71	0.4283	0.3357	4.61
	1250	18.13	0.5086	0.4071	4.99
	1300	18.03	0.3565	0.2841	4.90

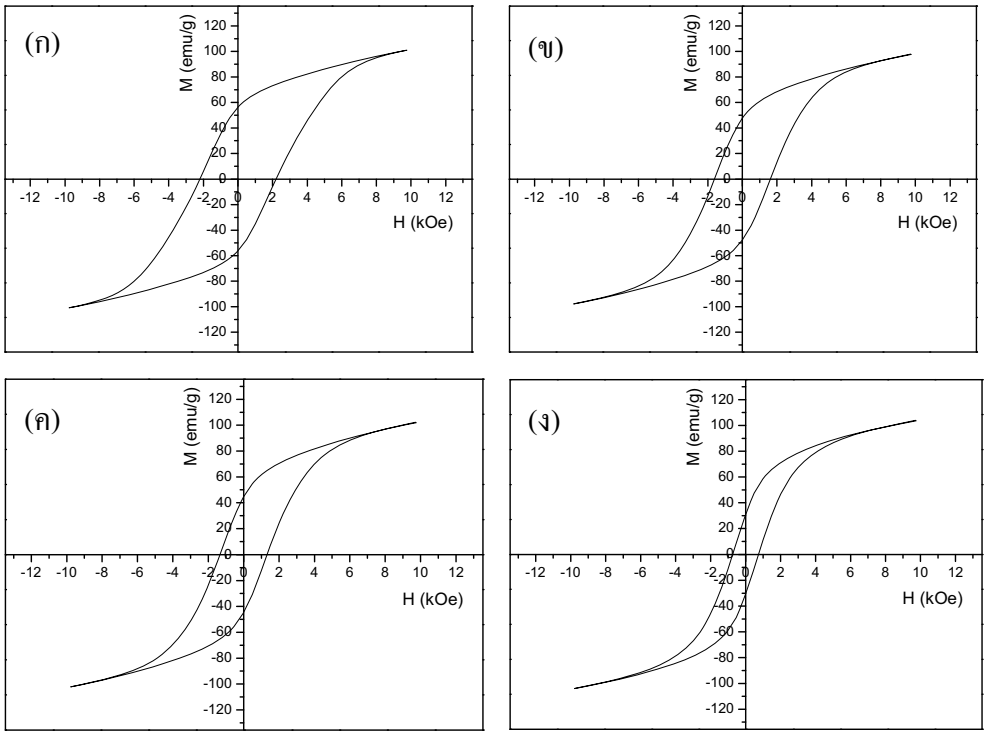
4.4.4 ผลการวัดสภาพแม่เหล็ก

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe เมื่อเจือแลนทานัมและโคบอลต์ (x = 0.2 และ y = 0.2) พบว่ารูปร่างวงฮีสเทอร์รีซีสที่อุณหภูมิการเผา 1150°C วงฮีสเทอร์รีซีสมีลักษณะเหลี่ยมมีพื้นที่วงที่มากซึ่งบอกกำลังการสูญเสียเนื่องจากวงฮีสเทอร์รีซีสที่มากด้วย เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้นพบว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมากขึ้น และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมากขึ้น ส่วนค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะลดลงดังรูปที่ 4.16 ส่วนค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เปลี่ยนจาก 1150°C เป็น 1200°C และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้น



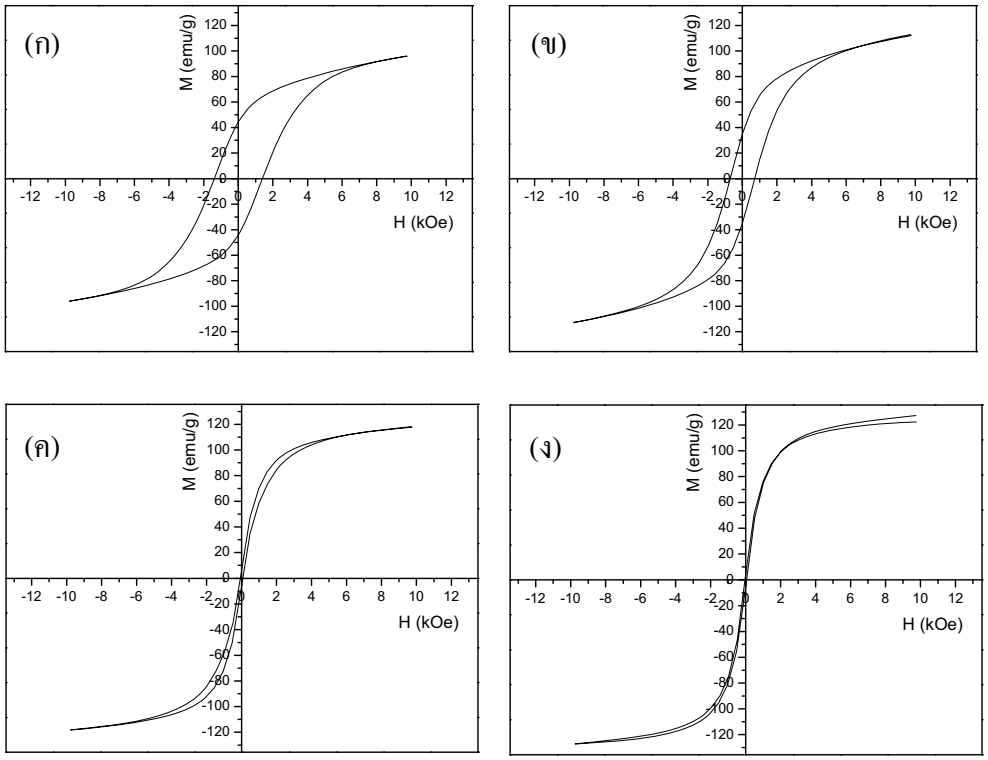
รูปที่ 4.16 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe เมื่อเจือแลนทานัมและโคบอลต์ (x = 0.2 และ y = 0.5) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะลดลง ดังรูปที่ 4.17 ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลการศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีสของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 10 kOe เมื่อเจือแลนทานัมและโคบอลต์ (x = 0.2 และ y = 1.0) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะลดลง ดังรูปที่ 4.18 และพบว่าพื้นที่ใต้กราฟของวงฮีสเทอร์รีซีสจะลดลง และมีค่าน้อยที่สุดเมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 1300°C



รูปที่ 4.18 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

บทที่ 5
การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ในบทที่ 4 นำมาวิเคราะห์หาสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในปัจจัยต่างๆ ว่ามีโครงสร้างอื่นเจือปนอยู่หรือไม่ โดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ศึกษาลักษณะและขนาดของเกรนด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในเงื่อนไขการเตรียมต่างๆ ศึกษาความหนาแน่นของสารในปัจจัยการเตรียมสารต่างๆ และศึกษาสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในปัจจัยการเตรียมสารต่างๆ จากกราฟวงฮีสเทอร์รีซีส โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน คือ สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์และสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ และผลการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในปริมาณต่างๆ ในส่วนของการเจือแลนทานัมและโคบอลต์จะศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่ปริมาณการเจือต่างๆ เมื่อเผาซินเตอร์อุณหภูมิต่างๆ ด้วย

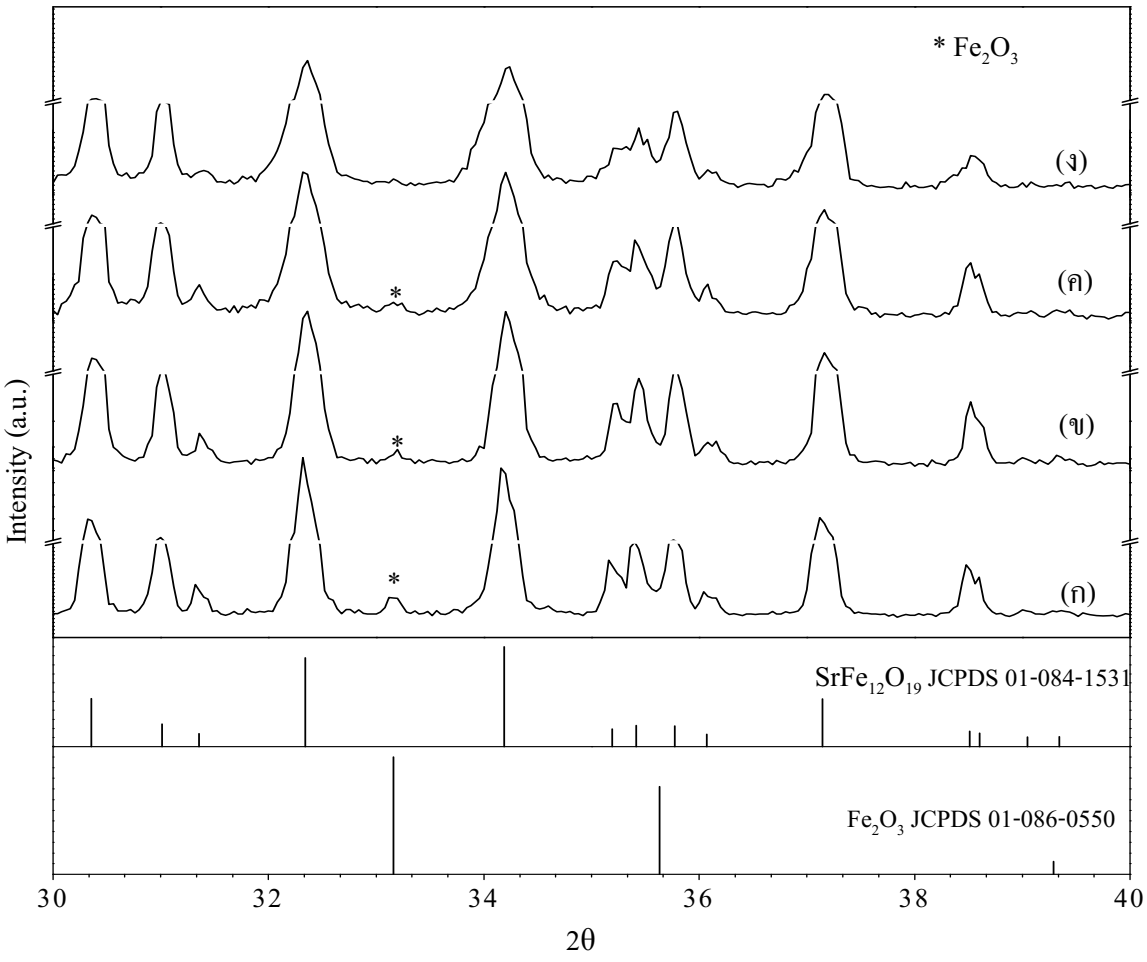
5.1 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

การวิเคราะห์จะศึกษาผลของอุณหภูมิเผาซินเตอร์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ศึกษาโครงสร้าง การวิเคราะห์ขนาดเกรนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสมบัติแม่เหล็กจากเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (VSM)

5.1.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ

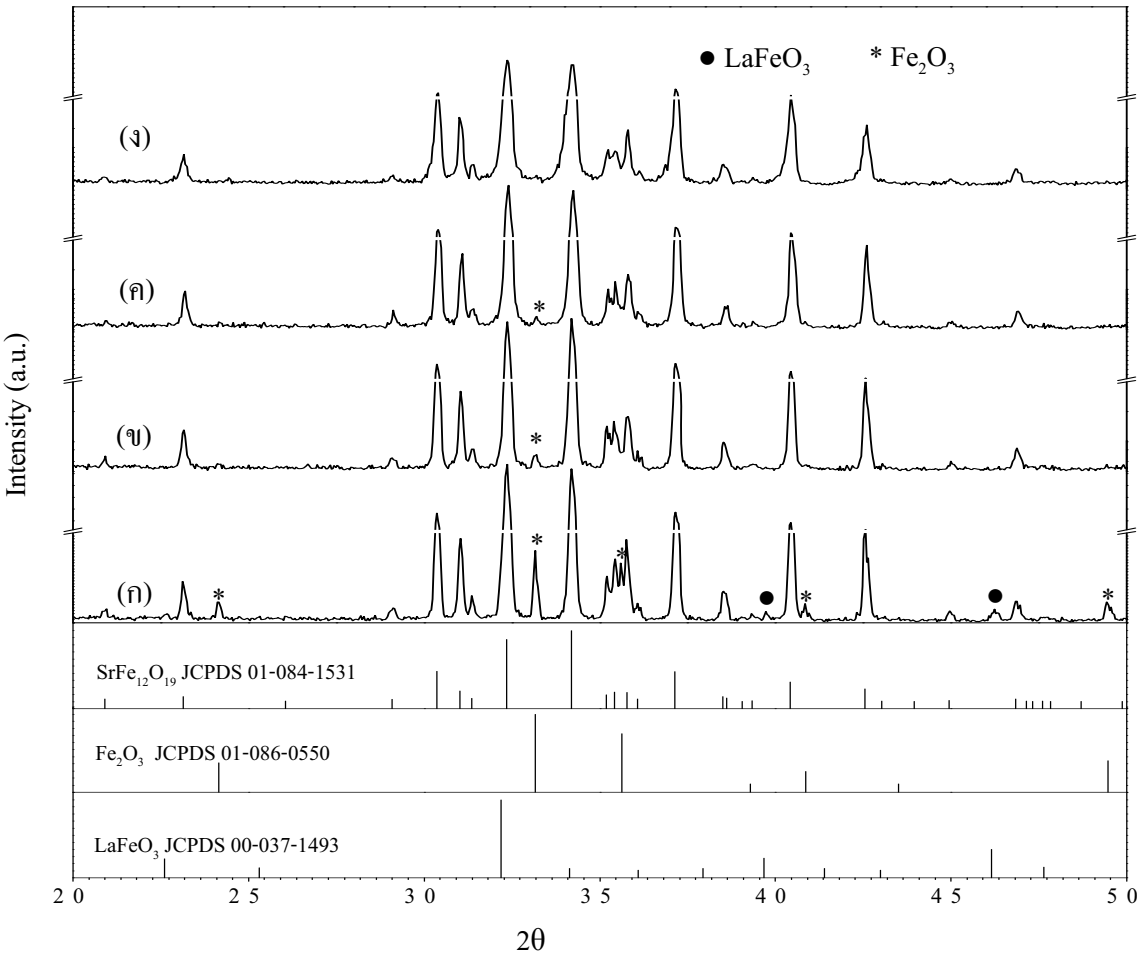
จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ พบระนาบของโครงสร้างแบบเฮกเซะโกนอลของ $SrFe_{12}O_{19}$ ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 และที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่ำจะมีเฟสอื่นร่วมอยู่ด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.1

