การเตรียมเฟอร์ริกออกไซด์แกมมาที่มีผลึกเป็นรูปเข็ม จากสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต

นาย วิโรจน์ กมลเดชเดชา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-633-143-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T 172312 06

PRERATION OF ACICULAR GAMMA - FERRIC OXIDE FROM FERROUS SULPHATE SOLUTION

MR.Wirote Kamondetdecha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Department of Metallurgical Enineering
Graduate School
Chulalongkorn University

Academic Year 1996
ISBN 974-633-143-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเฟอร์ริกออกไซด์แกมมาที่มีผลึกเป็นรูปเข็มจากสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต
โดย	นาย วิโรจน์ กมลเดชเดชา
ภาควิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงทอง)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิกรม วัชระคุปต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วิโรจน์ กมลเดชเดชา : การเตรียมเฟอร์ริกออกไซด์แกมมาที่ผลึกเป็นรูปเข็มจากสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (PREPATATION OF ACICULAR OF GAMMA-FERRIC OXIDE FROM FERROUS SULPHATE SOLUTION) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ฉัตรชัย สมศิริ, 112 หน้า. ISBN 974-633-143-4

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมอนุภาคแมกฮีไมต์ (γ- Fe_2O_3) ซึ่งเป็นอนุภาคแม่เหล็กที่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสื่อบันทึกเสียง ขั้นตอนการเตรียมที่สำคัญที่สุด คือ การเตรียมอนุภาคเกอไทต์ (α -FeOOH) ที่มีรูปร่างเป็นเข็ม และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอน (μm) ก่อนที่จะนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อที่จะเปลี่ยนอนุภาคเกอไทต์ให้เป็นอนุภาคแมกฮีไมต์ การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) ทำปฏิกิริยากับสารละลาย เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) และอากาศ ในการเตรียมอนุภาคเกอไทต์ที่มีผลึกเป็นรูปเข็ม โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต อุณหภูมิในการทำออกซิเดชั่น และ อัตราการพ่นอากาศต่อชนิด และขนาดของอนุภาคที่ได้ โดยพบว่าจะเกิดอนุภาคเกอไทต์ที่มีผลึกเป็นรูปเข็ม อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตมากกว่า 2 และจะมีรูปร่างเป็นเข็มมากขึ้น ถ้าอัตราส่วนโดยโมลดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นในขณะที่การใช้อุณหภูมิในการทำออกซิเดชั่นสูงขึ้น มีผลให้ขนาดอนุภาคเกอไทต์ ใหญ่ขึ้น รวมทั้งมีโอกาสเกิดอนุภาคแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ซึ่งมีรูปร่างที่ไม่เป็นเข็มเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับอัตราการพ่นอากาศนั้นไม่มีผลต่อชนิด และขนาดของอนุภาคที่ได้ โดยจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ทำออกซิเดชั่นเท่านั้น กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการทำออกซิเดชั่นลดลงเมื่ออัตราการพ่นอากาศเพิ่มขึ้น

ในขั้นตอนการกำจัดน้ำจากอนุภาคเกอไทต์ หากใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ กล่าวคือกำจัดน้ำออกจากอนุภาคเกอไทต์ไม่หมดและมีอนุภาคเกอไทต์หลงเหลืออยู่ในขั้นตอนการทำรีดักชั่นภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจนเพื่อให้ได้อนุภาคแมกนีไทต์ จากการทดลองพบว่าหากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส จะได้สารอื่นที่ไม่ต้องการคือ วูฟส์ไทต์ (FeO) กับ เหล็ก (Fe) เกิดขึ้น และในขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนการทำออกซิเดชั่น เพื่อเปลี่ยนแมกนีไทต์ เป็น γ- Fe_2O_3 นั้น หากใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ มีอนุภาคแมกนีไทต์เหลือ อนุภาคแมกฮีไมต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการทดลองนี้ มีลักษณะ และ คุณสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกับ อนุภาคแมกฮีไมต์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C518736 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING
KEY WORD : GAMMA FERRIC OXIDE/GOETHITE
WIROTE KAMONDETDECHA : PREPARATION OF ACICULAR GAMMA-FERRIC OXIDE FROM FERROUS SULPHATE SOLUTION. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. 112 pp. ISBN 974-633-143-4

