ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249559

การสังเคราะห์และสมบัติบางประการของสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล

นายพงศกร วิลัยพร์ ประสันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2554

600253972

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249559

การสังเคราะห์ผงและฟิล์มบางสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล

นางสาวสุภลักษณ์ ประพันธ์ วท.บ. (ฟิสิกส์)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร. สุปาณี ลิ้มสุวรรณ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร. วันดี อ่อนเรียบร้อย)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)
(ดร. ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์)

..... กรรมการ
(ดร. ตุลา จูฑะรสก)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.พงศกร จันทรัตน์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ผงและฟิล์มบางสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวสุภลักษณ์ ประพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย
	ดร.ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	คณะวิทยาศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

249559

งานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการเตรียมผงและฟิล์มสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์และหาลักษณะเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านแม่เหล็ก เช่น อุปกรณ์แม่เหล็กถาวร ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไมโครเวฟ อุปกรณ์แมกนีโตออปติก ส่วนประกอบลำโพง และแถบบันทึกข้อมูลเป็นต้น การสังเคราะห์ผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ด้วยวิธีโซลเจล ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนโมลระหว่างเหล็กไนเตรตและสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น 12 โดยใช้น้ำปราศจากไอออน เอทานอล สตรอนเทียมไนเตรตและเหล็กไนเตรตเป็นสารตั้งต้น จากนั้นผงที่ได้ถูกนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 ถึง 900 °C ตามลำดับ สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของผงตัวอย่างถูกวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ สมบัติทางแม่เหล็กของผงถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเบื้องต้นพบเฟสของสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์จากผงตัวอย่างที่ถูกเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 700°C และพบว่าขนาดเกรนของผงตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์สูงขึ้น เมื่อทำการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของผงตัวอย่างโดยพิจารณาจากวงฮีสเทอร์รีซีสของวัสดุแม่เหล็กพบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ ต่ำกว่า 700 °C วงฮีสเทอร์รีซีสแสดงลักษณะวัสดุแม่เหล็กแบบชั่วคราว ในขณะที่อุณหภูมิแคลไซน์ สูงกว่า 700 °C วงฮีสเทอร์รีซีสแสดงลักษณะวัสดุแม่เหล็กแบบถาวร นอกจากนี้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลระหว่างเหล็กไนเตรตและสตรอนเทียมไนเตรตในเจล เป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ตามลำดับ อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าผงตัวอย่างเกิดโครงสร้างแบบสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ จากทุกอัตราส่วนโมลในเจลที่อัตราส่วนโมลระหว่าง

249559

เหล็กในเตรตและสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น 6 ผงตัวอย่างมีลักษณะเกรนเป็นแบบแท่งหกเหลี่ยม มีค่าลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงสุดของผงแม่เหล็กเป็น 4.9 kOe และยังพบว่า ณ อัตราส่วนนี้ สามารถสังเคราะห์ฟิล์มแม่เหล็กที่มีโครงสร้างเป็นแบบสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ โดยการเคลือบแบบจุ่มเคลือบที่อัตราเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที บนควอทซ์ แล้วทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มที่ได้มีค่าลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงสุดเป็น 6 kOe ซึ่งมีค่าสูงกว่าผงแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้

คำสำคัญ : สตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ / วิธีโซลเจล / วงฮีสเทอร์รีซีส / ค่าลบล้างสภาพแม่เหล็ก

Thesis Title	Synthesis of Strontium Hexaferrite ($SrFe_{12}O_{19}$) Powders and Thin Films by Sol-Gel Method
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Supaluk Prapan
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Wandee Onreabroy
	Dr. Panita Chinvetkivanich
Program	Master of Science
Field of Study	Physics
Department	Physics
Faculty	Science
B.E.	2554