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อเผาซินเตอร์ที่ตั้งแต่ 1150°C ถึง 1300°C จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าโครงสร้างของสารจะมีโครงสร้างเป็น $SrFe_{12}O_{19}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล และพบโครงสร้างของ Fe_2O_3 สอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-086-0550 เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่ำ ซึ่งโครงสร้างนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้นดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากโครงสร้างของ Fe_2O_3 เป็นสารตั้งต้นที่ยังคงอยู่ในโครงสร้าง สอดคล้องกับการวิจัยของ L.A. García-Cerda และคณะ [10] ที่พบว่าโครงสร้างของ Fe_2O_3 นี้จะลดน้อยลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นซึ่งทำให้มีโครงสร้าง $SrFe_{12}O_{19}$ สมบูรณ์มากขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น และผลการศึกษาของ Zai-Bing Guo และคณะ [2] ได้ศึกษาการเตรียมสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ด้วยกระบวนการ Salt-melt method เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 620 °C – 850°C พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่ำจะเกิด เฟส Fe_2O_3 แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นเป็น 850°C เฟส Fe_2O_3 จะหายไปทำให้เกิดเฟสเดี่ยวของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ สำหรับงานวิจัยนี้โครงสร้างของ Fe_2O_3 จะหายไปเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1250°C



รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $SrFe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

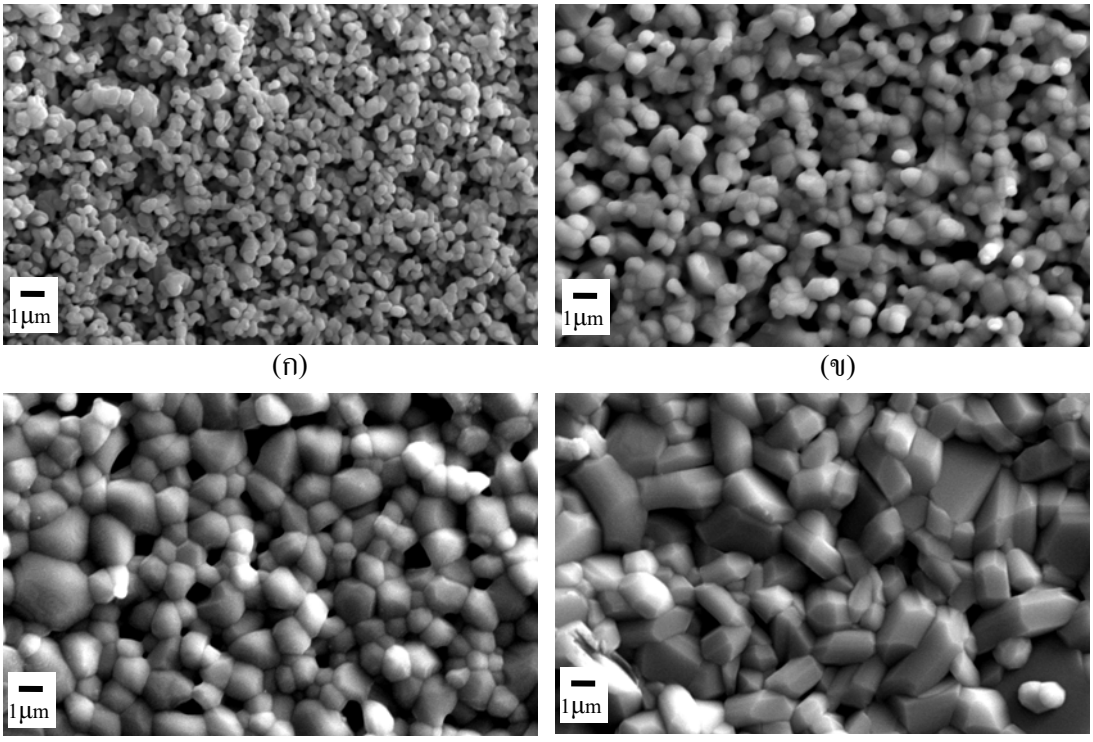
กรณีของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าโครงสร้างของสารจะมีโครงสร้างเป็น $SrFe_{12}O_{19}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล เหมือนกรณีที่ยังไม่เจือแลนทานัม แต่ที่อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C พบโครงสร้างของ $LaFeO_3$ ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 00-037-1493 และโครงสร้างของ Fe_2O_3 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นโครงสร้างของ Fe_2O_3 และ $LaFeO_3$ จะหายไป ทำให้ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ แสดงโครงสร้างเป็นแบบ $SrFe_{12}O_{19}$ มากขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้นเหมือนกรณีไม่ได้เจือแลนทานัม และผลการทดลองสอดคล้องกับการวิจัยของ Xiansong Liu และคณะ [11] ได้ศึกษาผลของการเจือ La^{3+} ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ ซึ่งเตรียมด้วยกระบวนการทางเซรามิก พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1240°C เมื่อ x = 0 ถึง 0.30 พบโครงสร้างเดี่ยวของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ แต่เมื่อเจือแลนทานัมมากขึ้นจะพบเฟส $LaFeO_3$ และ Fe_2O_3 สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าเฟสของ $LaFeO_3$ และ Fe_2O_3 จะไม่ปรากฏเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300°C และได้สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เฟสเดี่ยว



รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.1.2 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อขนาดเกรน

จากรูปที่ 5.3 แสดงขนาดของเกรนที่มีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นทั้งในกรณี $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงพลังงานอิสระของพื้นผิว (surface free energy) มีค่าสูง อธิบายได้ว่า การเผาซินเตอร์จะช่วยทำให้อนุภาคที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้ว กลายเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยการใช้ขอบเกรน เนื่องจากพลังงานพื้นฐานสำหรับการซินเตอร์นั้นได้มาจากการพยายามลดค่าพลังงานพื้นผิวของอนุภาคผง โดยอาศัยการถ่ายโอนสสารจากส่วนที่อยู่ด้านในของเกรนไปตามแนวของขอบเกรนเพื่อเข้าไปแทนที่ช่องว่างของรูพรุนที่อยู่ใกล้ๆ [12] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ M. M. Hessien และคณะ [3] ที่ได้ศึกษาสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมด้วยกระบวนการ co-precipitation พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นขนาดเกรนจะใหญ่ขึ้น

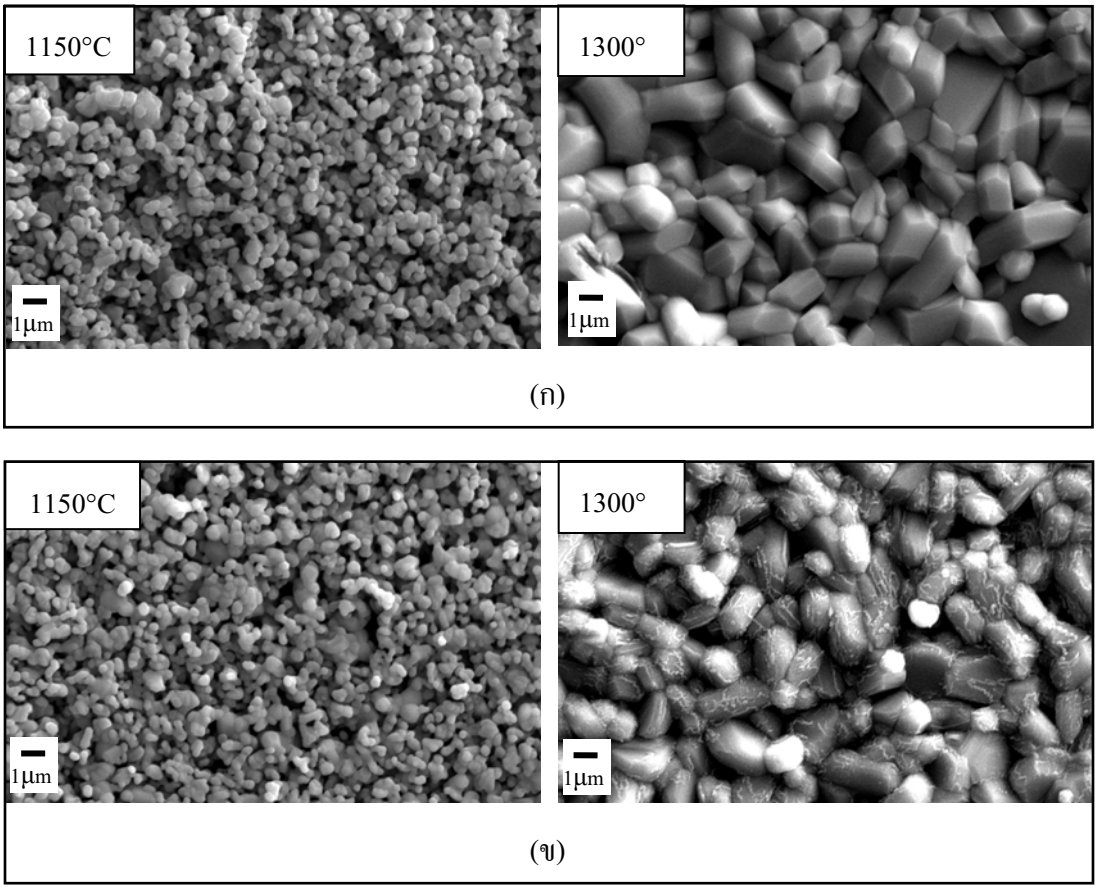


(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $SrFe_{12}O_{19}$ แสดงผลการเพิ่มขนาดของเกรนเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

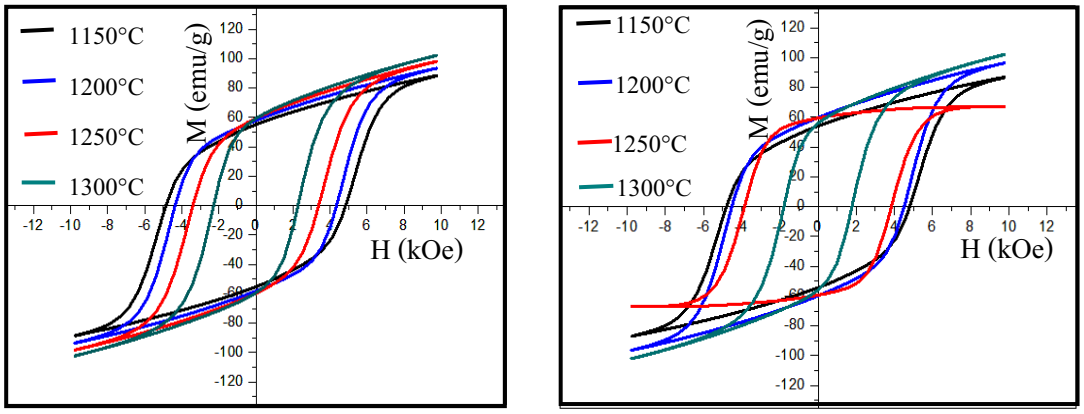
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.4 เป็นการเปรียบเทียบขนาดเกรนของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ มีขนาดเกรนใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C จากผลที่ได้นี้พบว่า การเจือแลนทานัมลงไปในสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในปริมาณ y = 0.2 ไม่มีผลต่อขนาดเกรน แต่เมื่อพิจารณาการเผาซินเตอร์ที่ 1300°C พบว่าลักษณะของเกรนจะมีความแตกต่างกัน และพบว่าเกรนของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมลดลงเมื่อเทียบกับ $SrFe_{12}O_{19}$ จากการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กเปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1150°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$

5.1.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น จากรูปที่ 4.3 และ 4.6สามารถนำมาหาสมบัติแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) สภาพแม่หล็กคงค้าง (Remanence, Mr) และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization, Ms) จากรูปที่ 5.5(ก) แสดงวงฮีสเทอร์รีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด สัมพันธ์กับพลังงานสูญเสียภายในแกน $(BH)_{max}$ ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟมากจะมีพลังงานสูญเสียในแกนมากเช่นกัน และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นเป็น 1200°C ถึง 1300°C พื้นที่ใต้กราฟจะน้อยลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานสูญเสียภายในแกนจะน้อยลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น จากกราฟพบว่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งอยู่ระหว่าง 55 – 60 emu/g ค่าสภาพแม่เหล็กอิ่มตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้นและค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับวงฮีสเทอร์รีซีสที่ได้จากการศึกษาของ M.M. Hessien และคณะ [3] ได้ศึกษาสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมด้วยกระบวนการ co-precipitation พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจาก 800°C ถึง 1100°C ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 55 – 60 emu/g ส่วนค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กมีแนวโน้มลดลง

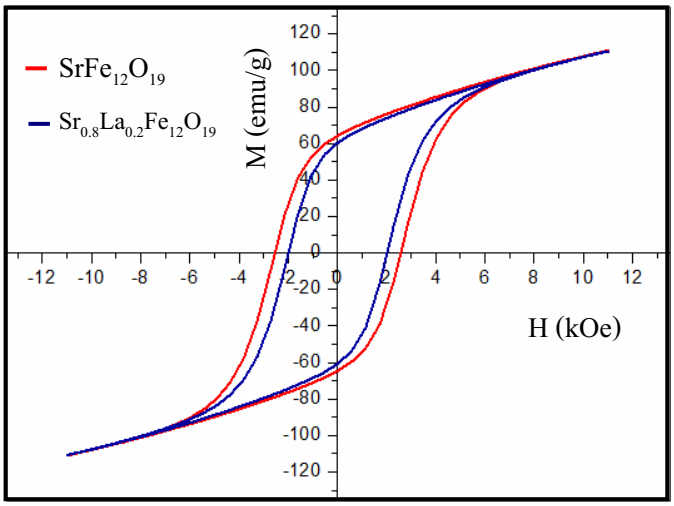


(ก) (ข)

รูปที่ 5.5 วงฮีสเทอรีซีสของ (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.5(ข) แสดงวงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ในช่วงอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C ถึง 1250°C มีค่าใกล้เคียงกัน สัมพันธ์กับขนาดเกรนในรูปที่ 4.5(ก) – (ค) ซึ่งขนาดเกรนทั้งสามกรณีมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C พบว่าขนาดเกรนในรูปที่ 4.5(ง) มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับขนาดเกรนของอุณหภูมิการเผาที่ต่ำกว่า สัมพันธ์กับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ที่ลดลงอย่างมากดังรูปที่ 5.5(ข) ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1200°C แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มเป็น 1250°C และค่าแมกเนไตเซชันนี้จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มเป็น 1300°C ส่วนค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งอยู่ในช่วง 54 – 60 emu/g

การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเกรนในรูปที่ 4.3(ง) และรูปที่ 4.4(ง) ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1300°C ลักษณะเกรนของ $SrFe_{12}O_{19}$ จะมีความเป็นเหลี่ยมมุม แต่เมื่อเจือแลนทานัมที่ปริมาณ x = 0.2 ลักษณะของเกรนจะมีความเป็นเหลี่ยมมุมลดลง เมื่อนำตัวอย่างทั้งสองมาศึกษาวงฮีสเทอร์รีซีส จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของวงฮีสเทอร์รีซีสเมื่อเจือแลนทานัมลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ในปริมาณ x = 0.2 เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1300°C พบว่า แลนทานัมที่เจือลงไปไม่ทำให้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวเปลี่ยนแปลง แต่จะทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กและสภาพแม่เหล็กคงค้างลดลง



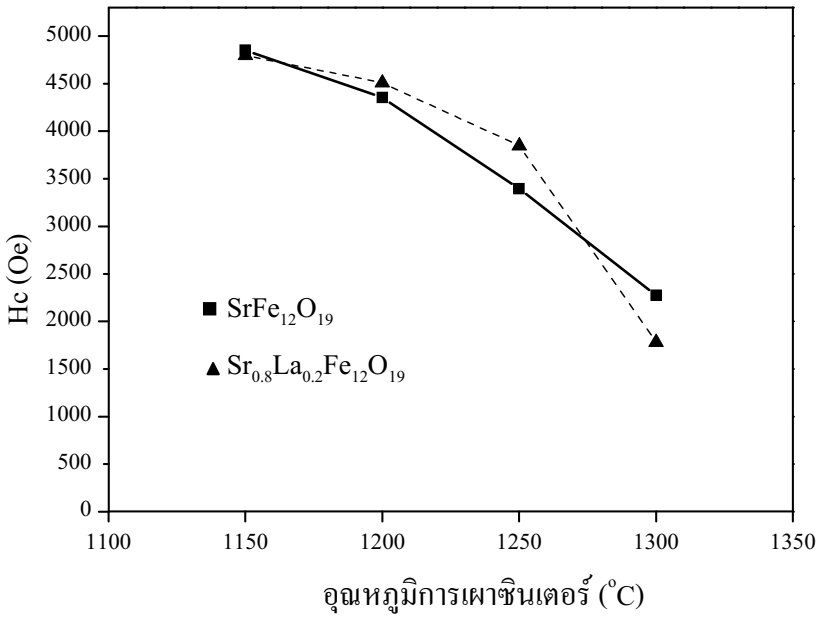
รูปที่ 5.6 วงฮีสเทอรีซีสของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ค่าสภาพแม่เหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์จากเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งผลที่ได้จะแสดงค่า สภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) แมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) และ สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr)

ตารางที่ 5.1 ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) สภาพแม่หล็กคงค้าง (Mr) และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	Hc (Oe)	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)
$SrFe_{12}O_{19}$	SF1	1150	4850	89	55
	SF2	1200	4353	94	58
	SF3	1250	3393	98	59
	SF4	1300	2273	102	59
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$	SLF1	1150	4796	87	54
	SLF2	1200	4510	96	60
	SLF3	1250	3847	67	59
	SLF4	1300	1781	102	56

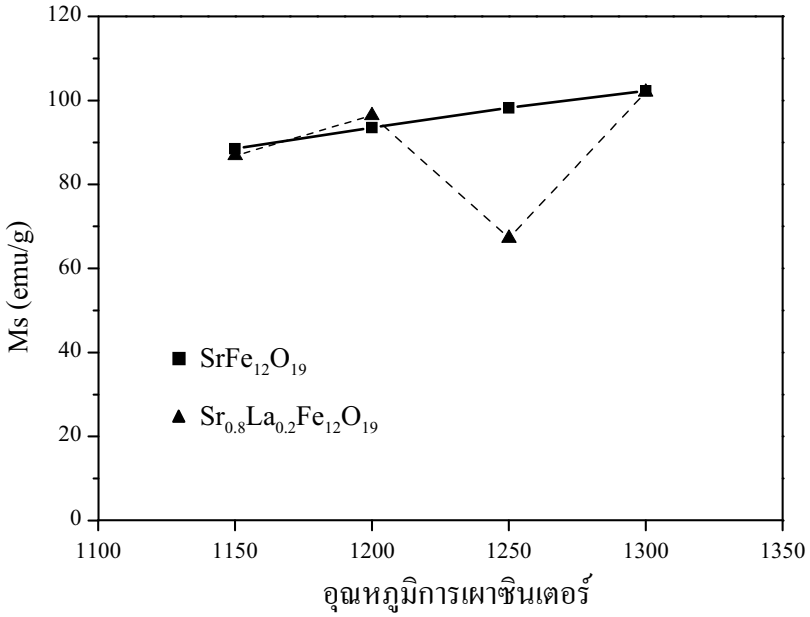
ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มมากขึ้นทั้งในกรณีของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เนื่องจากขนาดของเกรนมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ซึ่งเมื่อขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ การเคลื่อนตัวของผนังโดเมนจะเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่าย ทำให้แม่เหล็กหมดสภาพแม่เหล็กได้ง่าย ส่งผลให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) มีค่าน้อย [12-13] จากรูปที่ 5.7 พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4850 Oe เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C เมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จากการศึกษาของ Puneet Sharma และคณะ [1] ซึ่งได้สังเคราะสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยกระบวนการทางเซรามิกเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C ถึง 1300°C พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้น และได้ค่าสูงสุด 2838 Oe ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1200°C เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิซินเตอร์เท่ากันคือ 1200°C พบว่าได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) เท่ากับ 4353 Oe ซึ่งได้ค่าที่สูงกว่า



รูปที่ 5.7 ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

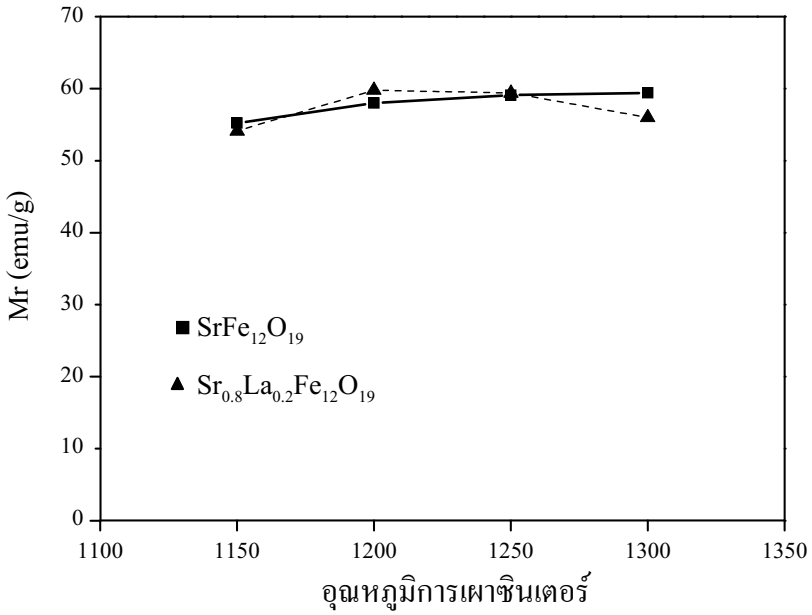
เมื่อพิจารณาค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $SrFe_{12}O_{19}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1300°C เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลของ XRD และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้าง Fe_2O_3 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ antiferromagnetic จะลดลง และจะมีโครงสร้างเดี่ยวมากขึ้น ส่งผลให้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้สมบัติความเป็นสภาพแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกมากขึ้น สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Y.P. Fu และคณะ [4] ซึ่งเตรียมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ด้วยวิธี Microwave-induced combustion เมื่อเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850°C – 1050°C พบว่าที่อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นจาก 850°C – 1050°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้าง Fe_2O_3 ที่ลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น

สำหรับค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1200°C แต่จะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เป็น 1250°C เมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 1300°C แมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ในกรณีนี้ยังไม่ทราบข้อมูลที่ชัดเจนเพื่อใช้อธิบายการลดลงของแมกเนไตเซชันอิ่มตัวที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C ซึ่งผลการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiansong Liu และคณะ [11] ซึ่งได้ศึกษาผลของการเจือ La ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ เมื่อค่า x = 0 ถึง 1.0 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1180°C – 1300°C พบว่าที่ปริมาณ x = 0.2 และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1180°C – 1300°C ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.8 ผลของค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C

ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักดังแสดงในรูปที่ 5.9 ส่วนสภาพแม่เหล็กคงค้างของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C เป็น 1200°C แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่า 1200°C ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 5.9 เมื่อพิจารณาค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1150°C และ 1250°C มีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาเดียวกัน ซึ่งพบว่าค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ระหว่าง 1150°C ถึง 1300°C จะได้ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างอยู่ระหว่าง 55 – 60 emu/g



รูปที่ 5.9 ผลของค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

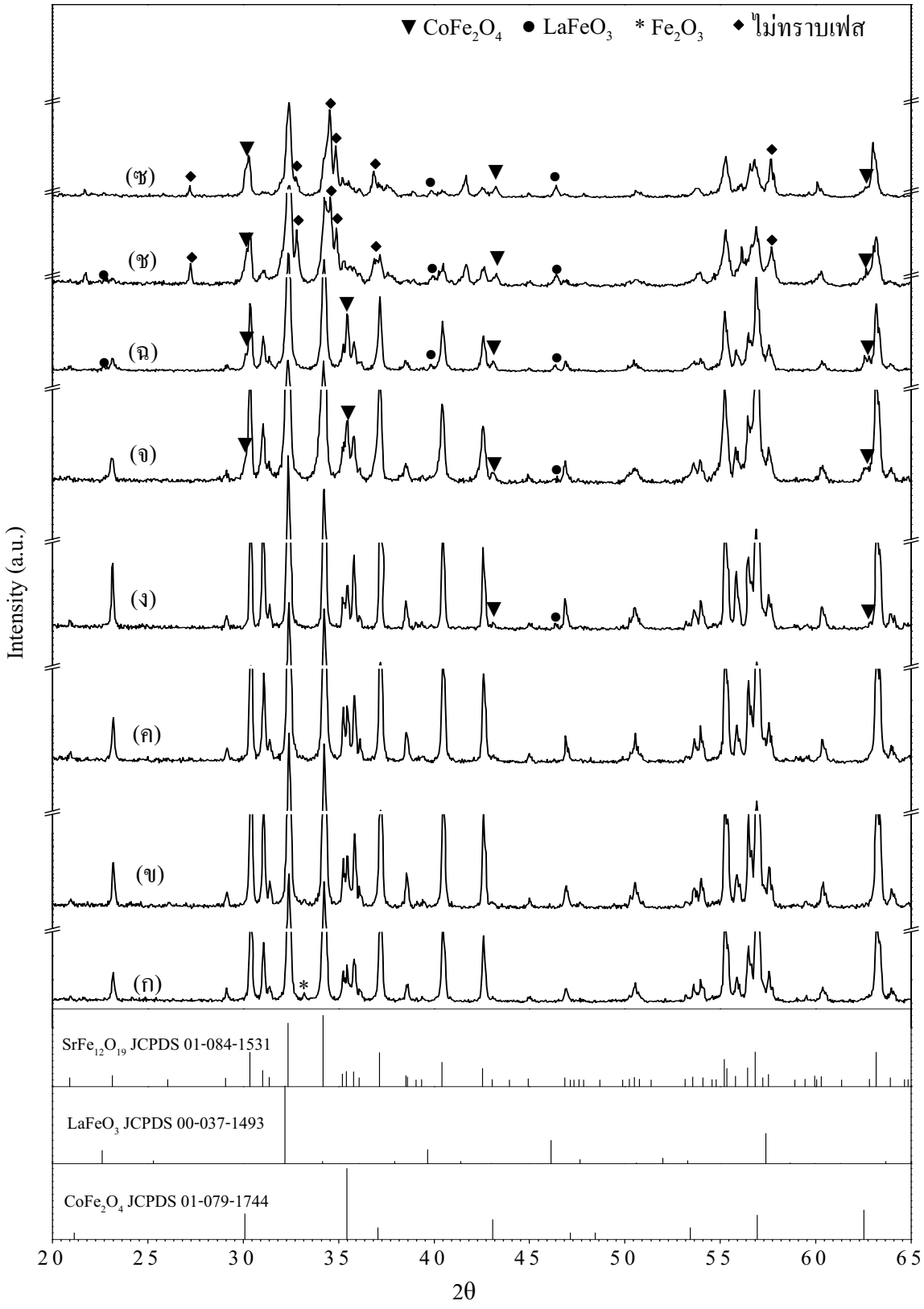
5.2 ผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์

การวิเคราะห์จะศึกษาผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ มีการเจือแลนทานัม x = 0.2 โดยที่มีการเจือโคบอลต์ y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 ในการศึกษาจะใช้ผลวิเคราะห์จาก XRD ศึกษาโครงสร้าง การวิเคราะห์ขนาดเกรนจาก SEM และศึกษาสมบัติแม่เหล็กจากเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น

5.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C ตามสูตร $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดย x = 0.2 ส่วนค่า y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 จากรูปที่ 5.10 พบว่าโครงสร้างที่ y = 0 ถึง 0.5 จะพบโครงสร้างเป็น $SrFe_{12}O_{19}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-084-1531 และพบว่าเมื่อเจือโคบอลต์ลงไปในแลนทานัมสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) โครงสร้างของ Fe_2O_3 จะลดลง เมื่อเจือโคบอลต์ในปริมาณ y = 0.1 และ 0.2 จะเกิดโครงสร้างเดี่ยวของ $SrFe_{12}O_{19}$ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ H. A. Elkady และคณะ [14] ที่พบว่าปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของโครงสร้าง Fe_2O_3

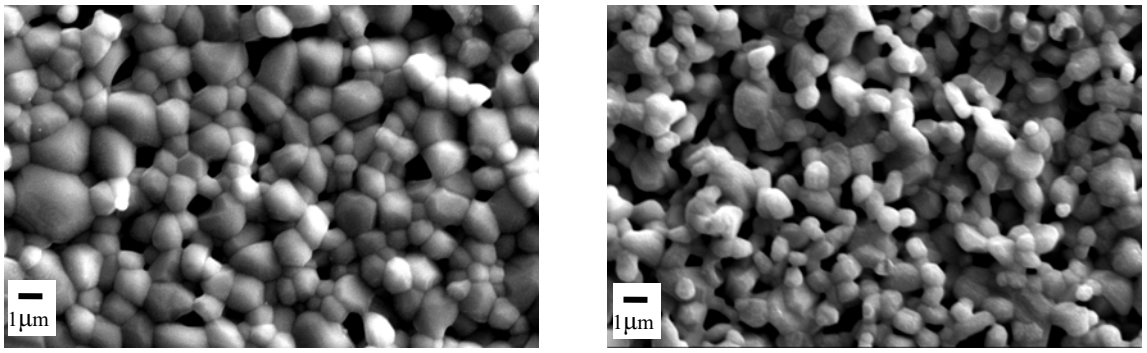
เมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น y = 0.3 พบว่าจะมีโครงสร้าง $CoFe_2O_4$ และ $LaFeO_3$ เกิดขึ้น สอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 01-079-1744 และ 00-037-1493 ตามลำดับ และเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มมากขึ้นระนาบของโครงสร้างทั้งสองก็เพิ่มมากขึ้นด้วยดังรูปที่ 5.10 เมื่อเจือโคบอลต์ลงไปเป็น 0.8 และ 1.0 พบเฟสที่ไม่สามารถระบุโครงสร้างได้เกิดขึ้น



รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเจือโคบอลต์ 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

5.2.2 ผลการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีผลต่อลักษณะของเกรน

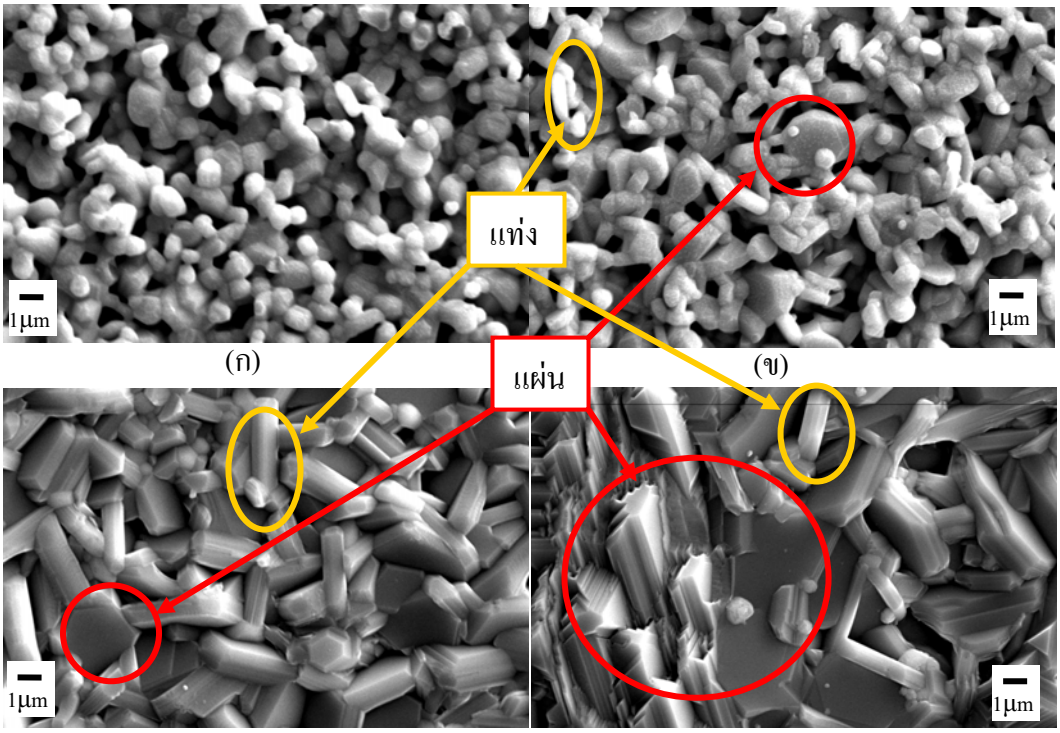
การทดลองในตอนนี้จะศึกษาผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$) ที่มีผลต่อลักษณะของเกรน เมื่อ x = 0.2 และ y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 เมื่อพิจารณาลักษณะเกรนในกรณีของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ โดยที่เป็นสารที่ยังไม่ได้เจือโคบอลต์ จากรูปที่ 5.11 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C เกรนของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $SrFe_{12}O_{19}$ มีขนาดเล็กลงเมื่อเจือแลนทานัมลงไป x = 0.2 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) ส่วนในกรณีที่เจือทั้งแลนทานัมและโคบอลต์แสดงในรูปที่ 5.12



(ก) (ข)

รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ก) $SrFe_{12}O_{19}$ และ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$

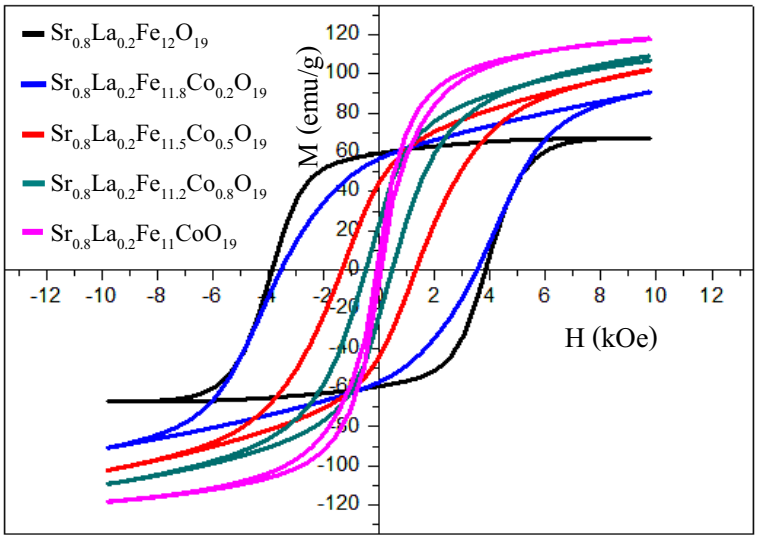
จากรูปที่ 5. 12(ก) เป็นลักษณะเกรนของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม เมื่อเจือโคบอลลงไปปริมาณ y = 0.3 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$) ลักษณะเกรนที่พบมีลักษณะเป็นแท่งยาวเพิ่มมากขึ้น และลักษณะเกรนส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นดังแสดงในรูปที่ 5.12(ข) เมื่อเจือปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น y = 0.5 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$) พบว่าขนาดเกรนที่มีลักษณะเป็นแท่งและเป็นแผ่นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 5.12(ค) เมื่อปริมาณโคบอลต์ที่เจือเพิ่มเป็น y = 1.0 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$) พบว่าเกรนที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะมีปริมาณมากขึ้น และจะเกิดการเชื่อมติดกันดังรูปที่ 5.12(ง) ทำให้ขนาดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนเกรนที่มีลักษณะเป็นแท่งจะมีปริมาณลดลง นั่นแสดงให้เห็นว่าผลของการเจือโคบอลต์มีผลต่อรูปร่างและขนาดของเกรนอย่างชัดเจน นั่นคือโบอลต์มีผลต่อการขยายตัวของเกรนอย่างชัดเจน



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อ (ก) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ (ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

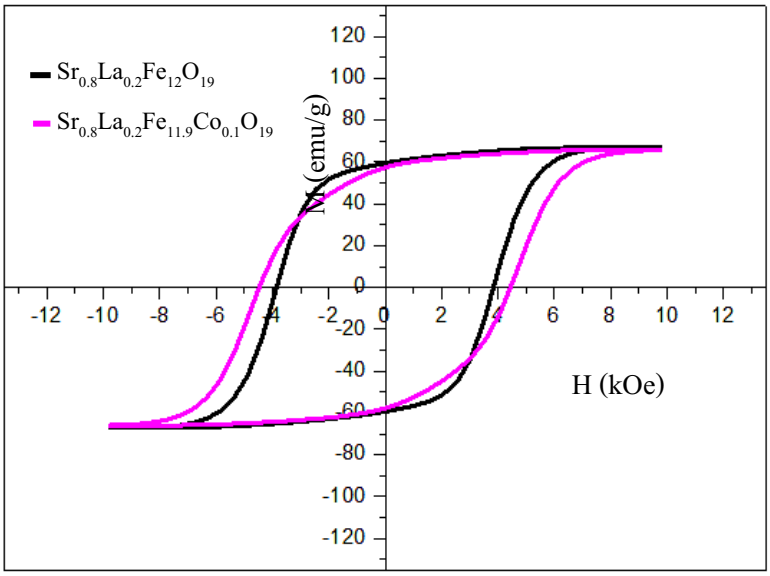
5.2.3 ผลการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็ก

วงฮีสเทอร์รีซีสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เจือแลนทานัมและโคบอลต์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C ดังแสดงในรูปที่ 5.13 กรณีที่เจือแลนทานัม ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) พบว่าปริมาณการเจือโคบอลต์และแลนทานัมมีผลต่อค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว โดยจากรูปที่ 5.13 จะเห็นว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณการเจือโคบอลต์ และค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกันมาก ส่วนค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือโคบอลต์และมีค่าแตกต่างกันมากเช่นกัน สำหรับค่าสภาพบลบล้างแม่เหล็ก มีค่าไม่แตกต่างกันมากเมื่อเจือแลนทานัมในปริมาณที่น้อย แต่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการโตขึ้นของขนาดเกรนดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยการเจือโคบอลต์ในปริมาณ y = 0.3 ขนาดเกรนจะโตขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณการเจือโคบอลต์ y = 0.2



รูปที่ 5.13 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ โดยที่ y = 0.2 0.5 0.8 และ 1.0 เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาความแตกต่างรูปร่างของวงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C แสดงในรูปที่ 5.14 จากรูปพบว่าเมื่อเจือโคบอลต์ลงไปใน $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ในปริมาณ y = 0.1 กราฟมีสภาพลบล้างแม่เหล็ก มากขึ้น ส่วนบริเวณของของกราฟมีความเป็นเหลี่ยมมุมน้อยลง จากงานวิจัยของ L. Lechevallier และคณะ [17] พบว่าปริมาณโคบอลต์ที่เจือลงไปในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์จะมีผลทำให้ขอบมุมของวงฮีสเทอร์รีซีส มีความเป็นเหลี่ยมมุมลดลง โดยโคบอลต์จะไปช่วยทำให้พลังงานของผนังโดเมนลดลง ทำให้ผนังโดเมนเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น



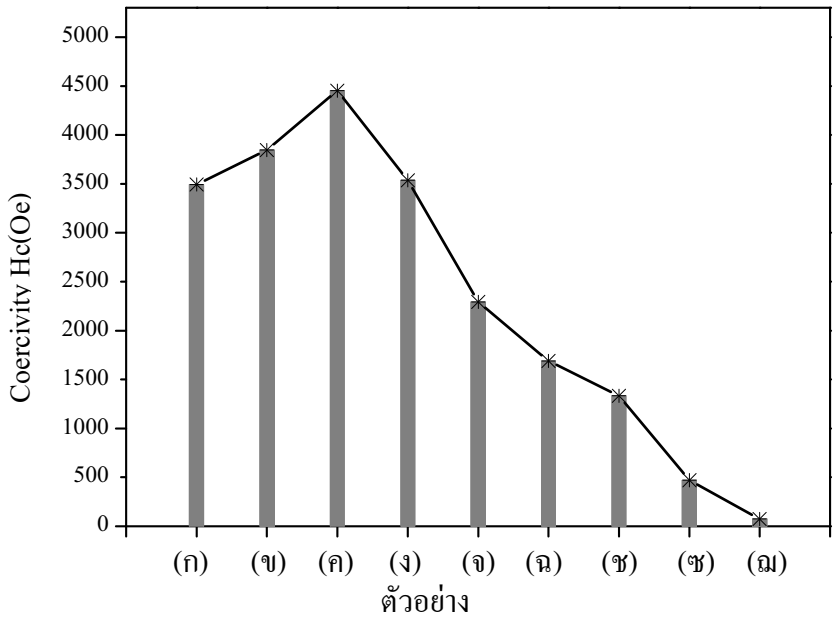
รูปที่ 5.14 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่เจือด้วยโคบอลต์ในสัดส่วน y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น ค่าสมบัติแม่เหล็กที่วัดได้ประกอบด้วยค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง (Remanence) และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization) ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ เจือแลนทานัมและโคบอลต์เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เป็น 1,250°C

ตัวอย่าง	x	y	สูตร	Hc (Oe)	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)
SF3	0	0	$SrFe_{12}O_{19}$	3493	85	59
SLF3	0.2	0	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$	3847	67	59
SLCF3-01	0.2	0.1	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$	4452	66	58
SLCF3-02	0.2	0.2	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$	3535	91	57
SLCF3-03	0.2	0.3	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$	2293	89	50
SLCF3-04	0.2	0.4	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$	1690	97	48
SLCF3-05	0.2	0.5	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$	1332	102	45
SLCF3-08	0.2	0.8	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$	471	109	23
SLCF3-10	0.2	1.0	$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	73	118	6

จากผลการทดลองพบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1250°C ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เมื่อสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือด้วยแลนทานนัมลงไป ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มลงไปในปริมาณ y = 0.1 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$) แต่เมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้น y > 0.2 เป็นต้นไป ค่า สภาพลบล้างแม่เหล็ก มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเจือโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มมากขึ้นดังได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.3 ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiangsong Liu และคณะ [11] ที่ได้ศึกษาผลของการเจือ La และ Co ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์โดยใช้กระบวนการทางเซรามิก เมื่อเผาซินเตอร์ตั้งแต่อุณหภูมิ 1200 – 1300°C เป็นไปตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ เมื่อ x = 0 ถึง 0.25 พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือโคบอลต์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ที่ Xiangsong Liu และคณะทำได้คือ 5043 Oe ส่วนในงานวิจัยนี้ทำได้สูงสุด 4452 Oe ซึ่งได้ค่าที่ต่ำกว่า



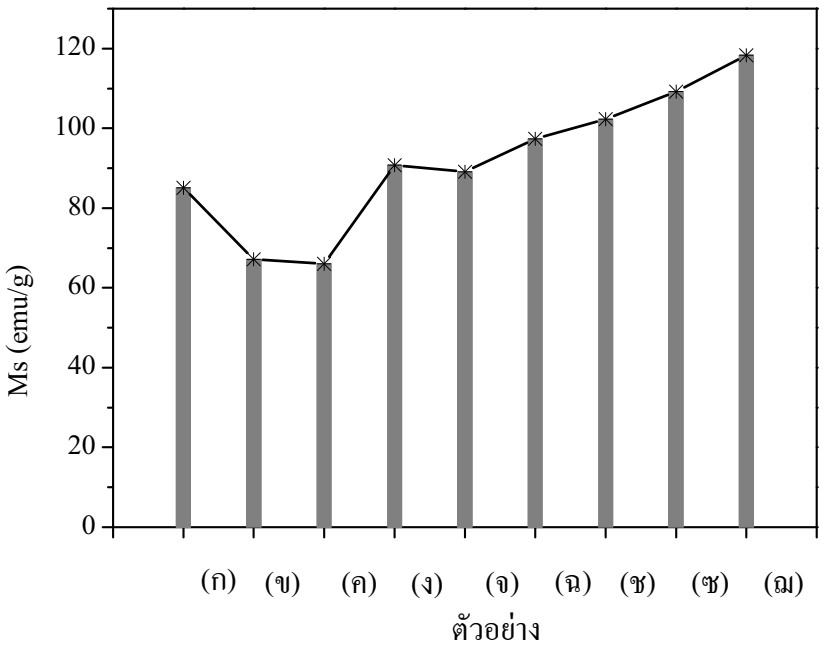
รูปที่ 5.15 ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C

(ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$

(ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$

(ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

สารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C โดยที่เจือแลนทานัม ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$) และโคบอลต์ลงไป y = 0.1 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$) ดังแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่าค่าสภาพแม่เหล็กอิ่มตัวมีค่าน้อยลง เนื่องจากในการเจือโคบอลต์ Co^{2+} จะเข้าไปแทนที่ Fe^{3+} ในตำแหน่ง 2a ซึ่งเป็นรายงานการวิจัยของ H.A. Elkady และคณะ [14] E. WU และคณะ [15] S.W. Lee และคณะ [16] และ L. Lechevallier และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาตำแหน่งของเหล็กที่ถูกแทนที่ด้วยโคบอลต์ด้วย Mössbauer เมื่อเจือโคบอลต์ในปริมาณ y = 0.1 ซึ่งเป็นปริมาณที่ยังน้อยจึงไม่ส่งผลให้แมกเนไตเซชันอิ่มตัวเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่โคบอลต์ที่เจือจะไปมีผลต่อรูปร่างวงฮีสเทอร์รีซีสซึ่งจะส่งผลให้รูปร่างวงฮีสเทอร์รีซีสมีเหลี่ยมมุมลดลง เมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มมากขึ้นเป็น y = 0.2 เป็นต้นไป ค่าสภาพแม่เหล็กอิ่มตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในปริมาณการเจือโคบอลต์สูงจะเกิดเฟส $CoFe_2O_3$ ขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้มีสภาพแม่เหล็กเป็นแบบเฟอร์ริแมกเนติก [9] ทำให้สารมีสภาพแม่เหล็กมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Xiangsong Liu และคณะ [9] และ S. W. Lee และคณะ [16] ที่ได้ศึกษาผลของการเจือ La และ Co ลงในสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ พบว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเจือแลนทานัมและโคบอลต์ตั้งแต่ x = 0 ถึง 0.25 และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแลนทานัมและโคบอลต์เพิ่มมากขึ้น โดย Xiangsong Liu และคณะ ได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวสูงสุด 73 emu/g ส่วนในงานวิจัยนี้ได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวสูงสุด 108 emu/g ซึ่งได้ค่าสูงกว่า



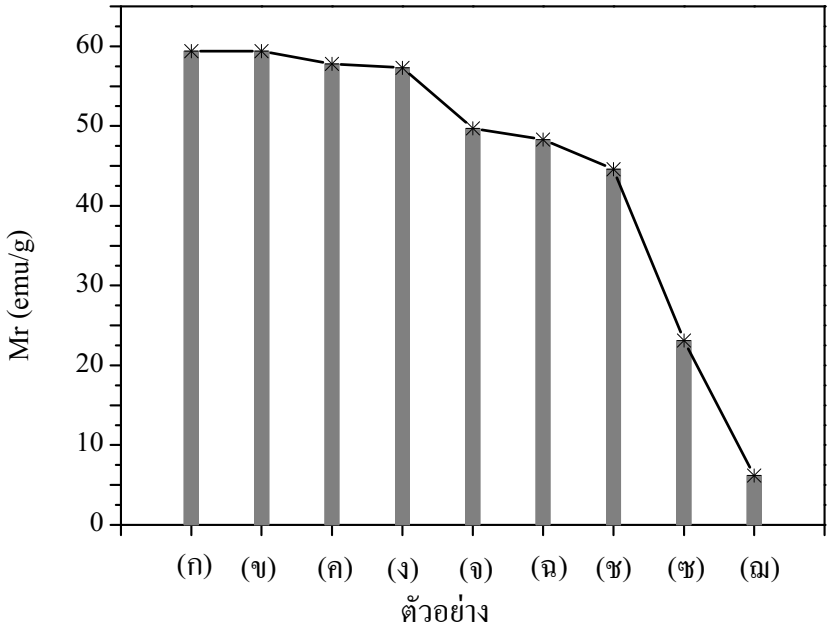
รูปที่ 5.16 ผลของค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C

(ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$

(ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$

(ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) จากรูปที่ 5.17 ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C พบว่ามีแนวโน้มคงที่ เมื่อเจือแลนทานัมกับโคบอลต์ $y \leq 0.2$ ถ้าเจือโคบอลต์เพิ่มมากขึ้น ($y > 0.2$) สภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโคบอลต์ที่เจือลงไปจะไปทำให้จุดขัดขวางน้อยลง ทำให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนลดลง ส่งผลให้ผนังโดเมนเคลื่อนตัวได้ง่าย



รูปที่ 5.17 ผลของสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของตัวอย่างเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C

(ก) $SrFe_{12}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.9}Co_{0.1}O_{19}$

(ง) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (จ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.7}Co_{0.3}O_{19}$ (ฉ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.6}Co_{0.4}O_{19}$

(ช) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ (ซ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.2}Co_{0.8}O_{19}$ และ (ฌ) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

5.3 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์

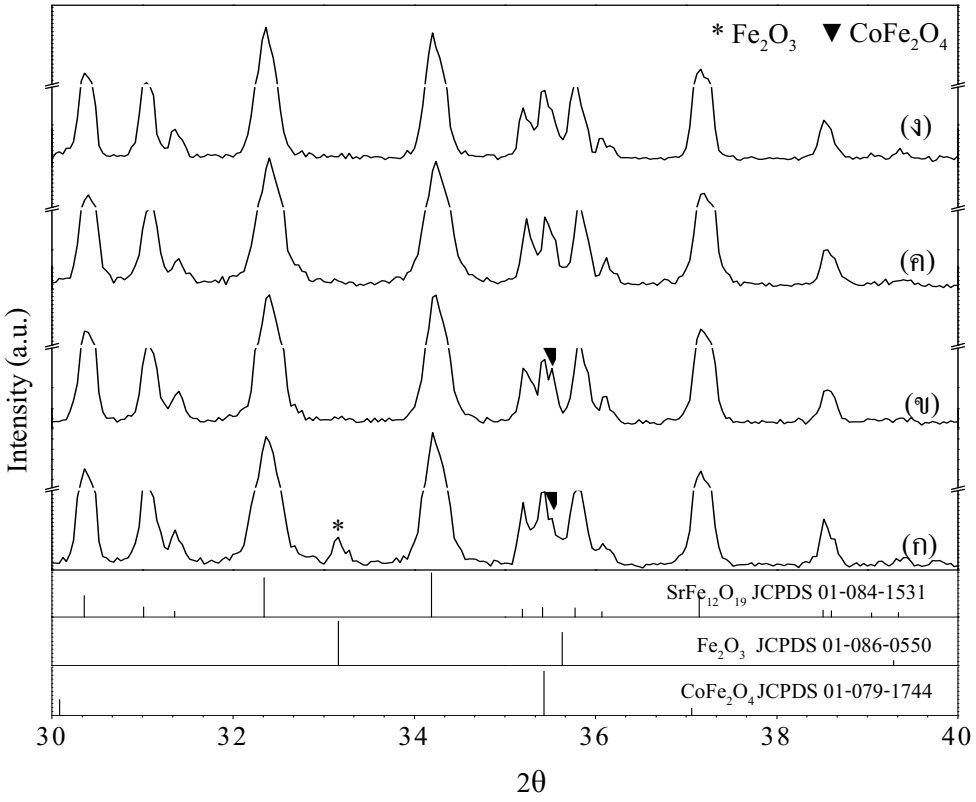
การวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ในการศึกษาจะใช้ XRD วิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก สำหรับการวิเคราะห์ขนาดเกรนจากภาพถ่ายจาก SEM และศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

ในหัวข้อนี้ใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่ผลิตขึ้นว่ามีโครงสร้างเป็นอย่างไร เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1300°C

5.3.1.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

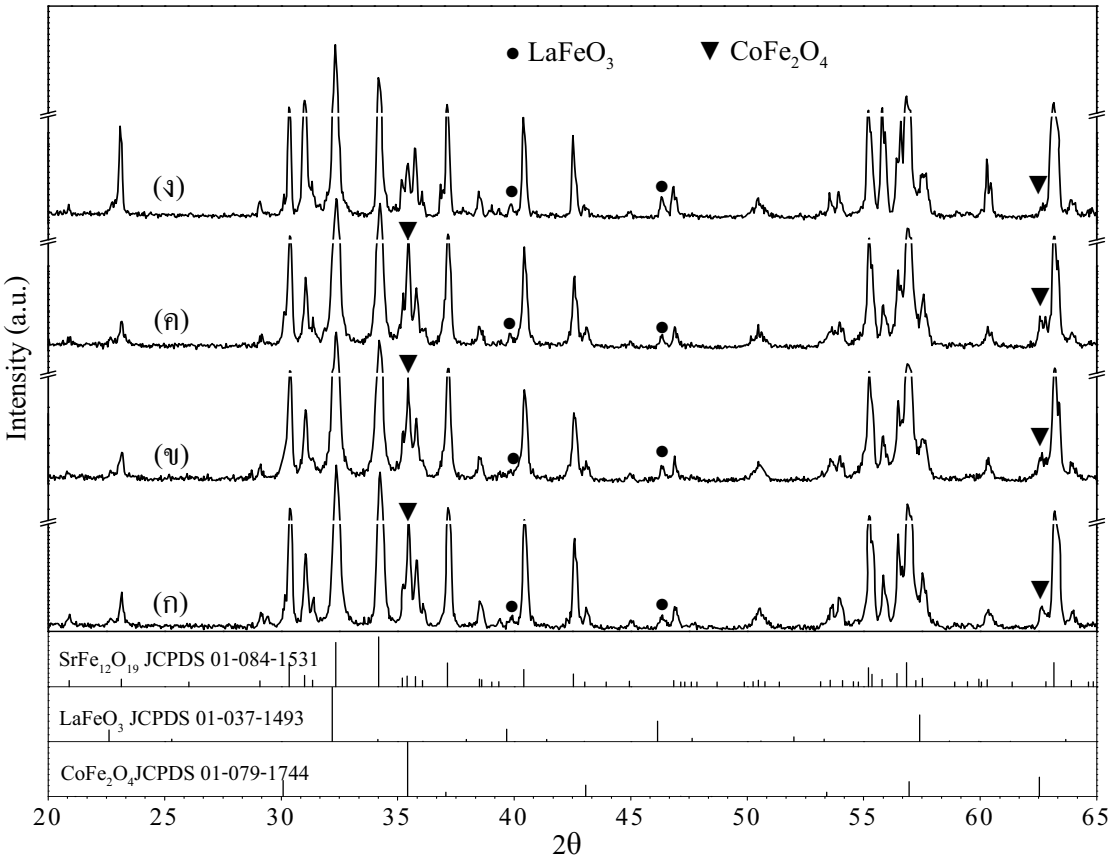
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจากผลของการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ พบว่าเกิดโครงสร้างอื่นเกิดขึ้นนอกเหนือจากโครงสร้าง $SrFe_{12}O_{19}$ ดังนั้นในการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ต้องการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างอื่นในกรณีที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (x = 0.2 และ y = 0.2) ดังรูปที่ 5.18 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1150°C มีโครงสร้าง Fe_2O_3 และ $CoFe_2O_4$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มเป็น 1200°C ของโครงสร้าง Fe_2O_3 จะหายไป ส่วนโครงสร้างของ $CoFe_2O_4$ ยังคงเหลืออยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มเป็น 1250°C และ 1300°C จะพบเฉพาะโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ เพียงโครงสร้างเดียว



รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.3.1.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

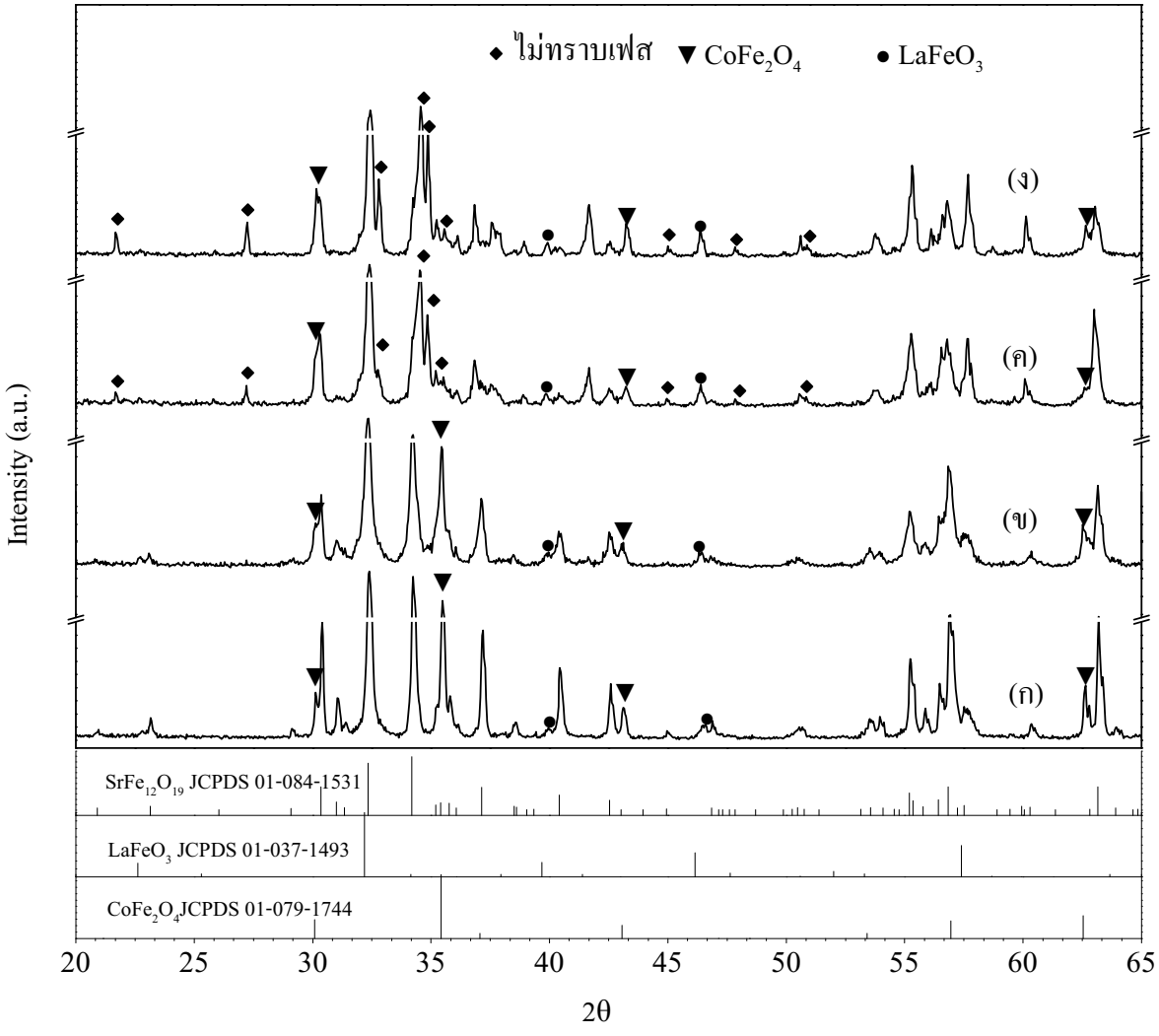
ในส่วนการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ (x = 0.2 และ y = 0.5) เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5.19 พบว่าโครงสร้างหลักจะเป็นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ และจะเกิดโครงสร้าง $LaFeO_3$ และ $CoFe_2O_4$ เกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1150°C เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นเฟสของ $CoFe_2O_4$ จะลดลง และพบว่าเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C ทั้ง $LaFeO_3$ และ $CoFe_2O_4$ ยังคงมีโครงสร้างนี้เหลืออยู่เนื่องจากในสารไม่มีความสมดุลของประจุจึงเกิดโครงสร้างอื่นขึ้น



รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.3.1.3 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

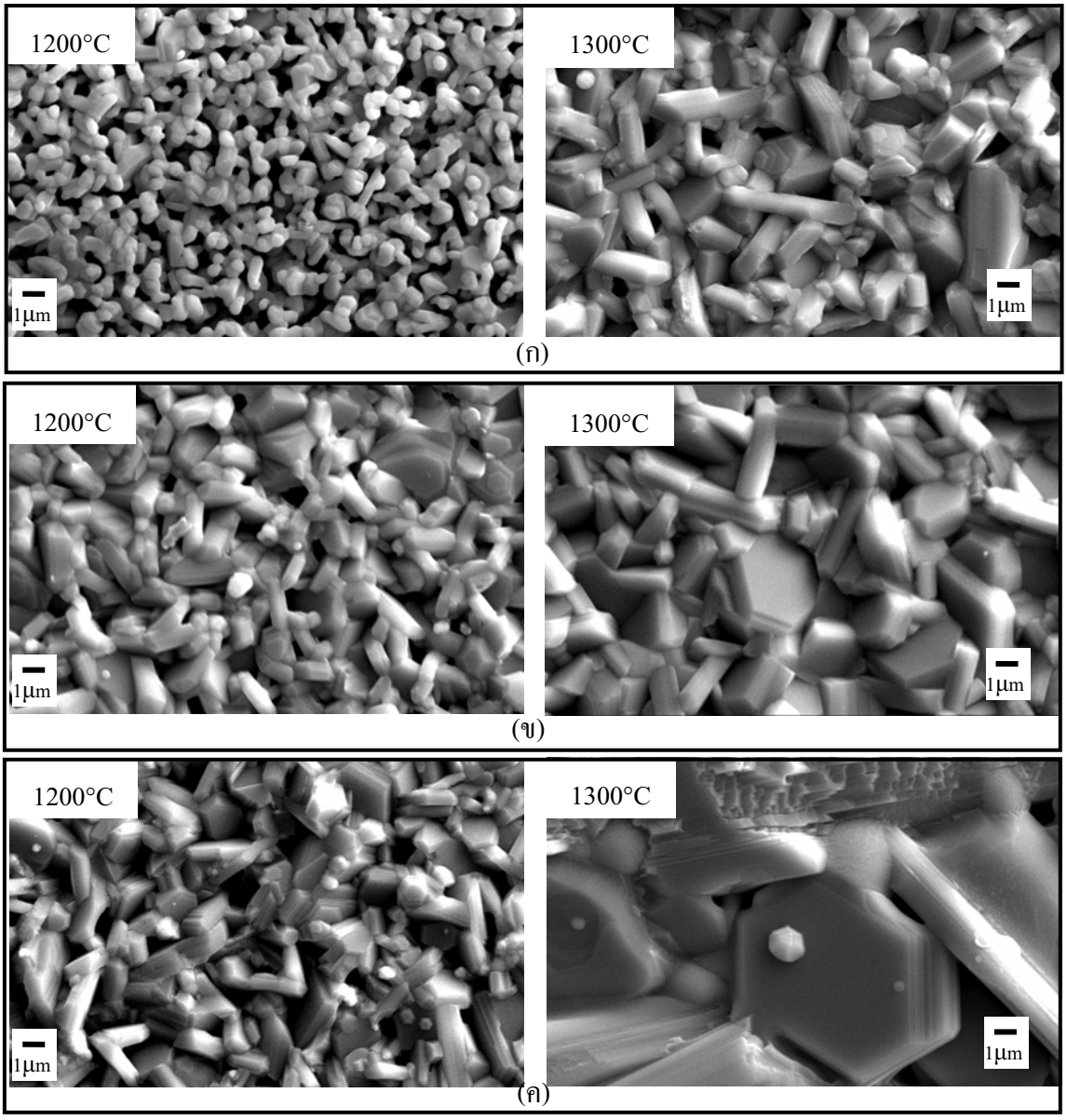
ในส่วนการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เจือแลนทานัมและโคบอลต์ตามสูตร $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ (x = 0.2 และ y = 1.0) เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.20 พบว่าโครงสร้างหลักจะเป็นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ และจะเกิดระนาบของโครงสร้าง $LaFeO_3$ และ $CoFe_2O_4$ เกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1150°C เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นระนาบที่ไม่ทราบโครงสร้างของสารใดจะเกิดขึ้น ส่วนระนาบของ $CoFe_2O_4$ และ $LaFeO_3$ ยังคงเหลืออยู่เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นเป็น 1300°C และพบระนาบของโครงสร้างที่ไม่สามารถระบุได้เกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1250°C



รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1150°C (ข) 1200°C (ค) 1250°C และ (ง) 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.3.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดเกรนของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1200°C และ 1300°C ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ดังรูปที่ 5.21 พบว่าอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์มีผลต่อขนาดของเกรนอย่างชัดเจน

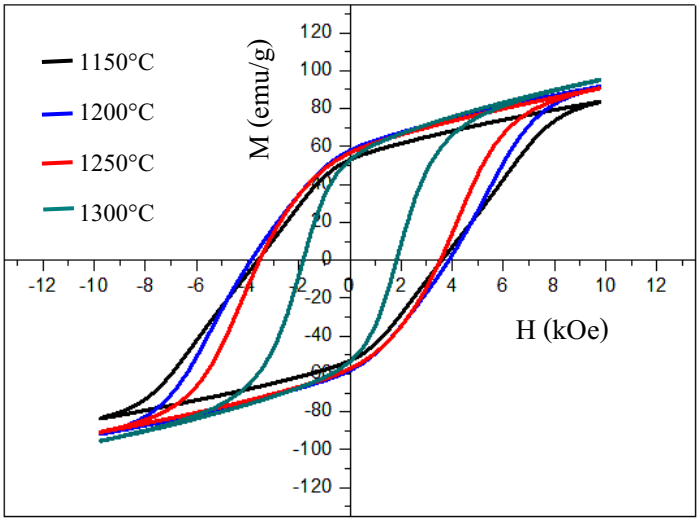


รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของตัวอย่าง (ก) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ (ข) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ (ค) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

จากรูปที่ 5.21 แสดงลักษณะเกรนของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C และ 1300°C พบว่า ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเจือโคบอลต์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการขยายใหญ่ขึ้นของเกรนเมื่อเจือปริมาณโคบอลต์เพิ่มมากขึ้น พบว่าเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C เกรนจะมีการขยายมากกว่าเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C

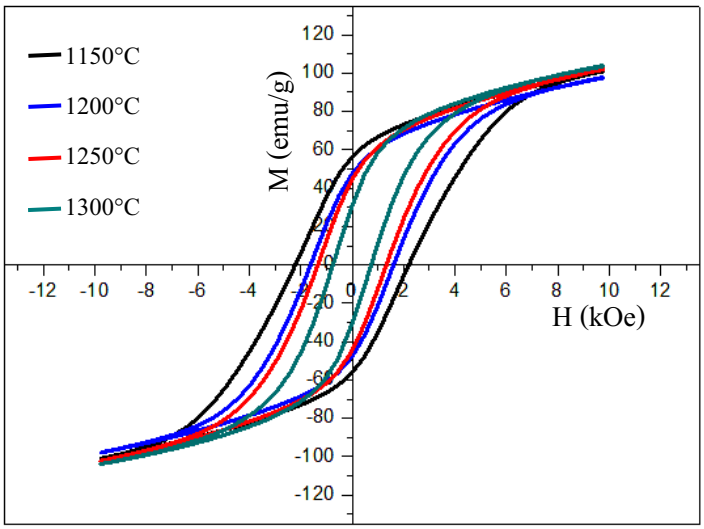
5.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างกัน

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C และ 1250°C ดังแสดงในรูปที่ 5.22 พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของวงฮีสเทอร์รีซีสจะมีค่าใกล้เคียงกัน สัมพันธ์กับขนาดเกรนในรูปที่ 4.13(ก) – (ค) ซึ่งขนาดเกรนของอุณหภูมิการเผาทั้งสามมีขนาดไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C ขนาดเกรนจะโตขึ้นมาก ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของวงฮีสเทอร์รีซีสที่ลดลงอย่างมาก ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งอยู่ระหว่าง 53 – 57 emu/g ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 1150°C เป็น 1200°C พบว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีค่าสูงขึ้นจาก 84 emu/g เป็น 92 emu/g แต่เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่าค่าแมกเนไตเซชันมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากซึ่งอยู่ระหว่าง 92 – 95 emu/g



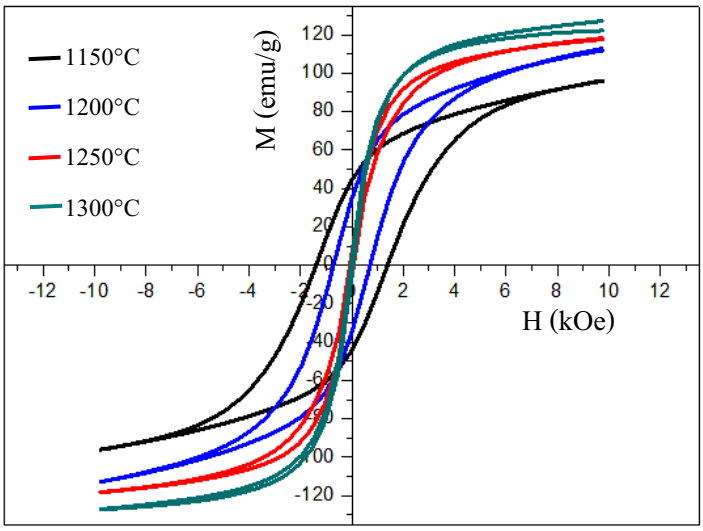
รูปที่ 5.22 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.23 รูปร่างของวงฮีสเทอร์รีซีสมีลักษณะคล้ายกัน แต่กราฟจะแคบลง (สภาพลบล้างแม่เหล็ก ลดลง) เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นดังตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นแสดงในรูปที่ 4.14 โดยค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะค่อยๆ ลดลงตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น ซึ่งค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งจากอุณหภูมิการเผา 1150°C เป็น 1300°C ส่วนสภาพแม่เหล็กคงค้างจะมีแนวโน้มลดลงเช่นกันเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น โดยจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งจากอุณหภูมิการเผา 1150°C เป็น 1300°C ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีการเปลี่ยนแปลงน้อย



รูปที่ 5.23 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.24 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดเกรนของเกรนที่โตขึ้นอย่างมากตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 ส่วนสภาพแม่เหล็กคงค้างลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น เมื่อพิจารณารูปร่างวงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น วงฮีสเทอร์รีซีสจะแคบลงทำให้มีความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน (Soft magnetic) มากขึ้น



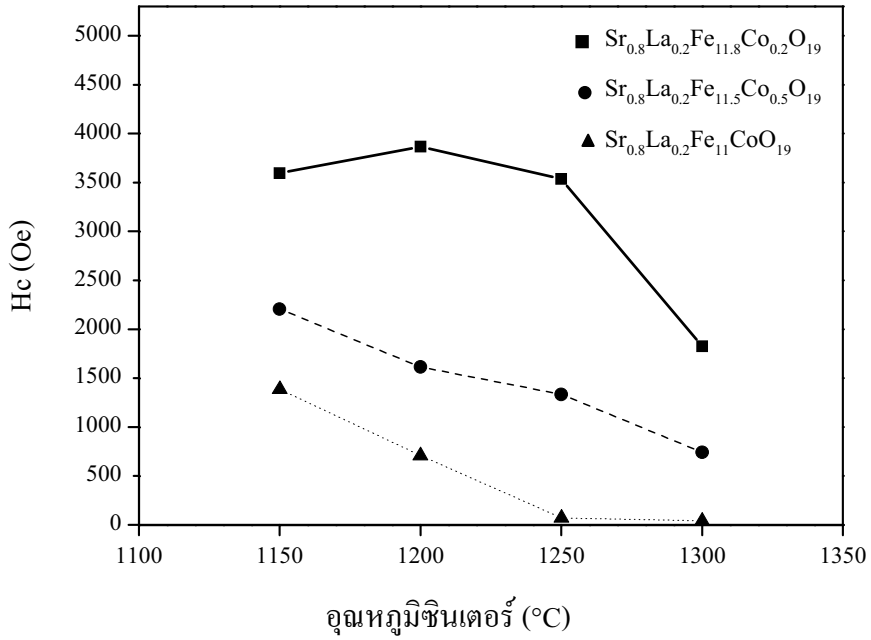
รูปที่ 5.24 วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

วงฮีสเทอร์รีซีสของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ที่วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น ค่าสมบัติแม่เหล็กที่วัดได้ประกอบด้วยค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก สภาพแม่หล็กคงค้าง (Remanence) และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวแสดงตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) สภาพแม่หล็กคงค้าง (Mr) และค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ

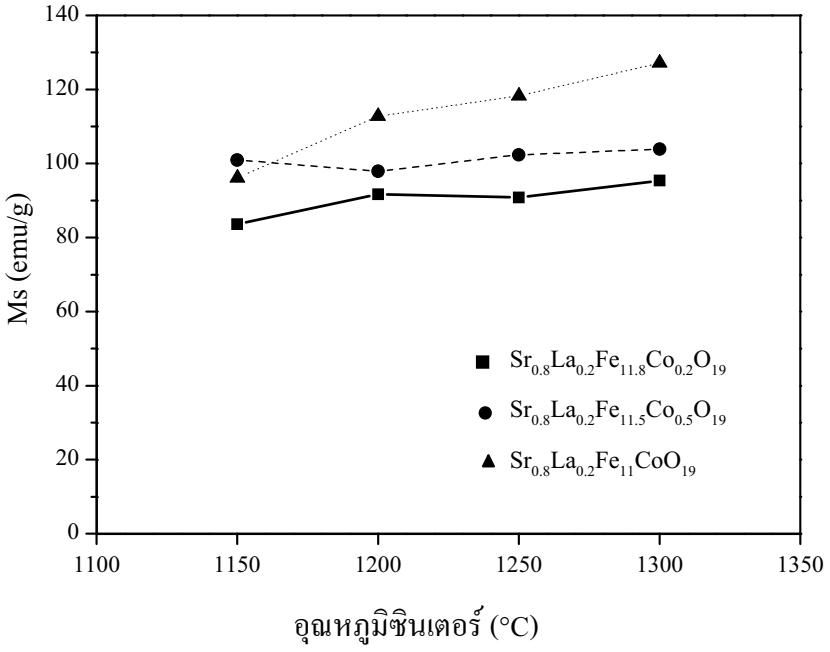
ตัวอย่าง	รหัส	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	Hc (Oe)	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$	SLCF1-02	1150	3597	84	53
	SLCF2-02	1200	3867	92	58
	SLCF3-02	1250	3535	91	57
	SLCF4-02	1300	1824	95	53
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$	SLCF1-05	1150	2205	101	56
	SLCF2-05	1200	1614	98	48
	SLCF3-05	1250	1332	102	45
	SLCF4-05	1300	744	104	31
$Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$	SLCF1-10	1150	1387	96	44
	SLCF2-10	1200	711	119	35
	SLCF3-10	1250	73	118	6
	SLCF4-10	1300	44	127	4

จากรูปที่ 5.25 แสดงค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C ถึง 1200°C และมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1300°C สำหรับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ มีแนวโน้มลดลงตามการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเกรน นั่นคือขนาดเกรนใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กลดลง และค่าที่ได้พบว่า ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เดียวกัน ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก จะลดลงเมื่อปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Co ที่เจือลงไปจะไปทำให้พลังงาน exchange ลดลง [19] ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ของตัวอย่างทั้งสามที่ได้ค่ามากที่สุดได้จาก $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C ซึ่งมีค่า 3868 Oe



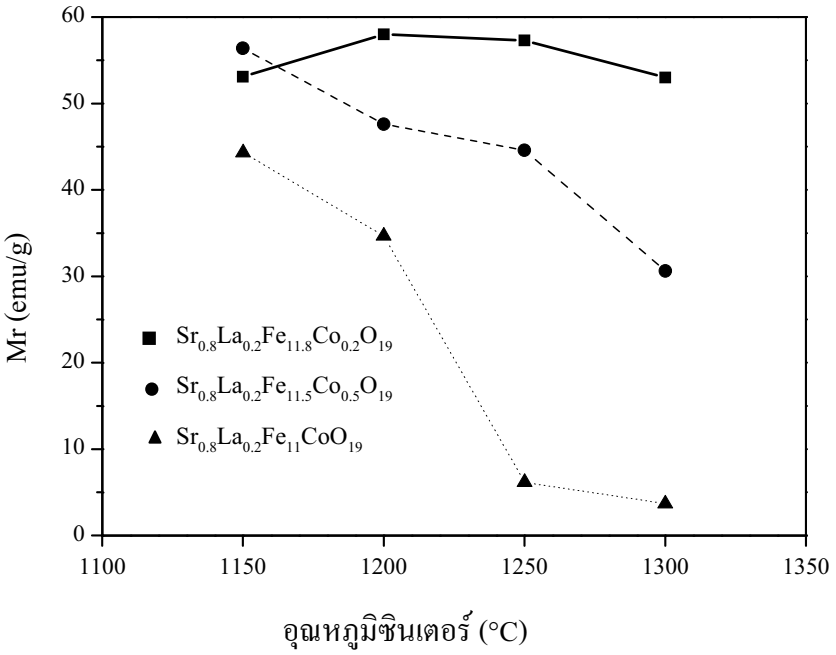
รูปที่ 5.25 ผลของค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C จากรูปที่ 5.26 พบว่า ปริมาณในการเจือโคบอลต์มีผลต่อค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว ซึ่งเมื่อเจือโคบอล์มากขึ้นค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ มีแนวโน้มคงที่เมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าเมื่อเจือโคบอลต์ในปริมาณ y = 1.0 ลงไปจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กมีปริมาณมากขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่อเจือโคบอลต์มากขึ้นจะเกิดโครงสร้างอื่นนอกเหนือจากโครงสร้าง $SrFe_{12}O_{19}$ ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวที่มีค่าสูงที่สุด 127 emu/g ได้จากอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1300°C ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ซึ่งค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกเมื่อเจือปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C



รูปที่ 5.26 แมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

พิจารณสภาพแม่เหล็กคงค้างจากรูปที่ 5.27 พบว่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีค่าขึ้นกับปริมาณการเจือโคบอลต์ โดยที่ปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้นค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจากอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1200°C ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มลดลง เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 1150°C ถึง 1300°C ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ค่าลดลง และได้ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างต่ำที่สุดคือ 4 emu/g เมื่อเจือโคบอลต์ y = 1.0 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C พิจาณาจากรูปที่ 5.27 พบว่าปริมาณการเจือโคบอลต์มีผลต่อการลดลงของค่าแมกเนไตเซชันเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้น นั่นคือเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นการเจือโคบอลต์มากจะทำให้ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างลดลงได้มากกว่าในกรณีที่เจือโคบอลต์น้อย ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ถ้าเจือโคบอลต์มากกว่า y = 1.0 หรือเผาซินเตอร์ให้อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มจะมีค่าน้อยกว่า 4 emu/g



รูปที่ 5.27 สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

บทที่ 6
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของสารแม่เหล็กสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ ที่ผลิตด้วยกระบวนการทางเซรามิก และศึกษาผลของปริมาณแลนทานัมและโคบอลต์ที่เจือลงในสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เป็นไปตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

6.1.1 ผลของอุณหภูมิของการเผาซินแตอร์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิซินเตอร์ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นโครงสร้างของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ที่เตรียมได้จะมีโครงสร้างเป็นสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ และพบว่า $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ จะมีเฟสของโครงสร้างสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์เฟสเดียวเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C
2) เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กมีแนวโน้มลดลงทั้ง $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$
3) ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1250°C แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1300°C
4) สภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ของ $SrFe_{12}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1150°C ถึง 1300°C

6.1.2 ผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงใน $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$

จากการศึกษาผลของปริมาณการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ลงใน $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็น 1250°C เมื่อ y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 สรุปได้ดังนี้

1) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่เตรียมได้จะเกิดเฟสของโครงสร้างสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ทุกปริมาณการเจือโคบอลต์
2) $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12-y}Co_yO_{19}$ ที่เตรียมได้จะกลายเป็นเฟสเดียวเมื่อเจือโคบอลต์ในปริมาณ y = 0.1 และ y = 0.2 ส่วนในการเจือโคบอลต์ที่ปริมาณ y > 0.2 จะพบเฟสอื่น เช่น $LaFeO_3$ $CoFe_2O_4$ และเฟสที่ยังไม่ทราบ

3) ปริมาณการเจือโคบอลต์มีผลต่อขนาดของเกรน โดยปริมาณโคบอลต์ที่เจือเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น
4) เมื่อสารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เจือแลนทานัม (x = 0.2) และโคบอลต์ (y > 0.2) พบว่าค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างมีค่าลดลงตามปริมาณการเจือโคบอลต์ที่มากขึ้น
5) สภาพแม่หล็กคงค้างมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการเจือโคบอลต์มากขึ้น

6.1.3 ผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C ของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์เมื่อปริมาณการเจือแลนทานัมเป็น x = 0.2 และปริมาณโคบอลต์เป็น y = 0.2 0.5 และ 1.0 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในการเจือแลนทานัมและโคบอลต์ในปริมาณ x = 0.2 และปริมาณโคบอลต์เป็น y = 0.2 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$) ที่เตรียมได้จะกลายเป็นเฟสเดียวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้น และจะพบโครงสร้างสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์เฟสเดียวเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250°C และ 1300°C
2) ในการเจือแลนทานัม x = 0.2 และปริมาณโคบอลต์เป็น y = 0.5 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$) และ y = 1.0 ($Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$) จะพบโครงสร้างอื่นนอกเหนือจากโครงสร้างสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์
3) ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น และที่อุณหภูมิในการซินเตอร์เดียวกันพบว่าถ้าปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้น ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กจะมีค่าลดลง
4) เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ มีแนวโน้มคงที่ ส่วน $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น และที่อุณหภูมิในการซินเตอร์เดียวกันพบว่าถ้าปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น
5) สภาพแม่เหล็กคงค้างของ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.8}Co_{0.2}O_{19}$ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11.5}Co_{0.5}O_{19}$ และ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิในการซินเตอร์เดียวกันพบว่าถ้าปริมาณการเจือโคบอลต์เพิ่มขึ้น ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้างจะมีค่าลดลง

6.1.4 สมบัติทางแม่เหล็กของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้

จากตัวอย่างสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ที่เตรียมได้ในเงื่อนไขอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เป็น 1150°C 1200°C 1250°C และ 1300°C และสังเคราะห์สารสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ให้ได้ตามสูตร $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ โดยที่ปริมาณการเจือแลนทานัม x = 0 และ 0.2 ส่วนปริมาณการเจือโคบอลต์ y = 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.8 และ 1.0 จากผลที่ได้พบว่า

1) สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) สูงสุด คือ 127 emu/g เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C ส่วนสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ได้ค่าแมกเนไตเซชันอิ่มตัว (Ms) ต่ำสุด คือ 67 emu/g เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C
2) สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{12}O_{19}$ ได้ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) สูงสุด คือ 60 emu/g เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C ส่วนสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ได้ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง (Mr) ต่ำสุดคือ 4 emu/g เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C
3) สตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $SrFe_{12}O_{19}$ ได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก(Hc) สูงสุดคือ 4850 Oe เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150°C ส่วนสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ $Sr_{0.8}La_{0.2}Fe_{11}CoO_{19}$ ได้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Hc) ต่ำสุด คือ 44 Oe เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ควรมีการส่งเสริมงานวิจัยทางด้านแม่เหล็กในประเทศไทยให้มากขึ้นเพื่อเป็นความรู้พื้นฐานที่มีต่ออุตสาหกรรมฮาร์ดดิก์สไดรฟ์ที่กำลังขยายตัวอย่างมากในประเทศไทย และพบว่าขาดแคลนนักวิจัยที่มีความรู้ทางแม่เหล็ก ไม่ว่าจะเป็นส่วนของวัสดุแม่เหล็ก หัวอ่านและหัวเขียนที่ต้องมีความรู้ทางด้านแม่เหล็ก

6.2.2 ควรมีเครื่องมือวัดวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กให้มากขึ้น เพื่อรองรับงานวิจัยทางด้านแม่เหล็ก เช่น VSM ที่สามารวัดเทียบกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าอุณหภูมิคูรี่ได้ และ MFM ที่สามารถรองรับการดูโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กขนาดเล็กได้

บทที่ 7
ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

7.1 นวัตกรรมด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา

<u>รางวัลชมเชย,</u> BIKE FOR HEALTH AND ENERGY, การประกวดสิ่งประดิษฐ์นวัตกรรมด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา ประจำปี 2553, สำนักวิทยาศาสตร์การกีฬา กรมพลศึกษา, Sport Science 2010, 31 สิงหาคม 2553, ณ อาคารกีฬานิมิบุตร สนามกีฬาแห่งชาติ ปทุมวัน กรุงเทพฯ

รายละเอียดเป็นการเอาจักรยานออกกำลังกายทั่วไปมาปรับเปลี่ยน โดยใช้ชุดขดลวดและแม่เหล็กถาวรมาประกอบเป็นชุดผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อนำพลังงานจากการปั่นจักรยานออกกำลังกายมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเก็บสะสมไว้กับแบตเตอรี่รถยนต์ สามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากปั่นมาใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟแสงสว่าง พัดลม วิทยุ เป็นต้น

7.2 The AGI Award for Young Scientists 2008

1) W. Kaewwiset, P. Limsuwan and W. Onreabroy, Effect of Ag on TiO_2 Thin films Prepared by Sol-Gel Method, The AGI Award for Young Scientists 2008, 21 November 2008, Chulabhorn Research Institute Convention Center, Bangkok, Thailand.
2) W. Phangream, P. Limsuwan, W. Onreabroy, Synthesis and Physical Property Study of Nanosilver Colloid, The AGI Award for Young Scientists 2008, 21 November 2008, Chulabhorn Research Institute Convention Center, Bangkok, Thailand.

7.3 รางวัลประกวดโครงงานในระดับภาควิชา

1) การสร้างเครื่องออกกำลังกายเพื่อผลิตพลังงงานไฟฟ้า, นางสาวภาวิณี ไกรกระวี, นายวันวิทย์ เอนกนันท์, ได้รางวัลชนะเลิศจากการประกวดโครงงานในระดับภาควิชา
2) การพัฒนาชุดวัดสมบัติทางแม่เหล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์แคร์, นางสาวฐิตินันท์ ตั้งสถาพรพงษ์, นายทศพร เลิศวณิชผล, ได้รางวัลชนะเลิศจากการประกวดโครงงานในระดับภาควิชา
3) การประยุกต์ใช้ผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์และผงเหล็กสำหรับสังเคราะห์วัสดุผสม, นายชัชวาล จุ้ยเจริญ, นายจักรี ปิ่นทอง, ได้รางวัลชมเชยจากการประกวดโครงงานในระดับภาควิชา

7.4 การนำเสนอผลงาน

1) โกเมน ปาปะโถ, วันดี อ่อนเรียบร้อย และ อินทิรา ศรีพิชัย, 2550, “การวัดวงฮีสเทอร์รีซีสโดยอาศัยปรากฏการณ์ของแคร์,” รายงานประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย ครั้งที่ 1, 28 กรกฎาคม 2550, มหิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, หน้า 38-45.
2) T. Lertvanithphol, T. Tangsathapornpong, W. Rakreungdet and W. Onreabroy, Investigation of Magneto-Optic Kerr Rotations on Ferromagnetic Materials, SPC2010, Kanchanaburi, Thailand, March 25-27, 2010.
3) W. Onreabroy, K. Papato, P. Limsuwan, and Tunkasiri T. “Preparation of Strontium Ferrites Doped with Cobalt Oxide and Lanthanum Oxide” การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 9, 15-17 ตุลาคม 2552, โรงแรมฮอลิเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีท ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี, หน้า 328.
4) W. Onreabroy, K. Papato, P. Limsuwan, G.Rujijanagul, T. Tunkasiri, A Study of Strontium Ferrites Substituted by Lanthanum on the Structural and Magnetic Properties, International Conference on the 7th Asian Meeting on Ferroelectricity (AMF-7) and the 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-7) will be held at Jeju island, Korea, in June 28-July 1, 2010.

7.5 เครื่องต้นแบบ/ชุดทดลอง

1) ชุดการทดลองวัดวงฮิสเทอร์ริซิสโดยอาศัยปรากฏการณ์แคร์
2) เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่มีขดลวดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงานไม่น้อยกว่า 1 เทสล
3) จักรยานออกกำลังกายพร้อมชุดขดลวดลวดและแม่เหล็กเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

7.6 อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานในระดับปริญญาตรีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

1) นางสาว ภาวิณี ไกรกระวี, นาย วันวิทย์ เอนกนันท์, โครงงานเรื่องการสร้างเครื่องออกกำลังกายเพื่อผลิตพลังงงานไฟฟ้า โดยใช้แม่เหล็กถาวรเป็นองค์ประกอบ
2) นางสาว ฐิตินันท์ ตั้งสถาพรพงษ์, นาย ทศพร เลิศวณิชผล, การพัฒนาชุดวัดสมบัติทางแม่เหล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์แคร์ โดยใช้ชุดแคร์ที่ได้จากการโครงการวิจัยมาใช้เป็นองค์ประกอบในโครงงาน และใช้ในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง
3) การประยุกต์ใช้ผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์และผงเหล็กสำหรับสังเคราะห์วัสดุผสม, นาย ชัชวาล จุ้ยเจริญ, นาย จักรี ปิ่นทองโดยใช้ผงสตรอนเทียมที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้งาน โดยการขึ้นรูปเป็นแผ่นร่วมกับขวดน้ำพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำเป็นบอร์ดเอนกประสงค์

7.7 งานวิจัยในปัจจุบันที่ต่อยอด

1) งานวิจัยศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มบางสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์
2) งานวิจัยศึกษาอิทธิพลของการเติมสังกะสีที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กของ $Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$
3) งานวิจัยการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า แสง และแม่เหล็กของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์เจือด้วยโคบอลต์เตรียมด้วยวิธีโซลเจล
4) การสังเคราะห์ผงสตรอนเทียมในระดับนาโนเมตรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

1. Sharma, P., Verma, A., Sidhu, R.K. and Pandey, O.P., 2006, "Effect of Processing Parameters on the Magnetic Properties of Strontium Ferrite Sintered Magnets Using Taguchi Orthogonal Array Design", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 307, pp. 157-164.
2. Guo, Z.B., Ding, W.P., Zhong, W., Zhang, J.R. and Du, Y.W., 1997, "Preparation and Magnetic Properties of $SrFe_{12}O_{19}$ Particles Prepared by the Salt-melt Method", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 175, pp. 333-336.
3. Hessien, M.M., Rashad, M.M. and El-Barawy, K., 2008, "Controlling the Composition and Magnetic Properties of Strontium Hexaferrite Synthesized by co-precipitation Method", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 302, pp. 336-343.
4. Fu, Y.P. and Lin, C.H., 2005, "Fe/Sr Ratio Effect on Magnetic Properties of Strontium Ferrite Powders Synthesized by Microwave-induced Combustion Process", **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 386, pp. 222-227.
5. Hussain, S., Anis-ur-Rehmanb, M., Maqsooda, A. and Awan, M.S., 2006, "The Effect of SiO_2 Addition on Structural, Magnetic and Electrical Properties of Strontium Hexa-Ferrites", **Journal of Crystal Growth**, Vol. 297, pp. 403-410.
6. Hussain, S and Maqsood, A, 2007, "Influence of Sintering Time on Structural, Magnetic and Electrical Properties of Si-Ca added Sr-hexa Ferrite", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 316, pp. 73-80.

7. Kools, F., Morel, A. and Tenaud, P., 2002, **Improved Microstructure for LaCo-rich Substituted Ferrite Magnets** [Online], Available: http://pem.utbm.fr/materiaux_2002/file/pdf/CM10012.PDF [2007, June 11].

8. Breton, J.M. L., Lechevalliera, L., Wang, J.F., and Arris, R., 2004, "Structural Analysis of co-Precipitated $Sr_{1-x}La_xFe_{12-x}Co_xO_{19}$ Powders", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 272-276, pp. 2214-2215.

9. Liu, X., Hernández-Gómez, P., Huanga, K., Zhou, S., Wang, Y., Caic, X., Sun H. and Ma, B., 2006, "Research on La^{3+}-Co^{2+} -Substituted Strontium Ferrite Magnets for High Intrinsic Coercive Force", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 305, pp. 524-528.

10. García-Cerda, L.A., Rodríguez-Fernández, O.S. and Reséndiz-Hernández, P.J., 2004, "Study of $SrFe_{12}O_{19}$ Synthesized by the Sol-gel Method", **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 369, pp. 182-184.

11. Liu, X., Zhong, W., Yang, S., Yu, Z., Gu, B. and Du, Y., 2002, "Influences of La^{3+} Substitution on the Structure and Magnetic Properties of M-type Strontium Ferrites", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 238, pp. 207-214.

12. Valenzuela, R., 1994, **Magnetics Ceramics**, Cambridge University Press, United States of America, pp. 44-66.

13. Givorda, D., Rossignola, M., Barthem, and V.M.T.S., Barthem, 2003, "The Physics of Coercivity", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 258-259, pp. 1-5.

14. Elkady, H.A., Abou-Sekkina, M.M. and Nagorny, K., 1998, "Mössbauer Effect and Discovery of new Hexagonal Ferrites Prepared at 980°C", **Hyperfine Interactions**, Vol. 116, pp. 149-157.

15. WU, E., Campbell, S.J. and Kaczmarek, W.A., 1998, "Mössbauer Effect Study of Ball-milled Strontium Ferrite", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 177-181, pp. 255-256.

16. Lee, S.W., An, S.Y., Shim, I.B. and Kim, C.S., 2005, "Mössbauer Studies of La-Zn Substitution Effect in Strontium Ferrite Nanoparticles", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 290-291, pp. 231-233.

17. Lechevallier, L., Le Breton, J.M., Teillet, J., Morel, A., Kools, F. and Tenaud, P., 2003, "Mössbauer Investigation of $Sr_{1-x}La_xFe_{12-y}Co_yO_{19}$ Ferrites", **Physica B**, Vol. 327, pp. 135-139.

18. Kima, K. J., Kima, H. K., Parka, Y. R. and Park J. Y., 2006, "Effects of Mn Substitution of Co and Fe in Spinel $CoFe_2O_4$ Thin Films", **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 304, pp. e106-e108.

19. An, S. Y., Shim, I.B. and Kim, C. S., 2002, "Mössbauer and Magnetic Properties of Co–Ti Substituted Barium Hexaferrite Nanoparticles", **Journal of Applied Physics**, Vol. 91, no. 10, pp. 8465-8467.