The objective of this research is to study optimum conditons for preparation of acicular maghemite (γ - Fe_2O_3) which could be used as recording medium. An important step of preparation is the particles must be prepared from acicular goethite and the particle size must be smaller than 1 micron (μm). The particles have to gothrough in many steps of heat treatment in order to change them from goethite (α -FeOOH) to their final form, maghemite (γ - Fe_2O_3). In this experiment, NaOH - $FeSO_4$ solution was used to synthesize acicular goethite particles. Studies of the influences of various factors such as molar ratio of NaOH/ $FeSO_4$ oxidation temperature and oxidation rate on the particle phase and size were made. It was found that the acicular goethite particles would be prepared when the molar ratio of $NaOH/FeSO_4$ were greater than 2 and the better acicular shape would be obtained by increasing the molar ratio of $NaOH/FeSO_4$. Higher oxidation temperature would yield larger acicular goethite particles as well as increase a chance of precipitation of magnetite (Fe_3O_4) particles which is undersirable. The oxidation rate was found not to effect the particle phase and size but it influences the reaction time only. Effects of temperature on the particle phase in the heat treatment process were studied. It was found that the reaction of dehydration did not completed ; there are some residue of acicular goethite particles ; if the temperature was below 350°C. During reduction, if the temperature above 350°C. It may be occur other reaction which make we get some impurities (FeO and Fe). The final step of oxidation was carried out below 250°C. The reaction may not have been completed in this step since there were some residue of magnetite Fe_3O_4 particles . However, it was found that the characteristics of maghemite (γ - Fe_2O_3) particles which were synthesized with suitable conditions in this experiment are equal to those of commercial grades.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงโดยได้การช่วยเหลืออย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ อาจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร และ อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำริเริ่มในการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เฟอร์ริกออกไซด์ที่มีผลึกเป็นรูปเข็ม ตลอดจนให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ขอขอบคุณอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ Professor.Jen Hwa Hsu ที่ให้การช่วยเหลือในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็ก บริษัท มิดสตาร์ จำกัด ซึ่งได้มอบสารแกมมาเฟอร์ริกออกไซด์จากต่างประเทศให้มาทำการศึกษา คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช) ที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และสถานที่ในการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาที่ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา.

.....

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของหัวข้อวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ 4

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4

1.4 กรรมวิธีในการดำเนินการวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 คุณสมบัติและลักษณะของอนุภาคแม่เหล็ก 7

2.1 คุณสมบัติทางแม่เหล็ก 7

2.2 ขนาดของอนุภาคแม่เหล็ก 10

2.3 การจัดเรียงตัวของอนุภาคแม่เหล็ก 14

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเตรียมอนุภาคแม่เหล็กชนิดแมกฮีไมต์ 14

2.4.1 กรรมวิธีทางเคมี 15

2.4.2 กรรมวิธีทางความร้อน 16

2.5 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อน 18

2.5.1 การกำจัดน้ำ 18

2.5.2 การทำรีดักชั่น 18

2.5.3 การทำออกซิเดชั่น 18

2.6 การศึกษาที่ผ่านมา 19

3.1 กรรมวิธีในการทดลอง 22
3.1.1 กรรมวิธีทางเคมี 22
3.1.2 กรรมวิธีทางความร้อน 22
3.2 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการทำการทดลอง..... 23
3.2.1 การตกตะกอน และการทำออกซิเดชั่น 23
3.2.2 การกำจัดน้ำ 24
3.2.3 การทำรีดักชั่น 25
3.2.4 การทำออกซิเดชั่น 25
4 ผลการทดลอง 27
4.1 กรรมวิธีทางเคมี 27
4.1.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมล 27
4.1.2 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมล..... 28
4.1.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 36
4.1.4 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 37
4.1.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการพ่นอากาศ 45
4.1.6 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการพ่นอากาศ 46
4.2 กรรมวิธีทางความร้อน 52
4.2.1 การกำจัดน้ำ 52
4.2.2 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 53
4.2.3 การทำรีดักชั่น 59
4.2.4 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 60
4.2.5 การทำออกซิเดชั่น 64
4.2.6 รายละเอียดของผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 65
4.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างสารแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรม กับ สารแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ 69
4.4 รายละเอียดของผลการวิเคราะห์สารแม่เหล็ก 70

หน้า

5 วิเคราะห์ผลการทดลอง 83
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองของกรรมวิธีทางเคมี 83
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองของกรรมวิธีทางความร้อน 85
6. สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ 87
6.1 สรุปผลการทดลอง 87
6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป 88
6.3 ประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลงานวิจัยที่ได้ 88
รายการอ้างอิง 90
ภาคผนวก 93
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ และ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 94
ภาคผนวก ข. กรรมวิธีการเตรียมสาร และ การวิเคราะห์ 96
ประวัติผู้เขียน 112

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คุณสมบัติที่ต้องการของอนุภาคแม่เหล็กที่จะนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ	2
4.1	ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อชนิด, รูปร่าง และขนาดของผลิตภัณฑ์	37
4.2	ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อชนิด, รูปร่าง และขนาดของผลิตภัณฑ์	36
4.3	ผลของอัตราการพ่นอากาศต่อชนิด, รูปร่าง และขนาดของผลิตภัณฑ์	45
4.4	ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของอนุภาคในขั้นตอนกำจัดน้ำ	52
4.5	ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของอนุภาคในขั้นตอนการทำรีดักชั่น	59
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อชนิดของอนุภาคในขั้นตอนการทำออกซิเดชั่น	64
4.7	เปรียบเทียบคุณสมบัติที่สำคัญระหว่างอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรม กับ อนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากการศึกษา	69
ข-1	แสดงมุมที่เกิดการหักเหของสารอัลฟาเฟอร์ริกออกไซด์	99
ข-2	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารเบต้าเฟอร์ริกออกไซด์	100
ข-3	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารแกมมาเฟอร์ริกออกไซด์	101
ข-4	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารเดลต้าเฟอร์ริกออกไซด์	102
ข-5	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารเฮมาไทต์	103
ข-6	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารแมกนีไทต์	104
ข-7	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารแมกฮีไมต์	105
ข-8	แสดงมุมที่เกิดหักเหของสารวูสไทต์	106
ข-9	แสดงมุมที่เกิดหักเหของโลหะเหล็ก	107
ข-10	แสดงมุมที่เกิดหักเหของโลหะอะลูมิเนียม	108