Abstract

249559

This work emphasized on preparation and characterization of strontium hexaferrite ($SrFe_{12}O_{19}$) powders and thin films towards various kinds of application, for example, permanent magnets, motors, microwaves, magneto optics, loudspeakers and magnetic recording media components. The $SrFe_{12}O_{19}$ powders and thin films were synthesized by sol-gel technique using de-ionized water, ethanol, $Sr(NO_3)_2$ and $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ as starting materials. Initially, the mole ratio of $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ and $Sr(NO_3)_2$ was kept constant at 12. The as-synthesized powders were then calcined at the temperature range of 500 - 900 °C in order to study on the effects of calcination temperature on properties and structure of the powders. Crystal structure and powders morphology of $SrFe_{12}O_{19}$ powders were investigated by X-ray diffraction (XRD) and field emission scanning electron microscopy (FESEM). Moreover, the magnetic properties of $SrFe_{12}O_{19}$ powders were also analyzed by vibrating sample magnetometer (VSM). The primary results revealed that the major phase of strontium hexaferrite ($SrFe_{12}O_{19}$) was observed for the powders calcined at 700 °C. FESEM images showed that the particle size increased as the calcination temperature was increased. The powders calcined at temperature below 700 °C exhibited the hysteresis loop of soft magnetic, while the others calcined at the temperature above 700 °C exhibited the hysteresis loop of hard magnetic. Another experiment was carried out by varying the mole ratio of $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ and $Sr(NO_3)_2$ from 2, 4, 6, 8, 10 and 12. The powders was then calcined at 1,000 °C for 2 h. The results showed that the major phase of $SrFe_{12}O_{19}$ could be observed from all ratios. It was also observed that at the mole ratio of 6, $SrFe_{12}O_{19}$ powders exhibited hexagonal grain with the maximum coercivity of 4.9 kOe.

249559

Finally, using this mole ratio, $SrFe_{12}O_{19}$ thin films could be fabricated. The coercivity of the $SrFe_{12}O_{19}$ magnetic thin films was 6 kOe, which was higher than that of magnetic powders.

Keywords: Strontium Hexaferrite / Sol-Gel Method / Hysteresis Loop / Coercivity

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจากท่าน ผศ. ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ โดยให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยหาวิธีการแก้ไขปัญหาอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้กำลังใจผู้เขียนด้วยความเมตตา ตั้งแต่เริ่มทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณท่าน ดร.ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์ ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้เมตตาต่อผู้เขียนช่วยเหลือให้คำปรึกษา แนะนำ ผู้เขียนขอระลึกถึงความกรุณาของท่านตลอดไป ขอกราบขอบพระคุณท่าน รศ.ดร. สุปาณี ลิ้มสุวรรณ ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางจนวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณท่าน ดร. ตุลา จูฑะรสก ที่กรุณารับเป็นกรรมการวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิด สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอกราบขอบพระคุณท่าน ผศ. ดร.พงศกร จันทรัตน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดสมบัติทางแม่เหล็กและกรุณารับเป็นกรรมการวิทยานิพนธ์และได้สละเวลามาดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และขอขอบคุณ ทุกท่านที่ห้องปฏิบัติการวิจัยภาควิชาฟิสิกส์ ได้แก่ พี่โจ นุ่น โป๊ะ พี่ปึ๊ก พี่ม่อน น้องหมี น้องบี น้องอาท น้องนุช น้องกริต น้องจ๋า พี่วี พี่ต่าย พี่ปี และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยฟิล์มบาง ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ซึ่งท่านได้วางรากฐานชีวิต พื้นฐานทางความคิดให้ผู้เขียนมีความอดทนต่ออุปสรรคและมีความเชื่อมั่นในสิ่งที่ถูกต้องเสมอมา อันเป็นแนวทางไปสู่ความสำเร็จของผู้เขียน และเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนตลอดมา

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความเมตตากรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาดังข้างต้นนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูงจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

นางสาวสุภลักษณ์ ประพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฎ
รายการรูปประกอบ	ฏ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 วัสดุแม่เหล็ก	4
2.2 คู่ขั้วแม่เหล็กและโมเมนต์แม่เหล็ก	4
2.3 ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก	7
2.3.1 วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก	8
2.3.2 วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก	8
2.3.3 วัสดุแม่เหล็กแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก	9
2.3.4 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก	10
2.3.5 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติก	11

2.3.6 วัสดุแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก 12

2.4 วงฮีสเทอร์รีซีส 12

2.5 การแบ่งชนิดของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุเฟอร์ริแมกเนติก 16

2.5.1 วัสดุแม่เหล็กชั่วคราวหรือวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน 17

2.5.2 วัสดุแม่เหล็กถาวรหรือวัสดุแม่เหล็กแบบแข็ง 17

2.6 วัสดุเฟอร์ไรท์ 17

2.6.1 สปินแนล เฟอร์ไรท์ 17

2.6.2 เฮกซะโกนอล เฟอร์ไรท์ 18

2.6.3 การ์เนท 21

2.7 กระบวนการโซลเจล 21

2.8 การเคลือบด้วยการหมุน 25

2.8.1 ปัจจัยการเคลือบด้วยการหมุน 25

2.8.2 วิธีการเคลือบด้วยการหมุน 28

2.9 การเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบ 28

2.9.1 การเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบแบบกะ 28

2.9.2 การเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง 29

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30

2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 37

2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 38

2.13 เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง 40

2.14 วิเคราะห์ผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 45

3 การดำเนินการทดลอง **48**

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 48

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 48

3.3 ขั้นตอนการทดลอง 49

3.4 การเตรียมเจลของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 51

3.5 การเตรียมผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 53

3.5.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 53

3.5.2 การเตรียมเจลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตใน เจลที่แตกต่างกัน 54

3.5.3 การเตรียมผงจากเจลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กในเตรตต่อสตรอนเทียมไน เตรตในเจลที่แตกต่างกัน 55

3.6 การเตรียมฟิล์มสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ 57

3.6.1 การศึกษาผลของวัสดุรองรับที่มีต่อฟิล์มตัวอย่าง 57

3.6.2 การศึกษาอิทธิผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไน เตรตในเจลที่มีต่อฟิล์มตัวอย่าง 57

3.6.3 การทดลองเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกของฟิล์มตัวอย่าง 59

3.6.4 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ 61

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 62

4.1 ผลการเตรียมผงสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์ 62

4.1.1 ผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 62

4.1.2 ผลการเตรียมเจลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรต ในเจลแตกต่างกัน 69

4.2 ผลการเตรียมฟิล์มสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ 79

4.2.1 ผลของวัสดุรองรับที่มีต่อฟิล์มตัวอย่าง 79

4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไน เตรตในเจลที่มีต่อฟิล์มตัวอย่าง 84

4.2.3 ผลการทดลองเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกของฟิล์มแม่เหล็กสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ 90

4.2.4 ผลการศึกษาผลของอัตราเร็วของการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ 93

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 97

5.1 สรุปผล 97

5.2 ข้อเสนอแนะ 98

เอกสารอ้างอิง **99**

ประวัติผู้วิจัย **104**

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สปินของอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน 3d ในธาตุทรานซิชันโดยลูกศรจะบอกทิศทางของสปิน	6
2.2	ตำแหน่งของอะตอมและผลการคำนวณสำหรับวัสดุแม่เหล็กสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ ($SrFe_{12}O_{19}$) ของรูปแบบของ Gorter เมื่อมี space group เป็น P63/mmc แลซทิสพารามิเตอร์ a = 0.58836 นาโนเมตร และ c = 2.30376 นาโนเมตร	20
3.1	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ผงตัวอย่าง	53
3.2	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลในการทดลอง	55
3.3	ชนิดของวัสดุรองรับและอุณหภูมิการเผาแคลไซน์	57
3.4	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลสำหรับเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	58
3.5	อัตราเร็วที่ใช้ในการทดลองเคลือบฟิล์มแบบจุ่ม	61
4.1	ขนาดของอนุภาคของผงตัวอย่างที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่แตกต่างกัน	64
4.2	ค่าทางแม่เหล็กของผงตัวอย่างที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่แตกต่างกัน	67
4.3	การเกิดเจลของสารตัวอย่างที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12	70
4.4	โครงสร้างของผงตัวอย่างที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจล เป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12	71
4.5	ค่าทางแม่เหล็กของผงตัวอย่างที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 เมื่อเผาแคลไซน์ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	76
4.6	ค่าความขรุขระของฟิล์มที่มีอัตราเร็วการเคลือบแตกต่างกัน	94

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กจาก การสปิน การออบิทอลของอิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่ของนิวเคลียส	5
2.2	ประพฤติตัวของแม่เหล็กแต่ละชนิด	7
2.3	กราฟของวัสดุไดอะแมกเนติกแสดง (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและค่าแมกเนไตเซชัน	8
2.4	กราฟของวัสดุพาราแมกเนติกแสดง (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก (ข) อุณหภูมิและส่วนกลับของค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก และ (ค) สนามแม่เหล็กภายนอกและค่าแมกเนไตเซชัน	9
2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับส่วนกลับของค่าอัตราการเป็นแม่เหล็กของวัสดุแอนไทเฟอร์โรแมกเนติก	10
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับส่วนกลับของค่าอัตราการเป็นแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	11
2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับส่วนกลับของค่าอัตราการเป็นแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์ริแมกเนติก	12
2.8	วงฮีสเทอร์รีซีสของวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกและแบบเฟอร์ริแมกเนติก	13
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนไตเซชันและค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ตำแหน่งต่างๆกัน	14
2.10	การวางตัวของแมกเนไตเซชันแบบสุ่มในตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 2.9	14
2.11	การวางตัวของแมกเนไตเซชันเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกในตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 2.9	15
2.12	การวางตัวของแมกเนไตเซชันเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกตามตำแหน่งที่ 2 ถึงตำแหน่งที่ 2′ ในรูปที่ 2.9	15
2.13	การวางตัวของแมกเนไตเซชันเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกตามตำแหน่งที่ 2′ ถึงตำแหน่งที่ 3 ในรูปที่ 2.9	16
2.14	วงฮีสเทอร์รีซีสของวัสดุแม่เหล็ก (ก) แม่เหล็กแบบชั่วคราว (ข) แม่เหล็กแบบถาวร	16
2.15	โครงสร้างแบบสปินเนล	18
2.16	โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล	19

2.17 โครงสร้างแบบการ์เนท 21
2.18 สารละลายเปลี่ยนสถานะจากโซลเปลี่ยนเป็นเจล 22
2.19 กระบวนการโซลเจล 22
2.20 การเกิดเจล (ก) การเกิดเจลในกรด และ (ข) การเกิดเจลในเบส 24
2.21 การหยดสารละลายลงบนวัสดุรองรับ 25
2.22 ทิศทางการแผ่ของหยดของเหลวเมื่อหยดลงบนวัสดุรองรับขณะกำลังหมุน 26
2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน 26
2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับเวลาที่ใช้ในการหมุน 27
2.25 การให้ความร้อนในขณะทำการเคลือบเพื่อเร่งการระเหยของสารละลาย 27
2.26 กระบวนการจุ่มเคลือบแบบกะ (ก) Immersion, (ข) Wetting และ (ค) Withdrawal 29
2.27 การเคลือบด้วยการจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง 30
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าแมกเนไตเซชันและค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก 31
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกเนไตเซชันและสนามแม่เหล็กภายนอกที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 32
2.30 รูปร่างของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์บนเส้นใยฝ้ายที่มีอัตราส่วนเหล็กต่อสารสตรอนเทียมเป็น 9, 10, 11, 11.5, 12 และ 13 33
2.31 วงฮีสเทอร์รีซีสของสตรอนเทียมเฟอร์ไรท์สัดส่วนของเหล็กต่อสตรอนเทียมเป็น 11.5 ที่อุณหภูมิ 750°C, 850°C, 950°C และ 1,050°C 34
2.32 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบบนซิลิกอนระนาบ (110) ที่อุณหภูมิ (ก) 450°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C 35
2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับค่าแมกนีไตเซชันของฟิล์มแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนระนาบ (110) ที่อุณหภูมิเผา 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 36
2.34 รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนตามสมการของแบรกก์ 37
2.35 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง FESEM 39
2.36 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง AFM 40
2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างระหว่างอะตอม 41
2.38 รูปแบบในโหมดแบบสัมผัส 42
2.39 รูปแบบในโหมดแบบไม่สัมผัส 43
2.40 รูปแบบในโหมดแบบกึ่งสัมผัส 44
2.41 การหาขนาดเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 45
2.42 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (VSM) 46

2.43 แผนภาพของเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (VSM) แบบขดลวด 4 ขด 47

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 49

3.2 ขั้นตอนการทดลอง 50

3.3 ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน (ก) เอทานอล (ข) เมทานอล (ค) ไอโซโพรพานอล และ (ง) น้ำปราศจากไอออน 51

3.4 การเตรียมสารละลาย (ก) $Sr(NO_3)_2$ และ (ข) $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 52

3.5 การผสมสารละลาย $Sr(NO_3)_2$ และ $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 52

3.6 ขั้นตอนการเตรียมผงสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ 54

3.7 การเตรียมสารละลายตั้งต้น ที่อัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกัน 55

3.8 ขั้นตอนการเตรียมผงแม่เหล็กสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์จากผลของอัตราส่วนโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลที่ต่างกัน 56

3.9 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุน (spin-coating) 58

3.10 ขั้นตอนที่ทำการเติมกรดในสารละลายโซล 59

3.11 การเพิ่มระยะเวลาในการเกิดเจลให้นานขึ้นจาก 24 ชั่วโมงเป็น 48 ชั่วโมง 60

3.12 การเพิ่มความเข้มข้นของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลขึ้นเป็นสองเท่าจากเดิม 60

3.13 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีเคลือบแบบจุ่มเคลือบ (dip-coating) 61

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 500°C, (ข) 600°C, (ค) 700°C, (ง) 800°C และ (จ) 900°C 63

4.2 ลักษณะพื้นผิวของผงตัวอย่างที่เผาแคลไซน์แต่ละอุณหภูมิ (ก) 500 °C (ข) 600 °C (ค) 700 °C (ง) 800 °C และ (จ) 900 °C 65

4.3 วงฮีสเทอร์รีซีสของผงตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 500°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C 66

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผาแคลไซน์กับค่าแมกเนไตเซชันสูงสุดของแม่เหล็ก (M_{max}) 67

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผาแคลไซน์กับค่าสภาพคงค้างแม่เหล็ก (M_r) 68

4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเผาแคลไซน์กับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (H_c) 68

4.7 การเกิดเจลของสารตัวอย่าง (ก) สารตัวอย่างก่อนทำปฏิกิริยา (ข) สารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา และ (ค) สารตัวอย่างหลังปรับพีเอชและทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง 70

4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงตัวอย่างที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจล (ก) 2, (ข) 4, (ค) 6, (ง) 8, (จ) 10 และ (ฉ) 12 เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 72

4.9 ลักษณะพื้นผิวของผงตัวอย่างที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเท่ากับ (ก) 2, (ข) 4, (ค) 6, (ง) 8, (จ) 10 และ (ฉ) 12 เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 74

4.10 วงฮีสเทอร์รีซีสของผงตัวอย่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น (ก) 2 (ข) 4 (ค) 6 (ง) 8 (จ) 10 และ (ฉ) 12 เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 75

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตกับสตรอนเทียมไนเตรตในเจลกับค่าแมกเนไตเซชันสูงสุดของแม่เหล็ก (M_{max}) ของผงตัวอย่าง เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 77

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตกับสตรอนเทียมไนเตรตในเจลกับค่าสภาพคงค้างแม่เหล็ก (M_r) ของผงตัวอย่าง เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 77

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตกับสตรอนเทียมไนเตรตในเจลกับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (H_c) ของผงตัวอย่าง เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 78

4.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน (ก) เคลือบบนแผ่นควอทซ์เผาแคลไซน์ 1,000°C (ข) เคลือบบนแผ่นควอทซ์เผาแคลไซน์ 1,200°C (ค) เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์เผาแคลไซน์ 1,000°C และ (ง) เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์เผาแคลไซน์ 1,200°C 80

4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มสตรอนเทียมเฮกซะเฟอร์ไรท์ตัวอย่างที่เพิ่มความหนาเมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ 1,200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ฟิล์มที่เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์ และ (ข) ฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นควอทซ์ 81

4.16 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแบบสองมิติ (ก) เคลือบบนควอทซ์ และ (ข) เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 82

4.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแบบสามมิติ (ก) เคลือบบนควอทซ์ และ (ข) เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 82

4.18 ผลของค่าทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่าง เมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ฟิล์มที่เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์ และ (ข) ฟิล์มที่เคลือบบนควอทซ์ 83

4.19 ผลของค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก (χ) ของฟิล์มตัวอย่าง เมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ฟิล์มที่เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์และ (ข) ฟิล์มที่เคลือบบนควอทซ์ 83

4.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น (ก) 6, (ข) 8, (ค) 10 และ (ง) 12 85

4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น (ก) 6 และ (ข) 8 86

4.22 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแบบสองมิติที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น (ก) 6 และ (ข) 8 เมื่อเคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 87

4.23 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแบบสามมิติที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กไนเตรตต่อสตรอนเทียมไนเตรตในเจลเป็น (ก) 6 และ (ข) 8 เมื่อเคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 87

4.24 สมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ควอทซ์เปล่า (ข) ฟิล์มที่มีอัตราส่วนโดยโมลเป็น 6 และ (ค) ฟิล์มที่มีอัตราส่วนโดยโมลเป็น 8 88

4.25 ค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก (χ) ของฟิล์มที่เคลือบแบบหมุน ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เผาแคลไซน์ที่ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ควอทซ์เปล่า (ข) ฟิล์มที่อัตราส่วนโดยโมลเป็น 6 และ (ค) ฟิล์มที่อัตราส่วนโดยโมลเป็น 8 89

4.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง (ก) ฟิล์มที่เติมกรดซิตริกในโซล (ข) ฟิล์มที่เติมกรดซิตริกและเพิ่มเวลาการเกิดเจล และ (ค) ฟิล์มที่เติมกรดซิตริกและเพิ่มความเข้มข้นจากเดิม 0.1 โมลาร์ เป็น 0.2 โมลาร์ 91

4.27 รูปแบบวงฮีสเทอร์รีซีสของฟิล์มตัวอย่าง (ก) วัสดุรองรับควอทซ์ (ข) ฟิล์มที่ทดลองเติมกรดในโซล (ค) ฟิล์มที่เติมกรดและเพิ่มเวลาเจลจาก 24 ชั่วโมงเป็น 48 ชั่วโมง และ (ง) ฟิล์มที่เติมกรดและเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.1 โมลาร์ เป็น 0.2 โมลาร์ 92

4.28 ภาพถ่ายผิวฟิล์มด้วยกล้องแบบใช้แสง (ก) ควอทซ์ (ข) FFeS02 (ค) FFeS04 (ง) FFeS06 (จ) FFeS08 และ (ฉ) FFeS10 เมื่อเผาแคลไซน์ 1,000°C เวลาการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง 94

4.29 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบบนควอทซ์ ด้วยเครื่อง AFM แบบสองมิติ (ก) FFeS02 (ข) FFeS04 (ค) FFeS06 (ง) FFeS08 และ (จ) FFeS10 เผาแคลไซน์ 1,000°C เวลาการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง 95

4.30 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบบนควอทซ์ด้วยเครื่อง AFM แบบสามมิติ (ก) FFeS02 (ข) FFeS04 (ค) FFeS06 (ง) FFeS08 และ (จ) FFeS10 เผาแคลไซน์ 1,000°C เวลาการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง 96

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	แลซทิสพารามิเตอร์ a = 0.58836 nm
c	=	แลซทิสพารามิเตอร์ c = 2.30376 nm
B	=	สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ
H	=	สนามแม่เหล็กภายนอก
H_c	=	ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก
M_r	=	ค่าสภาพแม่เหล็กคงค้าง
M_s	=	ค่าความอิ่มตัวทางแม่เหล็ก
m_e	=	มวลของอิเล็กตรอน มีค่า 9.11×10^{-31} กิโลกรัม
μ_B	=	บอร์แมกนีตรอน มีค่า 9.274×10^{-24} แอมแปร์-ตารางเมตร
q	=	ประจุของอิเล็กตรอน มีค่า 1.6×10^{-19} คูลอมป์
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่า 6.6261×10^{-34} จูล- วินาที
χ	=	ค่าสภาพรับไว้ได้ของแม่เหล็ก (susceptibility)
λ	=	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
θ	=	มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก
d	=	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
r_0	=	ระยะสมดุลของอะตอม (Equilibrium distance)
ε	=	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy)
$\bar{z}$	=	ความสูงเฉลี่ยของพื้นที่ของผิวฟิล์มที่สแกน
z_i	=	ความสูงของแต่ละจุดของฟิล์มที่สแกน
N	=	พื้นที่ของผิวที่สแกน
φ	=	เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์
$\bar{B}$	=	สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเทสลา
I	=	กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์
$\bar{M}$	=	แมกเนไตเซชันของตัวอย่าง มีหน่วยเป็นแอมแปร์-เมตร
f	=	ความถี่ (Hz)