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 พัฒนาการของอนุภาคแม่เหล็ก 1

1.2 ขั้นตอนของการทดลอง 6

2.1 ฮีสเทอรีซิสลูปทั่วไปของสารแม่เหล็ก..... 7

2.2 ฮีสเทอรีซิสลูปของเทปคาสเซ็ทที่ผลิตจากอนุภาคแม่เหล็ก 3 ชนิด 9

2.3 ลักษณะของขนาดอนุภาคแม่เหล็กที่มีต่อความเป็นแม่เหล็ก 12

2.4 ลักษณะการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอนุภาคแม่เหล็กบนเส้นเทป 13

2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคแม่เหล็กแมกฮีไมต์
ที่มีรูปร่างเป็นเข็ม กับไม่เป็นเข็ม 14

2.6 ขั้นตอนต่าง ๆ ในกรรมวิธีทางเคมี 15

2.7 กระบวนการต่าง ๆ ในกรรมวิธีทางความร้อน 17

2.8 สภาวะต่างๆ ของการเกิดสารแมกนีไทต์และสารเฟอร์ริกออกซีไฮดรอกไซด์
ชนิดต่าง ๆ 21

3.1 แสดงขั้นตอนในการทดลอง 26

4.1 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (R = 2)..... 28

4.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (R = 2) 29

4.3 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (R = 3) 30

4.4 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (R = 3)..... 31

4.5 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (R = 6) 32

4.6 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (R = 6) 33

4.7 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (R = 8) 34

4.8 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (R = 8) 35

4.9 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (T = 60^{o}C) 37

4.10 ผลวิเคราะห์ขั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (T = 60^{o}C) 38

4.11 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (T = 45^{o}C) 39

4.12 ผลวิเคราะห์ขั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (T = 45°C) 40
4.13 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (T = 30°C) 41
4.14 ผลวิเคราะห์ขั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (T = 30°C) 42
4.15 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (T = 10°C) 43
4.16 ผลวิเคราะห์ขั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (T = 10 °C) 44
4.17 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อัตราการพ่นอากาศเท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที) 46
4.18 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อัตราการพ่นอากาศเ ท่ากับ 0.1 ลิตรต่อนาที)..... 47
4.19 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อัตราการพ่นอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที) 48
4.20 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อัตราการพ่นอากาศเ ท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที)..... 49
4.21 ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อัตราการพ่นอากาศเท่ากับ 1.0 ลิตรต่อนาที) 50
4.22 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อัตราการพ่นอากาศเ ท่ากับ 1.0 ลิตรต่อนาที)..... 51
4.23 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 200 °C) 53
4.24 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 250 °C) 54
4.25 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 300 °C) 55
4.26 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 350 °C) 56
4.27 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 400 °C) 57
4.28 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 450 °C) 58
4.29 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 325 °C) 60
4.30 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 350 °C) 61
4.31 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 375 °C) 62
4.32 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 400 °C) 63
4.33 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 200 °C) 65
4.34 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 250 °C) 66
4.35 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 300 °C) 67
4.36 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้เครื่อง XRD (อุณหภูมิเท่ากับ 350 °C) 68

4.37 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรม 70
4.38 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรม 71
4.39 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นจากการศึกษา..... 72
4.40 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นจากการศึกษา 73
4.41 ผลการวิเคราะห์คุณภาพแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยใช้เครื่อง XRD 74
4.42 ผลการวิเคราะห์คุณภาพแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เครื่อง XRD 75
4.43 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศไต้หวัน ครั้งที่ 1..... 76
4.44 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศไต้หวัน ครั้งที่ 2..... 77
4.45 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศญี่ปุ่น..... 78
4.46 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศไต้หวัน ครั้งที่ 1..... 79
4.47 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศไต้หวัน ครั้งที่ 2..... 80
4.48 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศญี่ปุ่น ครั้งที่ 1..... 81
4.49 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กจากประเทศญี่ปุ่น ครั้งที่ 2..... 82
ข-1 แผ่นอะลูมิเนียมสำหรับบรรจุสารเพื่อเตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD 98
ข-2 อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษารูปร่างและ ขนาดอนุภาคของสาร 109
ข-3 แสดงส่วนประกอบของกล้องทรานมิสชั่นอิเล็กตรอนไมโครสโคป..... 110
ข-4 แสดงถึงลักษณะของกริดทองแดง..... 111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย