

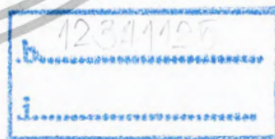
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม Co-Ni-Fe
ด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า

ELECTROPLATING OF Co-Ni-Fe FERROMAGNETIC MATERIALS
ALLOYS WITH CURRENT CONTROL



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 117487
วัน,เดือน,ปี... 5 ค.ศ. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม Co-Ni-Fe
ด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า

ELECTROPLATING OF Co-Ni-Fe FERROMAGNETIC MATERIALS
ALLOYS WITH CURRENT CONTROL



ปริญญาานิพนธ์นี้สำหรับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

รายงาน ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม Co-Ni-Fe
ด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า

ELECTROPLATING OF Co-Ni-Fe FERROMAGNETIC
MATERIALS ALLOYS WITH CURRENT CONTROL

ผู้จัดทำ

นายณัฐวุฒิ ทิพพานนทกุล รหัส 50010511

นายธนบดี จำปา รหัส 50010604

นายธนธิป รัตนบุญพร รหัส 50010647

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง)

การหุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม Co-Ni-Fe ด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า

นายณัฐฉิ ทิพพานทกุล รหัส 50010511

นายชนบดี จำปา รหัส 50010604

นายธนชาติ รัตนมณูพร รหัส 50010647

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุเพิ่มขึ้นมากกว่า 2TB และความต้องการยังเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ซึ่งการเก็บข้อมูลในลักษณะสัญญาณแม่เหล็กยังเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นหัวข้องานเขียน ข้อมูลซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ทำให้ความจุเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็นวัสดุสารแม่เหล็กที่ แสดงคุณสมบัติแม่เหล็กแบบอ่อน และอยู่ในรูปของโลหะผสมที่ให้ค่าความเหนียวสูงกว่าแบบธาตุ โลหะเดี่ยว ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการ Electroplating ในการสร้างวัสดุโลหะผสม เพราะวิธีการ ดังกล่าวจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการอื่นๆ เช่นวิธีการ Sputtering โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา เรื่องอัตราส่วนโลหะผสมของธาตุ Co, Ni และ Fe ซึ่งเป็นธาตุโลหะหลักในการผลิตหัวอ่านเขียนข้อมูล โดยการจ่ายกระแส ให้กับเอาโนดของธาตุโลหะแต่ละชนิด ผลที่ได้ธาตุทั้งสามจะอยู่ในรูปโลหะผสม ซึ่งมีอัตราส่วนต่างๆกัน ซึ่งยืนยันโดยการวิเคราะห์หาอัตราส่วนด้วย SEM และวิเคราะห์องค์ประกอบ ของโครงสร้างผลึกด้วย XRD

ELECTROPLATING OF Co-Ni-Fe FERROMAGNETIC MATERIALS ALLOYS WITH CURRENT CONTROL

Mr. Nattavut Tippanontakul ID 50010511

Mr. Tanabodee Champha ID 50010604

Mr. Tanathip Raftanamanoonporn ID 50010647

Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang Advisor

Educational Year 2553

Abstract

Due to current requirement of high recording density is higher than 2TB and increasing in the future. Magnetic storage is the main technology for recording data. Therefore, read/write head are crucial elements that improved recording density. Moreover, read/write head are composed of magnetic elements that are indicated soft magnetic behavior and formed magnetic alloy. The magnetization of magnetic alloy is higher than single magnetic element. Electroplating process is one of the techniques that used for magnetic alloys and lower complicated than sputtering process. The main purpose of this study is investigation of Co-Ni-Fe ratio after electroplating method by applying current. Morphology of SEM which can be indicated that the surface of Co-Ni-Fe samples, composited ratio is different between Co, Ni and Fe. Besides, XRD was used for material structure analysis.

Keyword: Magnetic, Read/Write Head, Co-Fe alloy

กิตติกรรมประกาศ

รายงานเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ช่วยวางแผนแนวทางการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี จนสำเร็จตามลู่ทางได้ตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำความรู้ ช่วยแก้ปัญหาอุปสรรคในการทดลอง เทคนิคการทดลอง และประสบการณ์ที่ดีตลอดการทำการทดลอง

สุดท้ายต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง เป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากรายงานฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

นายณัฐวุฒิ ทิพพานนทกุล รหัส 50010511

นายธนบดี จำปา รหัส 50010604

นายธนารักษ์ รัตนมณูญพร รหัส 50010647

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติและความเป็นมา	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทดลอง	4
2.1 หน่วยพื้นฐานต่างๆที่วัดด้วยเรื่องของแม่เหล็ก	4
2.2 ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก	7
2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็กแบบ Ferro magnetism	10
2.4 Ferromagnetic Domains	10
2.5 ประเภทต่างๆของพลังงานที่เป็นตัวกำหนด โครงสร้างของ ferromagnetic domains	11
2.6 การทำให้โลหะจำพวก Ferromagnetic มีสภาพสภาวะแม่เหล็ก และหมดสภาพสภาวะแม่เหล็ก	14
2.7 วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft	15
2.8 วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard	16
2.9 Ferrites	17
2.10 โลหะอัลลอยด์ (Alloy)	19

สารบัญ (ต่อ)

2.11 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	19
2.12 การเกิดเกรนและการตกผลึกของ โลหะ (Grain and Grain boundary)	20
2.13 Potential of Hydrogen ion (pH)	24
2.14 เครื่อง pH meter	25
บทที่ 3 การทดลอง	30
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	30
3.2 กระบวนการทดลอง	35
3.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4.1 ผลของการวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างและค่า %Fe กับ %Co ของสารตัวอย่าง จากการทดลองการชุบแม่เหล็กสองชนิด	40
4.2 ผลของการวัดค่า pH ของสารตัวอย่างจากการทดลองการชุบแม่เหล็กสองชนิด	46
4.3 ผลของการวัดขนาดของเกรน ของสารตัวอย่างจากการทดลอง ชุบวัสดุสารแม่เหล็กสองชนิด	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	112
เอกสารอ้างอิง	114
ภาคผนวก	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า %Fe กับ %Co	40
ตารางที่ 4.2 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่าน้ำหนักของชั้นสารตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการทดลอง	41
ตารางที่ 4.3 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า %Fe กับ %Co	43
ตารางที่ 4.4 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่าน้ำหนักของชั้นสารตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการทดลอง	44
ตารางที่ 4.5 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า pH ของชั้นสารตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการทดลอง	45
ตารางที่ 4.6 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า pH ของชั้นสารตัวอย่าง	50



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ชนิดต่างๆ	2
2.1 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆแท่งแม่เหล็ก	5
2.2 (a) แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวด โซลินอยด์ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด (b) แสดงความเข้ม ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆขดลวด โซลินอยด์ ที่เพิ่มขึ้น เมื่อแท่งเหล็กถูกสอดเข้าไปในขดลวด	5
2.3 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ของวัสดุจำพวก ferromagnetic	6
2.4 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านลวดตัวนำ	7
2.5 แสดงการจัดเรียงตัวของ magnetic dipoles ของ (a) ferromagnetism (b) antiferromagnetism และ (c) ferrimagnetism	9
2.6 แสดงการลดลงของ magnetostatic energy เมื่อขนาดของ domains เพิ่มขึ้นเป็น (a) 1 domain (b) 2 domains และ (c) 4 domains	12
2.7 เป็นตัวอย่างซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ใน โครงสร้างของเหล็ก จะถูก magnetization ได้ดีกว่าทิศทาง $\langle 111 \rangle$	12
2.8 แสดง (a) การจัดเรียงตัวของ magnetic dipole ที่บริเวณผนัง และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง magnetic exchange energy, magnetocrystalline anisotropy energy และความกว้างของ wall	13
2.9 แสดง hysteresis loop วัสดุจำพวก Ferromagnetic	14
2.10 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	20
2.11 แสดงการเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึกของ โลหะ	21
2.12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสม	22
2.13 แสดงลักษณะการเกิดเกรนตามภาวะการเย็นตัว	22
2.14 แสดงการแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ	23
2.15 ตัวอย่างค่า pH ของสารต่างๆ	25
2.16 หลักการอย่างง่ายในการวัดค่า pH	27
2.17 พีเอชมิเตอร์ (pH meter)	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 Deionized water	30
3.2 สารละลาย HCL	31
3.3 สารละลาย CoFe 0.1M (1:1)	31
3.4 Current source	32
3.5 ชี้นสารทองแดง	32
3.6 Cell	33
3.7 กระจกทราย	33
3.8 pH Meter	34
3.9 กระบวนการประกอบ Cell	35
3.10 กระบวนการเตรียมชี้นสารตัวอย่าง	36
3.11 กระบวนการทำการทดลองการชุบแม่เหล็กสองชนิด	37
3.12 กระบวนการวัดค่า pH ของชี้นสารตัวอย่าง	38
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{Fe} กับ %Fe/%Co	41
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{Fe} กับน้ำหนักก่อนและหลังการทดลองของชี้นสารตัวอย่าง	42
4.3 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76$ mA, $I_{Fe} = 19.76$ mA	42
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{Co} กับ %Co/%Fe	43
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{Fe} กับน้ำหนักก่อนและหลังการทดลองของชี้นสารตัวอย่าง	44
4.6 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 19.76$ mA, $I_{Fe} = 1.76$ mA	45
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 1.76$	46
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 4.76$	47
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 7.76$	47
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 10.76$	48
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 13.76$	48
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 16.76$	49
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 19.76$	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ I_{Fe} ค่าต่างๆ	50
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 1.76$	51
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 4.76$	51
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 7.76$	52
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 10.76$	52
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 13.76$	53
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 16.76$	53
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Co} = 19.76$	54
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ I_{Co} ค่าต่างๆ	54
การหุบวัสดุสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76$ mA	
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตำแหน่งที่ 1	
4.23 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	55
4.24 $I_{Fe} = 4.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	56
4.25 $I_{Fe} = 7.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	56
4.26 $I_{Fe} = 10.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	57
4.27 $I_{Fe} = 13.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	57
4.28 $I_{Fe} = 16.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	58
4.29 $I_{Fe} = 19.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	58
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตำแหน่งที่ 2	
4.30 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	59
4.31 $I_{Fe} = 4.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	59
4.32 $I_{Fe} = 7.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	60
4.33 $I_{Fe} = 10.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	60
4.34 $I_{Fe} = 13.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	61
4.35 $I_{Fe} = 16.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	61
4.36 $I_{Fe} = 19.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 1	
4.37 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	62
4.38 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	63
4.39 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	63
4.40 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	64
4.41 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	64
4.42 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	65
4.43 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	65
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 2	
4.44 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	66
4.45 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	66
4.46 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	67
4.47 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	67
4.48 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	68
4.49 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	68
4.50 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	69
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่ 1	
4.51 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	69
4.52 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	70
4.53 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	70
4.54 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	71
4.55 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	71
4.56 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	72
4.57 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่2	
4.58 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	73
4.59 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	73
4.60 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	74
4.61 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	74
4.62 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	75
4.63 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	75
4.64 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	76
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่1	
4.65 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	76
4.66 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	77
4.67 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	77
4.68 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	78
4.69 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	78
4.70 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	79
4.71 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	79
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่2	
4.72 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	80
4.73 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	80
4.74 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	81
4.75 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	81
4.76 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	82
4.77 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	82
4.78 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	83

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
การหุบวัสดุสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76$ mA	
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่าตำแหน่งที่ 1	
4.79 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	83
4.80 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 4.76$ mA	84
4.81 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 7.76$ mA	84
4.82 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 10.76$ mA	85
4.83 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 13.76$ mA	85
4.84 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 16.76$ mA	86
4.85 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 19.76$ mA	86
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่าตำแหน่งที่ 2	
4.86 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	87
4.87 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 4.76$ mA	87
4.88 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 7.76$ mA	88
4.89 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 10.76$ mA	88
4.90 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 13.76$ mA	89
4.91 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 16.76$ mA	89
4.92 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 19.76$ mA	90
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 1	
4.93 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 1.76$ mA	90
4.94 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 4.76$ mA	91
4.95 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 7.76$ mA	91
4.96 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 10.76$ mA	92
4.97 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 13.76$ mA	92
4.98 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 16.76$ mA	93
4.99 $I_{Fe} = 1.76$ mA $I_{Co} = 19.76$ mA	93

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่2	
4.100 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	94
4.101 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$	94
4.102 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$	95
4.103 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$	95
4.104 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$	96
4.105 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$	96
4.106 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$	97
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่1	
4.107 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	97
4.108 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$	98
4.109 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$	98
4.110 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$	99
4.111 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$	99
4.112 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$	100
4.113 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$	100
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่2	
4.114 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	101
4.115 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$	101
4.116 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$	102
4.117 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$	102
4.118 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$	103
4.119 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$	103
4.120 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$	104

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่ 1	
4.121 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	104
4.122 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$	105
4.123 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$	105
4.124 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$	106
4.125 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$	106
4.126 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$	107
4.127 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$	107
ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่ 2	
4.128 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$	108
4.129 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$	108
4.130 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$	109
4.131 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$	109
4.132 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$	110
4.133 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$	110
4.134 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$	111

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	A/m หรือ Oersteds (Oe)
l	ความยาวของขดลวดโซลินอยด์	m
n	จำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์	
i	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าไปในขดลวดโซลินอยด์	A
X _m	proportionality factor	
B	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	Wbm ⁻²
M	ค่าของโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร	
E _g	ผลรวมของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัด	
E _g ⁰	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่า $\alpha=1$	
α	ผลรวม ไอออนของไฮโดรเจน	
T	ค่าของอุณหภูมิสัมบูรณ์	k
R	1.986	Calories/mol degree
F	Faraday	Coulombs per mol
E _{ref}	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ Reference Electrode	
E _j	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ Liquid Junction	

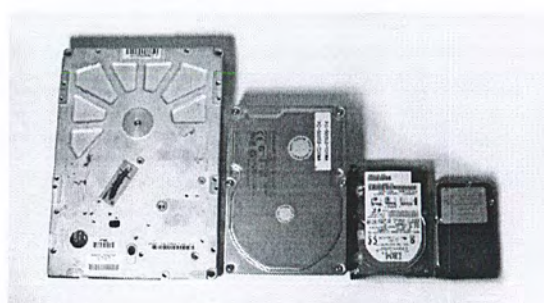
บทที่ 1

บทนำ

1. ประวัติและความเป็นมา

การเก็บข้อมูลด้วยแม่เหล็ก ในช่วงไม่กี่มาปีนี้วัสดุแม่เหล็กได้ทวีความสำคัญขึ้นอย่างมาก ในงานเกี่ยวกับการเก็บบันทึกข้อมูลสารสนเทศ กล่าวคือ การบันทึกด้วยแม่เหล็กได้กลายเป็น วิทยาการหลักสำหรับการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ไปแล้ว ดังจะเห็นได้จากเทป บันทึกเสียง VCR ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์ ฟลอปปีดิสก์ บัตรเครดิต และอื่นๆ ในทาง คอมพิวเตอร์แล้ว สารกึ่งตัวนำถูกใช้เป็นหน่วยความจำหลัก ในขณะที่ดิสก์แม่เหล็กซึ่งสามารถเก็บ ข้อมูลได้ในปริมาณมากกว่าและมีราคาถูกกว่าถูกใช้เป็นหน่วยความจำสำรอง นอกจากนี้ใน อุตสาหกรรมเกี่ยวกับเครื่องบันทึกเสียง (ภาพและเสียง) และ โทรศัพท์ยังคงต้องพึ่งพาเทปแม่เหล็ก อย่างมากสำหรับการเก็บและรีเพลย์ข้อมูลที่เป็นภาพและเสียง

ฮาร์ดดิสก์ที่มีกลไกแบบปัจจุบันถูกประดิษฐ์ขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2499 (1956) โดยนักประดิษฐ์ยุค บุกเบิกแห่งบริษัทไอบีเอ็ม เรย์โนลด์ จอห์นสัน ซึ่งในขณะนั้น ฮาร์ดดิสก์มีขนาดค่อนข้างใหญ่มี เส้นผ่าศูนย์กลางถึง 20 นิ้ว มีความจุเพียงระดับเมกะไบต์เท่านั้น (โดยใช้หน่วยการเปรียบเทียบเป็น ระดับจิกะไบต์ในปัจจุบัน ซึ่ง 1,024MB = 1GB) ในตอนแรกใช้ชื่อเรียกว่า 'ฟิกส์ดิสก์ fixed disk หรืองานบันทึกที่ติดอยู่กับที่' ในบริษัท IBM เรียกว่า วินเชสเตอร์ส Winchesters ต่อมาภายหลังจึง เรียกว่า ฮาร์ดดิสก์ งานบันทึกแบบแข็ง เพื่อจำแนกประเภทออกจาก ฟลอปปีดิสก์ งานบันทึกแบบ อ่อน ตั้งแต่เข้าสู่ช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมา ฮาร์ดดิสก์สามารถพบได้ในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ไม่เฉพาะภายในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ อีกด้วย เช่น เครื่องเล่นเอ็มพีที, เครื่องบันทึกภาพดิจิทัล, กล้องถ่ายรูป, คอมพิวเตอร์ขนาดพกพา PDA จนกระทั่งภายใน โทรศัพท์มือถือ บางรุ่นตั้งแต่ภายในปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นมาเช่นยี่ห้อ (โนเกีย และ ซัมซุง สองบริษัทผู้ผลิตโทรศัพท์มือถือรายแรกที่จำหน่าย โทรศัพท์มือถือที่มีฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 1.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ชนิดต่างๆ

ข้อมูลที่เก็บลงในฮาร์ดดิสก์จะอยู่บนเซกเตอร์และแทร็ก แทร็กเป็นรูปวงกลม ส่วนเซกเตอร์เป็นเสี้ยวหนึ่งของวงกลม อยู่ภายในแทร็กดังรูป แทร็กแสดงด้วยสีเหลือง ส่วนเซกเตอร์แสดงด้วยสีแดง ภายในเซกเตอร์จะมีจำนวนไบต์คงที่ ยกตัวอย่างเช่น 256 ถึง 512 ขึ้นอยู่กับว่าระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์จะจัดการแบ่งในลักษณะใด เซกเตอร์หลายๆ เซกเตอร์รวมกันเรียกว่า คลัสเตอร์

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการ Electroplating

1.2.2 เพื่อศึกษาเรื่องอัตราส่วน โลหะผสมของธาตุ Co และ Fe ซึ่งเป็นธาตุโลหะหลักในการผลิตหัวอ่านเขียนข้อมูล

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของกระแสในสารละลายที่มีองค์ประกอบของ Co และ Fe

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและวิจัย การชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองดังนี้คือ การชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะสองชนิด โดยทำการควบคุมเวลาและปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาว่ากระแสไฟฟ้ามีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของชิ้นสารตัวอย่าง, เปอร์เซ็นต์ของ Cu และ Fe, ค่า pH และขนาดของเกรน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เนื่องจากการเก็บข้อมูลในลักษณะสัญญาณแม่เหล็กยังเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นเราสามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ในการพัฒนาหัวอ่าน Hard disk โดยใน ส่วนหัวอ่านเขียนข้อมูลนั้นเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความจุของ Hard disk

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 กำหนดจุดประสงค์ในการดำเนินงาน
- 1.5.2 ศึกษาและวางแผนออกแบบวิธีการดำเนินงาน
- 1.5.3 แบ่งหน้าที่ให้สมาชิกภายในทีมรับผิดชอบ
- 1.5.4 สมาชิกภายในทีมมาประชุมกันเพื่อวิเคราะห์ปัญหาและผลที่ได้จากการวิจัย



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทดลอง

วัสดุแม่เหล็กเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งต้องงานออกแบบ ทางด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า โดยทั่วไป วัสดุประเภทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. วัสดุแม่เหล็กแบบ soft (soft magnetic materials) เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นแม่เหล็ก และ หมดสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ง่าย มักจะถูกนำมาทำแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์ตัวเล็กๆ และ ตัวสเตรเตอร์ และ โรเตอร์ ในมอเตอร์หรือเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น

2. วัสดุแม่เหล็กแบบ hard (hard magnetic materials) เป็นวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำมาใช้ทำ เป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งยากต่อการทำให้หมดสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ อาทิเช่น แม่เหล็กถาวรที่มีอยู่ใน ลำโพง หูฟัง, โทรทัศน์, มอเตอร์แบบ synchronous และ brushless และ starting motor ในรถยนต์ เป็นต้น

2.1 หน่วยพื้นฐานต่างๆ ที่ว่าด้วยเรื่องของแม่เหล็ก

2.1.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

โลหะจำพวกเหล็ก, โคบอลต์ และ นิกเกิล [Fe, Co, Ni] เป็นธาตุโลหะเพียง 3 ชนิดที่สามารถ เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงรอบตัวโลหะเองได้เมื่อถูกทำให้เป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ธาตุ โลหะทั้ง 3 ชนิดนี้ถูกเรียกว่า ferromagnetic การเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆแท่งเหล็กที่ถูก magnetized นั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากการนำผงเหล็กมาโรยบนกระดาษที่มีเหล็กอยู่ข้างใต้ โดยทั่วไป แม่เหล็กจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ และ ขั้วใต้ ซึ่งยัง ไม่มีใครเคยพบเลยว่าแม่เหล็กมีเพียงขั้วเดียว สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวนำสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ขด ลวดทองแดง ซึ่งเรียกว่า โซลินอยด์ (solenoid) เมื่อมีกระแสไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มดังนี้

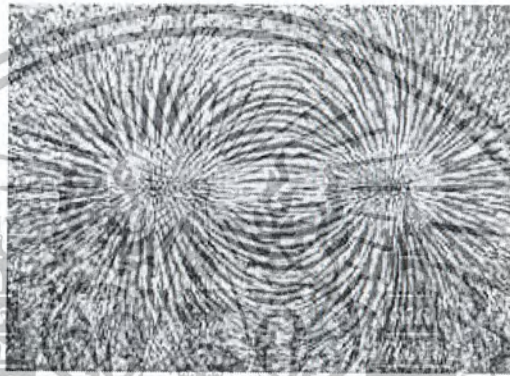
$$H=0.4(22/7)ni/l$$

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, A/m หรือ Oersteds (Oe)

l = ความยาวของขดลวดโซลินอยด์, m

n = จำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์

i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าไปในขดลวดโซลินอยด์, A



รูปที่ 2.1 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ แท่งแม่เหล็ก

- รูปที่ 2.2** (a) แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดโซลินอยด์ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด
 (b) แสดงความเข้ม ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดโซลินอยด์ ที่เพิ่มขึ้นเมื่อแท่งเหล็กถูกสอดเข้าไปในขดลวด

หน่วยของความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) คือ Amperes/metre (A/m) ในระบบหน่วย SI และ Oersteds (Oe) ในระบบหน่วย cgs ความสัมพันธ์ ระหว่างทั้งสองหน่วย คือ $1 \text{ A/m} = 4(22/7)*(1/1000) \text{ Oe}$

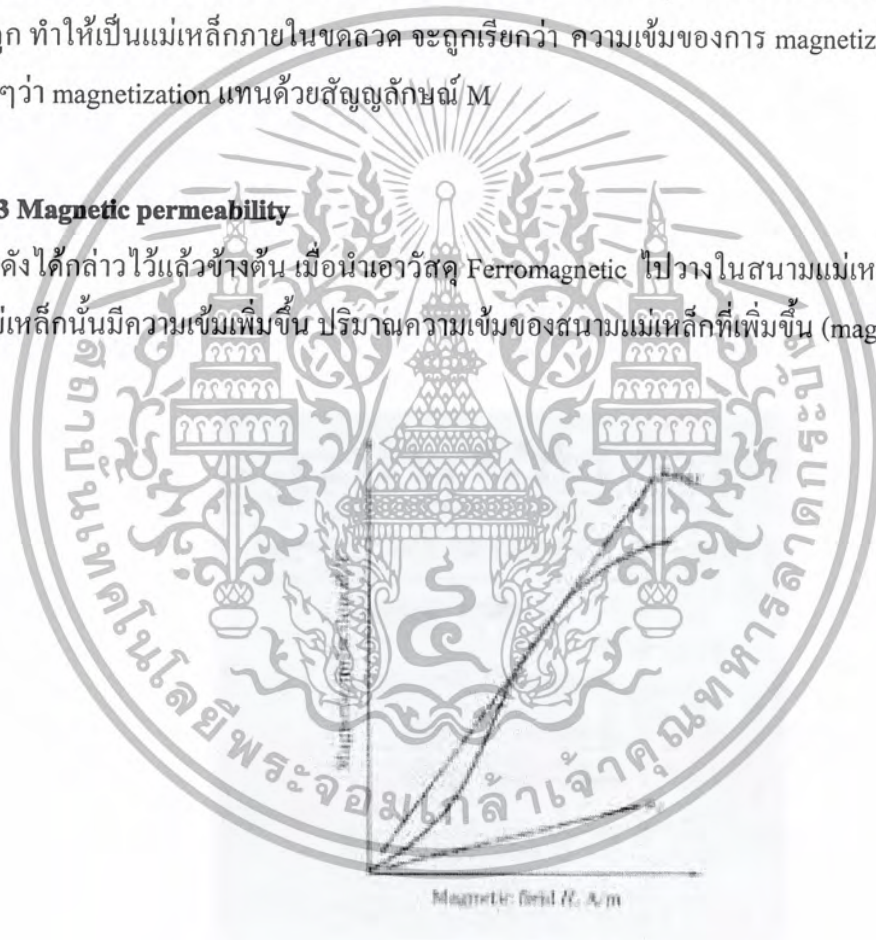
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 Magnetic induction

ถ้านำเอาแท่งเหล็กธรรมดาใส่เข้าไปในขดลวดจะพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกขดลวด โซลีนอยด์มีความเข้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้ เป็นแม่เหล็กภายในขดลวดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นคือ ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวด โซลีนอยด์เอง และ ที่เกิดขึ้นจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น เราอาจเรียกความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่า Magnetic induction หรือ flux density หรือ เรียกง่ายๆว่า induction ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย B ส่วนค่าของโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่ถูก เหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูก ทำให้เป็นแม่เหล็กภายในขดลวด จะถูกเรียกว่า ความเข้มของการ magnetizations หรือ เรียกง่ายๆว่า magnetization แทนด้วยสัญลักษณ์ M

2.1.3 Magnetic permeability

ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เมื่อนำเอาวัสดุ Ferromagnetic ไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กนั้นมีความเข้มเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น (magnetization)



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ของวัสดุจำพวก ferromagnetic

ถ้าค่า magnetic permeability หรือ relative permeability มีค่ามาก จะบอกให้ ทราบว่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของแท่งเหล็กในขดลวดจะมีค่ามากด้วย ในบางครั้ง เราอาจเปรียบเทียบ magnetic permeability ของวัสดุแม่เหล็กเหมือนกับค่า dielectric constant ของ

วัสดุ dielectric (ฉนวนไฟฟ้า) แต่อย่างไรก็ตามค่า magnetic permeability ของวัสดุประเภท ferromagnetic จะไม่คงที่ กล่าวคือค่าของ magnetic permeability ซึ่งสอดคล้องกับค่าความชัน ณ จุดต่างๆบนเส้นโค้ง B-H จะเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) เปลี่ยนไป ดังนั้นโดยปกติเมื่อกล่าวถึงค่า magnetic - permeability ของวัสดุแม่เหล็กจึงมักจะหมายถึงค่า permeability ที่เริ่มต้น หรือ ค่า permeability ที่สูงสุด ซึ่งสามารถหาได้จากความชันบนเส้นโค้ง B - H สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่สามารถถูกทำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่ายจะมีค่า magnetic permeabilities สูง

2.1.4 Magnetic susceptibility

เนื่องจากค่า magnetization (M) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป (H) ดังนั้น จึงอาจเขียนสมการได้ดังนี้

$$M = X_m H$$

ซึ่งค่า X_m คือค่า proportionality factor ซึ่งอาจเรียกว่า magnetic susceptibility เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยสำหรับวัสดุแม่เหล็กแบบ soft มักจะวัดในเทอมของ magnetic susceptibility

2.2 ชนิดของสถานะแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดตัวนำ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำและในทำนองเดียวกันสถานะแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุก็เกิดขึ้นเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนเอง และการเคลื่อนที่รอบ Nuclei



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านลวดตัวนำ

สภาวะแม่เหล็กแบ่งออกได้หลายลักษณะดังนี้ คือ

2.2.1 Diamagnetism

การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัสดุจะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดเสียดสมมูลเล็กน้อยซึ่งเป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็กๆขึ้นในอะตอม ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจากการกระทำดังกล่าวนี้ทำให้เกิดผลของแม่เหล็ก ในทางลบที่เรียกว่า diamagnetism ผลของสภาวะแม่เหล็กแบบ diamagnetism นี้ จะทำให้ค่า magnetic susceptibility เป็นลบเล็กน้อย สภาวะแม่เหล็กแบบ diamagnetism จะเกิดขึ้นได้กับวัสดุทุกชนิด แต่มักจะถูกหักล้างด้วยผลสภาวะแม่เหล็กเชิงบวก

2.2.2 Paramagnetism

วัสดุที่สามารถแสดง magnetic susceptibility ในเชิงบวกเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จะถูกเรียกว่า paramagnetism และ สภาวะ แม่เหล็กแบบ paramagnetism ของวัสดุจะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็ก

วัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบ paramagnetism นี้เกิดขึ้นได้จากการเรียงตัวของ magnetic dipole moments ของอะตอมหรือโมเลกุลของ วัสดุเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทิศทางการเรียงตัวของ magnetic dipole moments นี้จะเกิดความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลทำให้สภาวะแม่เหล็กแบบ paramagnetism นี้ลดลง อะตอมของธาตุ แทรนซิชันและธาตุ rare earths บางชนิด มักจะมีอิเล็กตรอนภายในที่ไม่มีคู่ (unpaired inner electrons) บรรจุอยู่ที่พลังงานชั้นในด้วย เหตุผลเช่นนี้ธาตุเหล่านี้มักจะก่อให้เกิดผลของแม่เหล็กแบบ paramagnetic อย่างมากและในบางครั้งอาจจะแสดงสภาวะแม่เหล็ก ได้แข็งแรงเช่นเดียวกับวัสดุจำพวก ferromagnetic และ ferrimagnetic

2.2.3 Ferromagnetism

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นถึง diamagnetism และ paramagnetism จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกใส่เข้าไป และ จะยังคง สภาพสภาวะแม่เหล็กนั้นได้ตราบเท่าที่สนามแม่เหล็กนั้นยังคงอยู่ แต่ยังมีสภาพสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า ferromagnetism เป็น สภาพสภาวะแม่เหล็กที่สามารถทำให้คงอยู่ได้แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือ ทำให้หมดสภาพไปได้โดยต้องการ สภาพสภาวะแม่เหล็กแบบ ferromagnetism จึงมีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสภาพสภาวะแม่เหล็กเช่นนี้ได้ และมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก , โคบอลต์ และ นิกเกิล นอกจากนี้กาโดไลเนียม ซึ่งเป็นธาตุจำพวก rare

earth ก็ยังสามารถแสดงสมบัติสภาวะ แม่เหล็กแบบ ferromagnetism ได้เช่นกัน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 16 องศาเซลเซียส

สมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ ferromagnetism ของธาตุทรานซิชัน พวก Fe , Co , Ni เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ ซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นใน เกิดการหมุนรอบตัวเองและจัดเรียงตัวในโครงผลึกส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่เป็นคู่ และ หมุนสวนทิศทางกันในระดับพลังงานชั้นใน จะไม่ให้ผลของ magnetic dipole moment นอกจากนี้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมก็จะไม่แสดงผลของ magnetic dipole moment เช่นกัน เพราะอิเล็กตรอนนั้นเกิด พันธะทางเคมีกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมอื่น ดังนั้นจึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อยู่ใน ระดับพลังงานชั้นในของอะตอมจะมี บทบาทสำคัญต่อการแสดงภาพสภาวะแม่เหล็ก แบบ ferromagnetism อาทิเช่น Fe , Co และ Ni ที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่อยู่ที่ชั้นระดับพลังงาน 3d จำนวน 4 , 3 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้ Fe , Co และ Ni สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ ferromagnetism ได้

2.2.4 Antiferromagnetism

เป็นสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวัสดุบางชนิด กล่าวคือ magnetic dipoles ของอะตอมของวัสดุที่มีสมบัติเช่นนี้ จะเรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงตัวของ magnetic dipoles ของ (a) ferromagnetism

(b) antiferromagnetism และ (c) ferrimagnetism

วัสดุที่แสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ antiferromagnetism อาทิเช่น Mn และ Cr เมื่ออยู่ใน สภาพของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะแสดงค่าพลังงานแลกเปลี่ยนเป็นลบ เพราะ $a/d < 1.4$

2.2.5 Ferromagnetism

วัสดุเซรามิกบางชนิดจะประกอบด้วยไอออนต่างชนิดกันซึ่งมี magnetic moments มากน้อยแตกต่างกันไป เมื่อ magnetic moment นั้นมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ตรงกันข้ามปรากฏว่ามันไม่หักล้างกันหมดแต่ยังคงมี magnetic moment สุทธิในทิศทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุ เหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กได้ วัสดุเหล่านี้ถูกเรียกว่า ferrites ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด เช่น magnetite , Fe_3O_4 วัสดุ ferrites จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำจึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก

2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism

ที่อุณหภูมิหนึ่งที่สูงกว่า 0 K พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ magnetic dipoles ของวัสดุจำพวก ferromagnetic ซึ่งมีการจัดเรียงตัว ขนานกันติดอยู่แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไป และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิ Curie วัสดุจำพวก ferromagnetic ซึ่งแสดงสถานะแม่เหล็กแบบ ferromagnetism เดิมจะหมดสภาพไปโดยสิ้นเชิง และ วัสดุนั้น จะกลายเป็นวัสดุที่แสดงสถานะแม่เหล็กแบบ paramagnetism แทนแต่เมื่อวัสดุ ferromagnetic นั้นถูกมาทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิ เหนืออุณหภูมิ Curie อีกครั้ง magnetic domains จะจัดเรียงตัวใหม่ อีกครั้ง และ จะได้วัสดุที่มีสมบัติสถานะแม่เหล็กแบบ ferromagnetism ดังเดิม อุณหภูมิ Curie ของ Fe , Co , Ni นั้นมีค่า เท่ากับ 770 , 1123 และ 358 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2.4 Ferromagnetic Domains

โดยปกติที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอุณหภูมิ Curie นั้น magnetic dipole moment ของอะตอม วัสดุจำพวก ferromagnetic จะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีทิศทางที่ขนานกันในบริเวณ เล็กๆบริเวณหนึ่งที่เรียกว่า magnetic domains แต่ถ้าวัสดุนั้นยังไม่ แสดงสภาพสถานะแม่เหล็กได้ ก็ เพราะว่าแต่ละ domains ยังมีการจัดวางตัวในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้ผลรวมสุทธิของ magnetic moment ของวัสดุทั้งชิ้นมีค่าน้อยหรือเป็นศูนย์

เราสามารถทำให้ domain แต่ละ domain มีการจัดเรียงอย่างมีระเบียบไปในทิศทางเดียวกัน ได้โดยการใส่สนามแม่เหล็กภายนอก เข้าไป เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป magnetic domain จะพยายามจัดเรียงไปในทางทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก ได้โดยการเคลื่อนที่และการ หมุนของผนังของ domain ในช่วงแรกผนังของ domain จะเกิดการเคลื่อนตัวก่อนที่จะเกิดการหมุน เพราะจะใช้พลังงานที่น้อยกว่าดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรก ค่า B หรือ M จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่ใส่เข้าไปเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อ domain สิ้นสุดการเคลื่อนตัว

แล้ว ถ้ายังมีการเพิ่มของสนามแม่เหล็กภายนอกแล้วจะทำให้ domain เกิดการหมุนซึ่งในขั้นตอนนี้ จำเป็นต้องใช้พลังงานที่มากกว่าทำให้การเพิ่มขึ้นของค่า B และ M ลดน้อยลงจะสังเกตเห็นได้ว่า ความชัน ณ จุดต่างๆ ของเส้นโค้ง M และ H จะลดลง

2.5 ประเภทต่างๆของพลังงานที่เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของ ferromagnetic domains

โครงสร้างของ Domains ของวัสดุจำพวก ferromagnetic ถูกกำหนดด้วยพลังงานหลายประเภท และ โครงสร้างนั้นจะเสถียร ที่สุดก็ต่อเมื่อผลรวมของพลังงานศักย์ทั้งหมดต่ำสุด พลังงานที่เกี่ยวข้องนั้น มีดังต่อไปนี้คือ

2.5.1 Exchange energy

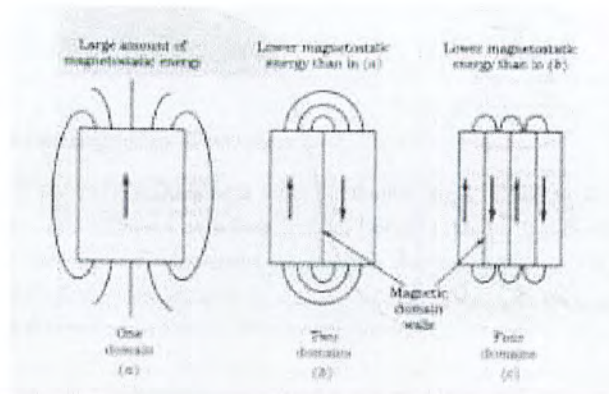
เป็นพลังงานศักย์ที่อยู่ภายใน domains ของวัสดุจำพวก ferromagnetic พลังงานนี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อ dipoles มีการเรียงตัวอย่างมีระเบียบในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าพลังงานศักย์นี้จะลดลงแต่ค่าพลังงานศักย์ภายนอกจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเกิดสนามแม่เหล็กภายนอก

2.5.2 Magnetostatic energy

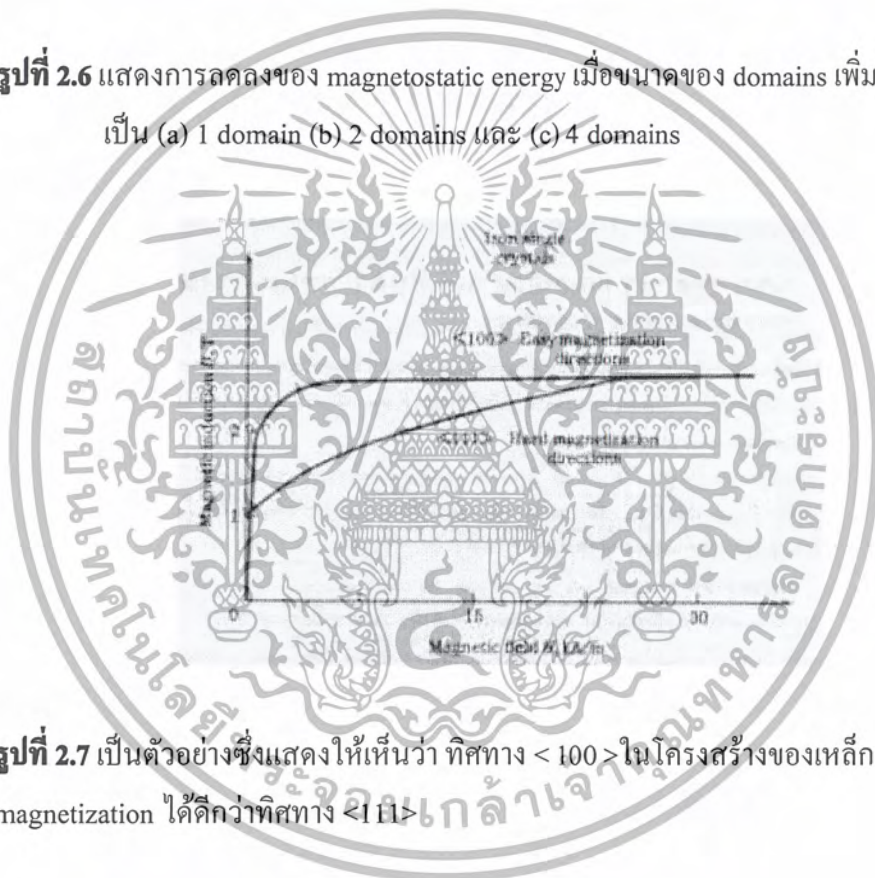
เป็นพลังงานศักย์ของวัสดุจำพวก ferromagnetic ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานนี้จะสามารถถูกทำให้ต่ำลงได้โดยการเพิ่มจำนวน magnetic domains จาก 1 เป็น 2 และ 4 ตามลำดับ

2.5.3 Magnetocrystalline anisotropy energy

เกรนที่มีอยู่ในวัสดุจำพวก ferromagnetic ที่มีโครงสร้างหลายผลึก อาทิเช่น Fe , Ni มักจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน เกรนที่มีทิศทางที่ง่ายต่อการ magnetization ที่มากกว่าเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไปมีค่าน้อย ในขณะที่เกรนที่มีทิศทางที่ยากต่อการ magnetization มักจะให้ค่า magnetic induction ที่น้อยกว่า เมื่อสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปมีค่าน้อย แต่เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปเพิ่มมากขึ้นทิศทางของเกรนที่ยากต่อการ magnetization นั้นก็จะหมุนเพื่อปรับทิศทาง ไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น เป็นผลทำให้ค่า magnetic induction เพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการหมุน domain ที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของทิศทางของเกรนนี้ ถูกเรียกว่า magnetocrystalline anisotropy energy



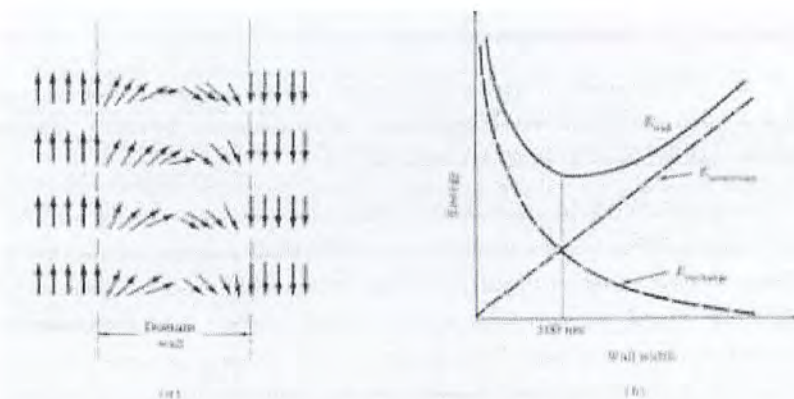
รูปที่ 2.6 แสดงการลดลงของ magnetostatic energy เมื่อขนาดของ domains เพิ่มขึ้น เป็น (a) 1 domain (b) 2 domains และ (c) 4 domains



รูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทิศทาง <100> ในโครงสร้างของเหล็กจะถูก magnetization ได้ดีกว่าทิศทาง <111>

2.5.4 Domain wall energy

Domain wall หมายถึง ขอบเขตที่อยู่ระหว่างสอง domain ซึ่งคล้ายคลึงกับขอบเขตของเกรน แต่แตกต่างกันที่ทิศทางของเกรนจะแตกต่างจากเกรนหนึ่งไป ยังอีกเกรนหนึ่ง โดยทันที ดังนั้น ขอบเขตของเกรนจึงแคบมีขนาดประมาณเท่ากับอะตอม 3 อะตอม แต่ในทิศทางตรงกันข้ามทิศทางของ domain จะค่อยๆเปลี่ยนจาก domain หนึ่งไปยังอีก domain หนึ่งโดยไม่เปลี่ยนแปลงโดยทันทีทันใด จึงทำให้ domain wall กว้างกว่ามีขนาดโดยประมาณเท่ากับอะตอม 300 อะตอม



รูปที่ 2.8 แสดง (a) การจัดเรียงตัวของ magnetic dipole ที่บริเวณผนัง (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง magnetic exchange energy, magnetocrystalline anisotropy energy และความกว้างของ wall

ความกว้างของ domain wall จะมีขนาดเท่าใดนั้นจะขึ้นกับความสมดุลระหว่างพลังงาน exchange และ พลังงาน magnetocrystalline anisotropy กล่าวคือ ถ้าผนัง domain กว้างขึ้นพลังงาน exchange จะลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามพลังงาน magnetocrystalline anisotropy จะกลับเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นที่ความกว้างของผนัง domain จะมีพลังงานสุทธิทั้งสองต่ำสุด

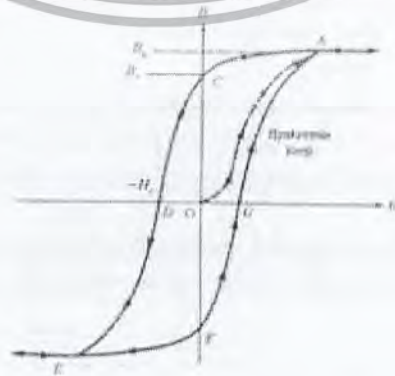
2.5.5 Magnetostrictive energy

เมื่อวัสดุจำพวก ferromagnetic ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กขนาดของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการยืดตัว หรือ หดตัว บราวกฎการยืดตัว หรือ หดตัว ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้ ถูกเรียกว่า magnetostriction ซึ่งจะก่อให้เกิดความเค้นขึ้น และ พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นนี้จะถูกเรียกว่า magnetostrictive energy

สาเหตุของการเกิด magnetostrictive energy นี้ อาจอธิบายได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะระหว่างอะตอมในวัสดุ ferromagnetic เมื่อ dipole moment ของอิเล็กตรอน เกิดการหมุนตัวเพื่อการจัดเรียงตัวในขณะที่ทำการ magnetization

2.6 การทำให้โลหะจำพวก Ferromagnetic มีสภาพสถานะแม่เหล็ก และหมดสภาพสถานะแม่เหล็ก

โลหะจำพวก ferromagnetic อาทิเช่น Fe , Co , Ni จะให้ค่า magnetic induction ค่อนข้างสูงหรือ เกิดสภาพสถานะแม่เหล็ก ค่อนข้างมากเมื่อถูกนำมาวางไว้ในสนามแม่เหล็ก และ สภาพสถานะแม่เหล็กนั้นจะยังคงเหลืออยู่บางส่วนแม้จะนำออกจากสนามแม่เหล็กนั้นแล้ว เราลองพิจารณาถึงผลของการใช้สนามแม่เหล็กภายนอก (H) ต่อ magnetic induction (B) ของโลหะจำพวก ferromagnetic จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในโลหะจำพวก ferromagnetic เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า magnetic induction เพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ตามเส้นโค้ง OA จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวที่จุด A และ เมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนถึงศูนย์ เส้นโค้งที่แสดงปริมาณ magnetic induction จะไม่กลับมาตามแนวเส้นโค้งเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง AC ใหม่ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าโลหะจะยังคงแสดงสภาพสถานะแม่เหล็กอยู่แม้จะนำเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก (H=0) แล้วก็ตาม โดยแสดงค่า magnetic induction เท่ากับ Br (จุด C) จึงถูกเรียกว่า remanent induction ค่า magnetic induction ของโลหะจะลดลงเป็นศูนย์ หรือหมดสภาพสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง เมื่อใส่แม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามในปริมาณความเข้มเท่ากับ Hc (จุด D) ซึ่งเรียกว่า coercive force ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศ หรือ ให้คิดลบมากขึ้นก็จะทำให้โลหะมีค่า magnetic induction เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้ง DE ในทิศทางตรงข้ามจากเดิม และ จะอิ่มตัวที่จุด E เมื่อหยุดการให้สนามแม่เหล็กกลับทิศนี้ ค่า magnetic induction ก็จะเปลี่ยนแปลงตามแนวเส้นโค้ง EF และ เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปอีก เส้นโค้ง B-H จะดำเนิน ตามแนว FGA ได้ loop ที่สมบูรณ์ครบหนึ่งรอบ ซึ่งเรียกว่า hysteresis loop พื้นที่ภายในทั้งหมดของ loop จะแสดงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียเพื่อใช้ในการทำให้โลหะ แสดงสภาพสถานะแม่เหล็ก หรือ ทำให้สภาพสถานะแม่เหล็กนั้นหมดไป



รูปที่ 11.15 แสดง hysteresis loop ของวัสดุจำพวก ferromagnetic

รูปที่ 2.9 แสดง hysteresis loop วัสดุจำพวก Ferromagnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft

เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เกิดสภาพสภาวะแม่เหล็ก หรือ หมดสภาพสภาวะแม่เหล็กได้ง่าย แต่วัสดุแม่เหล็กแบบ hard จะทำให้เกิดสภาพสภาวะ แม่เหล็ก หรือ หมดสภาพสภาวะแม่เหล็กได้ยากกว่า วัสดุแม่เหล็กแบบ soft อาทิเช่น โลหะผสมที่ประกอบด้วย Fe และ 3.4 % Si ซึ่งถูกใช้ทำแกนของหม้อแปลง ,มอเตอร์ และ เครื่องปั้นไฟ จะมี hysteresis loop ที่เรียวและแคบ ซึ่งมีค่า coercive forces ค่อนข้างต่ำ ในทางตรงกันข้ามวัสดุแม่เหล็กแบบ hard ที่มักถูกใช้ เป็นแม่เหล็กถาวร จะมี hysteresis loops ที่กว้างซึ่งมีค่า coercive force ค่อนข้างสูง วัสดุแม่เหล็กแบบ soft ควรจะมี hysteresis loop ที่มีค่า coercive force ต่ำ และมีรูปร่างที่เรียว และ แคบเพราะจะทำให้ง่ายต่อการ ทำให้เป็นแม่เหล็ก และ จะทำให้ค่า magnetic permeability และค่า saturation induction สูง พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กเป็น soft นั้นมีดังนี้ คือ

2.7.1 Hysteresis energy losses

เป็นพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ในการพลิกหรือ ทำให้ผนัง domain เคลื่อนที่ในระหว่างการทำให้ magnetization และ demagnetization เพราะฉะนั้นถ้ามีสิ่งแปลกปลอม หรือ ความบกพร่องภายใน โครงผลึกก็จะทำให้พลังงาน สูญเสียนี้นี้มีมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าวัสดุแม่เหล็กแบบ soft ถูกใช้เป็นแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง ไฟฟ้าของกระแสสลับที่มีความถี่มากขึ้นก็จะทำให้การสูญเสียพลังงานมีมากขึ้น

2.7.2 Eddy - current energy losses

เมื่อแกนแม่เหล็กถูกป้อนด้วยกระแสไฟสลับเข้าไป จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแกว่งไปมา ซึ่งจะก่อให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น และ ก่อให้เกิดกระแสไหลวน ที่เรียกว่า eddy - current ภายในเนื้อวัสดุ และเนื่องจากภายในเนื้อ วัสดุมีความต้านทาน เมื่อกระแส eddy - current นี้ไหลผ่านก็จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งเราเรียกพลังงานที่สูญเสียนี้ว่า eddy current losses ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน วิธีป้องกันการเกิด eddy current energy losses นี้ อาจกระทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนกันระหว่างแกนแม่เหล็ก หรือ ใช้วัสดุแม่เหล็กแบบ soft ที่ค่อนข้างจะเป็นฉนวน อาทิเช่น วัสดุจำพวก ferrimagnetic oxide

Iron - silicon alloys เป็นวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง การที่โลหะผสมนี้มี Si ผสมอยู่ 3-4 % นั้นมีข้อดีหลายประการดังนี้ คือ

Si จะช่วยทำให้เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำมีความต้านทานมากขึ้นทำให้พลังงานสูญเสียเนื่องจาก eddy current ลดน้อยลง

Si จะช่วยลดพลังงาน magnetoanisotropy ของเหล็กแต่จะเพิ่ม magnetic permeability ซึ่งเป็นผลทำให้การสูญเสียพลังงานลดน้อยลง

Si จะช่วยลด magnetostriction และ ทำให้ hysteresis energy losses ลดลง นอกจากนี้ยังทำให้เสียงรบกวนที่เกิดจาก transformer ลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม การที่มี Si อยู่จะทำให้เหล็กกล้ามีความเหนียวลดลง และ จะทำให้ค่า saturation induction และ อุณหภูมิ Curie ลดลง

Metallic glasses เป็นวัสดุโลหะชนิดใหม่ที่มีสมบัติพิเศษ คือ มีโครงสร้างไม่เป็นผลึกซึ่งแตกต่างกับโลหะผสมทั่วไปที่มักจะมีโครงสร้างแบบผลึกซึ่งอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ วัสดุจำพวก metallic glasses มีสมบัติพิเศษที่สำคัญ คือ มีความแข็งแรงมาก, แข็ง และ มีความยืดหยุ่นบ้าง นอกจากนี้ยังทนต่อการกัดกร่อนได้ดี วัสดุ metallic glasses ที่สำคัญที่นิยมใช้งานวิศวกรรมซึ่งเป็นแม่เหล็กแบบ soft ที่มีค่า magnetic permeability ที่สูง ดังนั้นจึงง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กและทำให้หดรหัสภาพสถานะแม่เหล็กมี hysteresis loops ที่แคบและมีการสูญเสีย hysteresis energy น้อย เมื่อเทียบกับ silicon steel

Nickel - iron alloys โดยทั่วไปวัสดุจำพวกเหล็กบริสุทธิ์และโลหะผสมระหว่างเหล็ก - ซิลิกอนนั้นมักจะมีค่า magnetic permeabilities ต่ำในสถานะความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กน้อย แต่วัสดุแม่เหล็กเหล่านี้จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาเท่าไรนัก เมื่อถูกใช้ทำแกนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะมักจะถูกใช้ในสถานะที่มีการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปมาก แต่สำหรับเครื่องมือสื่อสารต่างๆที่มีความไวสูงที่ใช้ในการตรวจจับ หรือ ส่งสัญญาณมักจะต้องใช้แม่เหล็ก อาทิเช่น โลหะผสมนิเกิล-เหล็ก ที่มีค่า magnetic permeabilities สูงในสถานะความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กต่ำ วัสดุผสมโลหะนิเกิลและเหล็กจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ โลหะผสมที่มี Ni 50% และ Ni 79% โลหะผสมที่มี Ni อยู่ 50% จะมีค่า magnetic permeabilities ปานกลางและ ค่า saturation induction สูง ส่วนโลหะผสมที่มี Ni อยู่ 79% จะมีค่า saturation induction ต่ำ โลหะผสมเหล่านี้มักจะถูกใช้ในเครื่องเสียง และ หม้อแปลง , ตัวrelays เป็นต้น

2.8 วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard

หรือแม่เหล็กถาวรเป็นวัสดุที่ทำให้เป็นแม่เหล็กหรือหดรหัสภาพสถานะแม่เหล็กได้ยาก มีค่า remanant magnetic induction (Br) สูง และ coercive force (Hc) มาก จะเห็นได้ว่ารูปร่างของ hysteresis loop ของวัสดุแม่เหล็กแบบ hard จะกว้างและสูง ความยากง่ายในการทำให้วัสดุแม่เหล็กแบบ hard หดรหัสภาพสถานะแม่เหล็กได้นั้น สามารถบอกได้จากพื้นที่ที่อยู่ใน quadrant ที่สองของ hysteresis loops ที่เรียกว่า maximum energy product, (BH)max ซึ่งเป็นผลคูณสูงสุดของค่า

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

magnetic induction(B) และ demagnetizing field(H) มีหน่วยในระบบ SI เป็น kJ / m^3 หรือในระบบ cgs เป็น G.Oe

2.9 Ferrites

เป็นวัสดุแม่เหล็กจำพวกเซรามิกที่ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) รวมกับออกไซด์อื่นๆ หรือพวกคาร์บอเนตที่อยู่ในลักษณะเป็นผงแล้วนำไปอัดและเผาที่อุณหภูมิสูง บางครั้งก็จำเป็นต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้รูปร่างตามที่ต้องการ ค่า magnetic จะไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับวัสดุเหล็กจำพวก ferromagnetic โครงสร้าง domain และ hysteresis loops ของพวก ferrites จะเหมือนกับวัสดุแม่เหล็กจำพวก ferromagnetic และแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ เช่น กัน คือ แบบ soft และแบบ hard

2.9.1 วัสดุ ferrite แบบ soft

วัสดุ ferrite แบบ soft จะแสดงสถานะแม่เหล็กแบบ ferrimagnetism ซึ่งมีค่า magnetic moment สุทธิมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น องค์ประกอบของโครงสร้างของวัสดุ ferrite แบบ soft วัสดุ ferrite แบบ soft จะประกอบด้วย $\text{MO-Fe}_2\text{O}_3$ เมื่อ M คือโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 และมีโครงสร้างแบบ inverse spinel ซึ่งคัดแปลงลงมาจากโครงสร้างจะประกอบด้วย 8 subcell

2.9.2 วัสดุ ferrite แบบ hard

วัสดุแม่เหล็ก ferrite แบบ hard ที่มักถูกใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร โดยทั่วไปมีโครงสร้างแบบ hexagonal วัสดุแม่เหล็ก ferrite แบบ hard จะมีค่า (BH) max ประมาณ 14-28 KJ/ลูกบาศก์เมตร และมักนิยมถูกใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, relays และ motors เป็นต้น วัสดุแม่เหล็กเป็นวัสดุอุตสาหกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ถูกใช้ในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั้งหมด จะเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบ ferromagnetic หรือ ferrimagnetic ที่มีค่า magnetization มาก วัสดุแม่เหล็กแบบ ferromagnetic ที่สำคัญจะเป็นวัสดุอัลลอยด์ของ Fe , Co , Ni ในปัจจุบันนี้มีวัสดุแม่เหล็ก ferromagnetic หลายชนิดที่ถูกทำขึ้นร่วมกับธาตุจำพวก rare - earth เช่น Sm ในวัสดุแม่เหล็กจำพวก ferromagnetic นี้ อาทิเช่น Fe จะมีบริเวณที่เรียกว่า magnetic domain ซึ่งเป็น บริเวณที่ magnetic dipole moments จะเรียงตัวขนานซึ่งกันและกัน โครงสร้างของ magnetic domain ในวัสดุแม่เหล็ก จำพวก ferromagnetic เหล่านี้จะถูกกำหนดโดยพลังงานดังนี้

คือ พลังงานแลกเปลี่ยน , พลังงาน magnetostatic , พลังงาน magnetocrystalline anisotropy , พลังงาน domain wall และพลังงาน magnetostrictive ซึ่งผลรวมของพลังงานเหล่านี้ จะต้องต่ำสุด ถ้า ferromagnetic domains ในวัสดุตัวอย่างมีทิศทางเป็นแบบ random แล้ว วัสดุตัวอย่างนั้นจะอยู่ในสภาพไม่แสดง สภาวะแม่เหล็กแต่เมื่อวัสดุตัวอย่างนั้นถูกใส่สนามแม่เหล็กเข้าไป domain ที่มีอยู่ใน วัสดุตัวอย่างจะเกิดการจัดเรียงตัวและวัสดุจะแสดง สภาพสภาวะแม่เหล็กและยังแสดงสภาพสภาวะแม่เหล็กอยู่แม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนเข้าไปถูกนำออกไป พฤติกรรม magnetization ของ วัสดุแม่เหล็กจำพวก ferromagnetic จะถูกบันทึกได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง magnetic induction (B) และ สนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป (H) ซึ่งเรียกว่า hysteresis loop เมื่อวัสดุแม่เหล็กจำพวก ferromagnetic ที่ไม่แสดงสภาพสภาวะแม่เหล็ก ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กโดยใส่สนามแม่เหล็ก ภายนอกเข้าไปค่า magnetic induction ของวัสดุจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว เรียกว่า saturation induction และ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกนำออกไปค่า magnetic induction จะลดลงจนได้ค่าๆหนึ่ง ซึ่ง เรียกว่า remanant induction ค่า magnetic induction ของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ได้จะต้องใส่ สนามแม่เหล็กกลับทิศภายนอกเข้าไป และค่าสนามแม่เหล็ก กลับทิศภายนอกที่ใส่เข้าไปและทำให้ ค่า magnetic induction มีค่าเป็นศูนย์นี้เรียกว่า coercive force (H) วัสดุแม่เหล็กแบบ soft จะเป็น วัสดุแม่เหล็กที่ง่ายต่อการทำให้เกิดสภาพสภาวะแม่เหล็ก และ หหมดสภาพสภาวะแม่เหล็ก สมบัติ ทางแม่เหล็กที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็ก แบบ soft คือมี permeability สูง , ค่า saturation induction มาก และ ค่า coercive force ต่ำ เมื่อวัสดุแม่เหล็กจำพวก ferromagnetic แบบ soft ถูก magnetized และ demagnetized ซ้ำๆกันจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจาก hysteresis และ eddy - current energy ขึ้น ตัวอย่างของวัสดุจำพวก ferromagnetic แบบ soft มีดังนี้ คือ อัลลอยด์ที่ประกอบด้วย Fe และ 3 - 4% Si ซึ่งถูกใช้ในมอเตอร์ และ หม้อแปลงไฟฟ้า และ generators ส่วน อัลลอยด์ที่ประกอบด้วย Ni และ 20 - 50% Fe ที่ถูกใช้ ในอุปกรณ์สื่อสารที่ต้องการความไวสูง วัสดุแม่เหล็กแบบ hard จะเป็น วัสดุแม่เหล็กที่ยากต่อการทำให้เกิดสภาพสภาวะแม่เหล็กและหมด สภาพสภาวะแม่เหล็ก สมบัติที่ สำคัญของ วัสดุแม่เหล็กแบบ hard คือ มีค่า coercive force และ saturation induction สูง กำลัง ของ วัสดุแม่เหล็กแบบ hard จะถูกวัดโดยค่า maximum energy product ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของผลคูณ ระหว่าง B และ H ในส่วน quadrant 2 ของ B - H hysteresis loop ตัวอย่างของวัสดุจำพวก ferromagnetic แบบ hard อาทิเช่น alnicos ซึ่งใช้เป็น แม่เหล็กถาวรในงานทางด้านไฟฟ้า และ อัล ลอยด์ของ rare - earth บางชนิด เช่น SmCo_5 และ $\text{Sm}(\text{Co,Cu})_{7.5}$ อัลลอยด์ของ rare - earth จะใช้ใน มอเตอร์ขนาดเล็กและงานอื่นๆ วัสดุ ferrite เป็นสารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นวัสดุแม่เหล็กที่ สำคัญในงานอุตสาหกรรม วัสดุเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น ferrimagnetic เนื่องจาก magnetic moment สุทธิ เกิดขึ้นจากโครงสร้างทางไอออนิก วัสดุแม่เหล็กจำพวก ferrite แบบ soft ทั้งหมดจะมีองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานดังนี้ คือ $MO \cdot Fe_2O_3$ เมื่อ M เป็นไอออนที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 เช่น $Fe(2+)$, $Mn(2+)$, $Ni(2+)$ วัสดุเหล่านี้จะมีโครงสร้างแบบ inverse spinel และ ถูกประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อาทิเช่น งานที่มีสัญญาณ ค่ำ , memory - core , audiovisual และ recording - head เป็นต้น และเนื่องจากวัสดุเหล่านี้เป็นฉนวนดังนั้นจึงสามารถถูกใช้ในงานที่มีความถี่สูงได้ซึ่งสามารถแก้ปัญหาทางด้านพลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับได้ ส่วนวัสดุแม่เหล็กจำพวก ferrite แบบ hard จะมีสูตรทั่วไปดังนี้ คือ $MO \cdot 6Fe_2O_3$ เมื่อ M ไอออนของ Ba และ Sr ซึ่งมักจะถูกประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการวัสดุที่มีราคาไม่สูงมากนัก และมีความหนาแน่นต่ำวัสดุเหล่านี้มักจะถูกใช้ในลำโพงเครื่องเสียง, โทรศัพท์ เป็นต้น

2.10 โลหะอัลลอยด์ (Alloy)

โลหะเจือ โลหะผสม หรือ อัลลอย (อังกฤษ: alloy) คือวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยวัสดุโลหะเจือที่ได้จะมีคุณสมบัติแตกต่างจากส่วนประกอบเดิมของมัน โลหะเจือถ้าเกิดจากโลหะ 2 ชนิด เรียกว่า ไบนารีอัลลอย (binary alloy), 3 ชนิด เรียกว่า เทอร์นารีอัลลอย (ternary alloy), 4 ชนิด เรียกว่า ควอเตอร์นารีอัลลอย (quaternary alloy) ตามธรรมชาติโลหะเจือจะถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติที่ต้องการมากกว่าการดูที่ส่วนผสมของมัน ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าจะแข็งแรงกว่าเหล็กซึ่งเป็นธาตุเหล็ก ทองเหลืองจะมีความทนทานมากกว่าทองแดง แต่มีความสวยงามน่าดึงดูดใจมากกว่าสังกะสี ต่างจากโลหะบริสุทธิ์ โลหะเจือหลายชนิดไม่ได้มีจุดหลอมเหลวจุดเดียว มันจะมีช่วงหลอมเหลวแทน ซึ่งในวัสดุจะเป็นของผลมระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว อุณหภูมิที่ซึ่งการหลอมเหลวเริ่มเรียกว่า โซลิดัส (solidus) และอุณหภูมิที่ซึ่งการหลอมเหลวหมดเรียกว่า ลิกวิดัส (liquidus) โลหะเจือพิเศษสามารถจะออกแบบให้มีจุดหลอมเหลวเดียวได้ ซึ่งเรียกโลหะเจือนี้ว่า ยูทีคติกมิกซ์เจอร์ (eutectic mixture)

2.11 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) คือ วิธีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการชุบโลหะ โดยการเปลี่ยนสารละลายของสสารที่ต้องการใช้ชุบให้อยู่ในรูปของไอออนบวก ซึ่งจะไปจับตัวเป็นชั้นบางๆ บนวัสดุนำไฟฟ้าจำพวกโลหะที่ถูกใช้เป็นตัวถูกชุบ

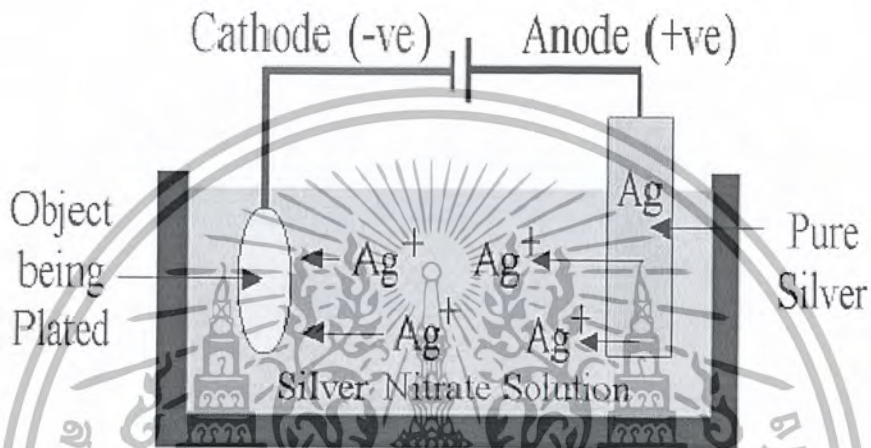
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้น มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อขจัดเซกคุณภาพที่ขาดไปของวัสดุที่เป็นตัวถูกชุบ เช่น คุณสมบัติการป้องกันการหลุดลอกเนื่องจากการขัดสี คุณสมบัติป้องกันการนำ

เป็ย คุณสมบัติการหล่อลื่น คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ความสวยงาม เป็นต้น โดยสสารของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณเห็นหรือได้เอกสารฉบับนี้จะอยู่ภายใต้การดูแลของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการศึกษาแห่งชาติ กระทรวงศึกษาธิการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ชุบจะไปเคลือบอยู่บนวัสดุที่ต้องการชุบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ นอกเหนือจากนี้ ยังใช้เพิ่มความหนาและขนาดให้แก่วัสดุต่างๆที่เล็กเกินไปได้ด้วย

2.11.1 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าทำโดยการจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบลงในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปยังชิ้นงานที่อยู่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกจะวางตัวต่อ ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะประเภทเดียวกับโลหะที่เราต้องการชุบ กระแสไฟฟ้าจะไปบังคับให้ประจุโลหะมาเกาะที่ขั้วลบทำให้เกิดการเคลือบผิวขึ้นที่ชิ้นงานและเกิดก๊าซออกซิเจนกับก๊าซไฮโดรเจนขึ้น

2.12 การเกิดเกรน และการตกผลึกของโลหะ (Grain and Grain Boundary)

ในสถานะที่โลหะบริสุทธิ์แข็งตัว ผลึกแต่ละผลึกจะเริ่มแข็งตัวจากนิวเคลียส หรือจากจุดศูนย์กลางของผลึกก่อนนิวเคลียส คือ ผลึกเล็กๆ ที่ก่อตัวขึ้นเป็นผลึกแรก ซึ่งการก่อตัวของนิวเคลียสนี้ อาจจะก่อตัวขึ้นหลายๆ จุดพร้อมๆ กันและจากนั้นผลึกจะโตขึ้นเรื่อยๆ จากการจับตัวกันเพิ่มขึ้นของอะตอม ที่เข้าร่วมตัวกันตามรูปทรงของผลึกของโลหะนั้นๆ การรวมตัวกันของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมๆ กันกับการเย็นตัวของโลหะ ซึ่งการจับยึดตัวของอะตอมต่อไปเรื่อยๆ

เช่นนี้ เรียกว่า “Dendrite” การเจริญเติบโตของ Dendrite จะแผ่ขยายออกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะนั้นแข็งตัวหมดจึงจะหยุดการเจริญเติบโต Dendrite ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน มันจะขยายตัวออกไปจนกระทั่งแขนงขยายตัวแผ่ออกไปชนกับแขนงของตัวข้างเคียง ซึ่งหมายถึงการเจริญเติบโตของผลึกสิ้นสุดลงในช่วงนี้ของโลหะก็จะแข็งตัวหมดพอดี ผลึกแต่ละผลึกจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากการเติบโตของ Dendrite แต่ละตัวเป็นอิสระ ไม่ขึ้นต่อกัน จากการที่ผลึกแต่ละผลึกไม่เท่ากันนี้เอง ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรนซึ่งเรียกว่า Grain Boundary

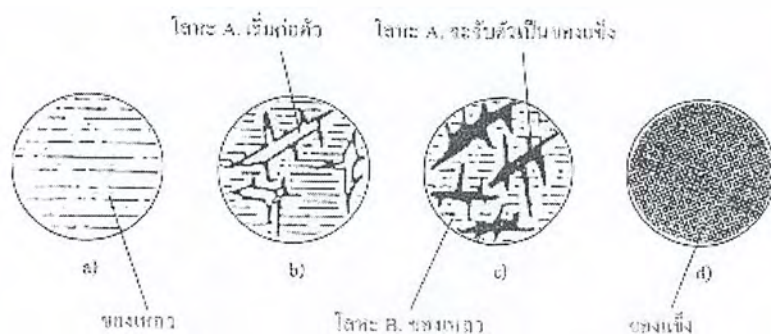


รูปที่ 2.11 แสดงการเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึกของโลหะ

- นิวเคลียสเริ่มก่อตัวเล็กๆ ตามตำแหน่งต่างๆ
- จากผลึกขยายตัวเป็น Dendrite ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ
- Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนง (Tertiary Arm) ของแต่ละตัวเกือบจะชนกัน
- Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนงของแต่ละตัวชนกันผลึกเริ่มหยุดก่อตัว
- เกิดเป็น Grain Boundary บริเวณขอบผลึก

2.12.1 การเกิดเกรนของโลหะผสม

เมื่อโลหะผสม A และ B เริ่มแข็งตัวโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงกว่ายอมแข็งตัวก่อนเมื่อโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงแข็งตัวจบเป็นเกรนหมดแล้วโลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำกว่าจึงเริ่มแข็งตัวบ้าง ดังนั้นเกรนที่เกิดขึ้นของโลหะผสมจึงเป็นเกรนของโลหะที่แตกต่างกันบางเกรนอาจสลับกันอยู่บางเกรนอาจติดกันก็ได้ รูปแบบการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะผสม



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการเกิดเกรนตามภาวะการเย็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 การแยกตัวของสารมลทิน (Segregation of Impurity)

โลหะที่พบเห็นและนำมาใช้งานส่วนใหญ่แล้วจะเป็นโลหะบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักจะมีสิ่งอื่นๆ เจือปนอยู่ด้วย เสมอ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้เรียกว่า สารมลทิน (Impurity) สารมลทินเหล่านี้จะมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าเนื้อโลหะบริสุทธิ์นั้น ๆ ขณะที่โลหะแข็งตัว ลักษณะ Dendrite อะตอมของโลหะบริสุทธิ์จะเริ่มจับตัวก่อนเนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะได้พวกสารมลทินซึ่งยังเหลวตัวอยู่ให้หนีออกไปบริเวณผลึก ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวหมดสารมลทินจะมารวมตัวกันอยู่บริเวณ Grain Boundary



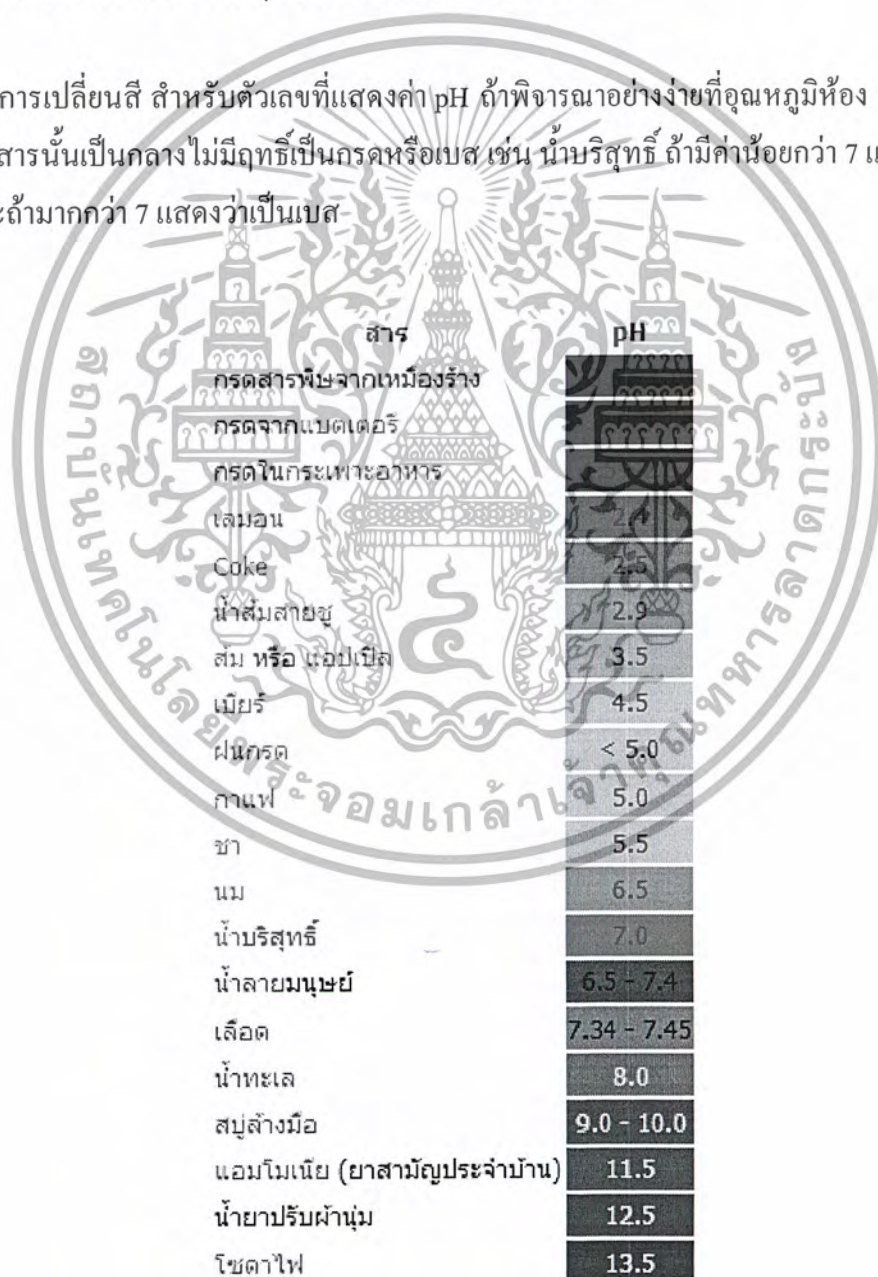
รูปที่ 2.14 แสดงการแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ

ดังนั้นบริเวณ Grain Boundary ของโลหะที่ไม่บริสุทธิ์จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Grain Boundary ของโลหะบริสุทธิ์การแตกหักของโลหะที่ไม่บริสุทธิ์จะแตกหักตามแนว Grain Boundary เราเรียกการแตกหักแบบนี้ว่า Inter Crystalline Failure โลหะบริสุทธิ์บริเวณ Grain Boundary จะมีความแข็งแรงกว่าแบบไม่บริสุทธิ์ โอกาสจะแตกตามแนว Grain Boundary จึงมีน้อย ส่วนใหญ่จะแตกตามแนวแรงที่มากระทำ เรียกการแตกหักแบบนี้ว่า Tran Crystalline Failure

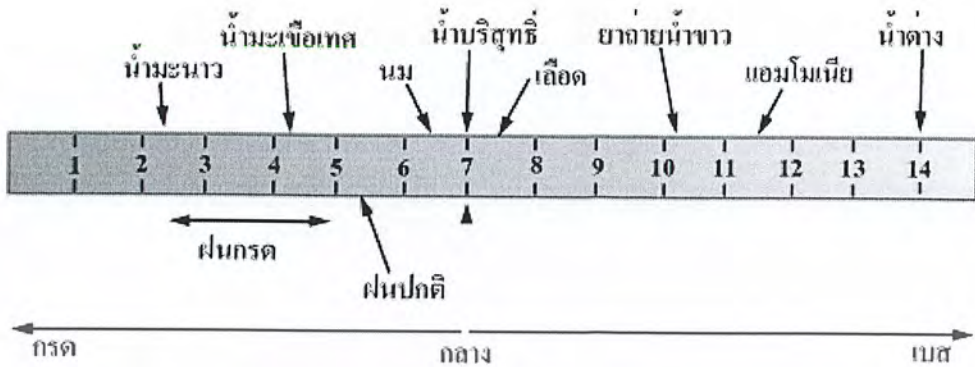
2.13 Potential of Hydrogen ion (pH)

ค่า pH (Potential of Hydrogen ion) เป็นค่าที่ใช้บอกความแรงของกรดหรือเบสอย่างง่าย ๆ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกับผลิตภัณฑ์ทั่วไปไม่เฉพาะพวกสารเคมี ค่า pH นี้กำหนดโดยความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลาย ยิ่งโปรตอนเข้มข้นมากซึ่งก็คือเป็นกรดมาก ค่า pH จะต่ำ ในทางกลับกันถ้าสารละลายเป็นเบส คือความเข้มข้นของโปรตอนต่ำ ค่า pH จะสูง สามารถทดสอบได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยม และง่ายที่สุดคือทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส

การเปลี่ยนสี สำหรับตัวเลขที่แสดงค่า pH ถ้าพิจารณาอย่างง่ายที่อุณหภูมิห้อง ค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารนั้นเป็นกลาง ไม่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส เช่น น้ำบริสุทธิ์ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกรด และถ้ามากกว่า 7 แสดงว่าเป็นเบส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างค่า pH ของสารต่างๆ

2.14 เครื่อง pH meter

2.14.1 หลักการเบื้องต้นของ pH Measurement

หลักการเบื้องต้นจะใช้วิธีในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของไอออนในสารละลายระหว่าง Glass Electrode เปรียบเทียบกับ Reference Electrode ซึ่งเป็นเซลล์มาตรฐานที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าแล้ว

2.14.1.1 Glass Electrode

ประกอบด้วยส่วนรับรู้ค่า pH Glass Membrane ซึ่งปกติจะเป็นลักษณะรูปทรงกลม, Insulating Glass Stem เมื่อ Electrode จุ่มลงสารประกอบไอออนของ ไฮโดรเจนจะมาอยู่ตามบริเวณ Membrane Surface ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า โดยศักย์ไฟฟ้าที่ Electrode Glass ตรวจวัดได้สามารถที่จะคำนวณค่าได้จากสมการ

$$E_g = E_g^0 + \frac{2.303RT}{F} \log_{10} a$$

เมื่อ E_g = ผลรวมของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัด

E_g^0 = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่า $a=1$

a = ผลรวม ไอออนของไฮโดรเจน

T = ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็นองศาเคลวิน

$R = 1.986$ Calories ต่อ mol degree

$F =$ Faraday (coulombs per mol)

$2.303 =$ logarithm conversion factor

ค่า pH จะได้มาจากค่าลบ logarithm ของผลรวมไอออนไฮโดรเจน

$$pH = -\log_{10} a$$

จากสมการด้านบน จะพบว่าค่าไอออนที่ตรวจจับได้ที่ Membrane จะเป็นค่าที่กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้าที่ Membrane สกปรกจะทำให้ค่า pH ที่วัดได้มีค่าผิดพลาดตามไปด้วย

จากสมการ จะเห็นได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นกับอัตราส่วนความเข้มข้นของ แล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (T) อีกด้วย ดังนั้นการวัด pH ที่ถูกต้องจำเป็นต้องมีการปรับเทียบเครื่องวัดไปที่อุณหภูมิที่ถูกต้องหรือ คือจำเป็นต้องตรวจวัดอุณหภูมิของสารละลาย เพื่อทำการปรับภายในวงจรอีกทีหนึ่ง เครื่องวัด pH ที่สมบูรณ์นอกจากจะมีขั้วปรับเทียบแล้วยังมีตัวตรวจวัดอุณหภูมิของสารละลายติดอยู่ด้วย

2.14.1.2 Reference Electrode

จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คงที่โดยไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ตัวใด จากรูปโครงสร้างของ Reference type จะประกอบด้วย Mercury (ปรอท) ซึ่งจะสัมผัสอยู่กับ Mercurous chloride (Hg_2Cl_2) และ Potassium chloride (KCl) เมื่อคิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ Reference Electrode รวมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถหาค่าได้ตามสมการ

$$E = (E_{ref} + E_j) - (E_g^0 + \frac{2.303RT}{F} pH)$$

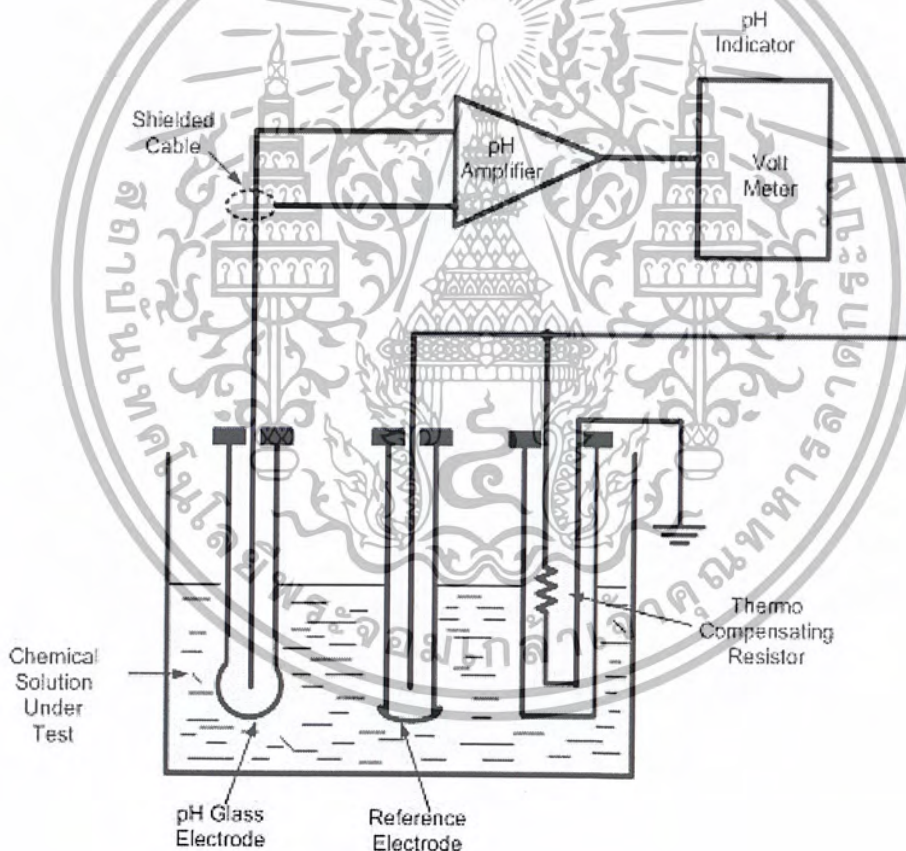
เมื่อ E_{ref} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ Reference Electrode

E_j = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ Liquid Junction

2.14.1.3 Thermo Compensating Resistor

จะทำหน้าที่ชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ผลการวัดได้ถูกต้องโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิวงจรที่ใช้งานร่วมกับ Thermo Compensating Resistor จะออกแบบให้หักล้างกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ สารละลายที่ทำกรวัดโดยสมการวงจรถดเชยจะได้ดังนี้

$$E_{\text{compensate}} = \frac{2.303RT_{\text{compensate}}}{F}$$



รูปที่ 2.16 หลักการอย่างง่ายในการวัดค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของ pH meter

2.14.2.1 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)

จะมีศักย์ไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลาแม้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในสารละลาย โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่นิยมใช้คือ ชนิด Saturated Calomel Electrode (SCE) ขั้ว SCE จะใช้เกลือ โพแทสเซียมอิ่มตัว (saturated KCl) เป็นสะพานเกลือ เพื่อให้เกิดกิจกรรมเนื่องจากสามารถแตกตัวได้ โพแทสเซียมไอออน และ คลอไรด์ไอออนซึ่งมีขนาดไอออนใกล้เคียงกันทำให้การเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรดไม่เกิดความต่างศักย์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าจึงคงที่ตลอด และใช้แบบเกลืออิ่มตัวเพื่อป้องกันไม่ให้ไอออนจากสารละลายวิ่งสวนทางขึ้นไปในขั้ว SCE ซึ่งในบางครั้งจะเกิดปัญหาจากการอุดตันบริเวณปลายขั้ว (junction) ส่งผลให้การวัดค่าซ้ำ ไม่คงที่ และได้ค่าไม่ถูกต้อง

2.14.2.2 ขั้วไฟฟ้าตรวจวัด (Indicator Electrode)

จะมีศักย์ไฟฟ้าผันแปรตามความเข้มข้นของ ไอออนที่เปลี่ยนไปโดยขั้วไฟฟ้าตรวจวัดที่นิยมใช้ คือ ชนิด Glass electrode ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้ ส่วน Silver-silver chloride electrode ที่มีส่วนของปรอทผสมอยู่เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิด potentiometer

2.14.2.3 สารละลายบัฟเฟอร์ที่ช่วยให้ค่า pH คงที่

เยื่อแก้ว (glass membrane) ที่ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนตามค่า pH ของสารละลายตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าตรวจวัดชนิด Glass electrode เหมาะสมกับการวัดในช่วง pH 1-9 และ ไม่เหมาะต่อการวัดที่ระดับไอออนของไฮโดรเจนสูงแต่ในปัจจุบันมีการปรับปรุงให้สามารถวัดได้ในช่วงค่า pH 0-14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 สารละลายที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 Deionized water

น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) หรือที่เรียกกันโดยทั่ว ๆ ไปว่าน้ำ ดีไอ (DI) เป็น น้ำที่ผ่านการกรองไอออน โดยใช้เรซินเป็นตัวกรองจึงทำให้น้ำที่ได้ไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ และเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอย่างแท้จริง เพราะ โมเลกุลที่เหลืออยู่ และเป็นในน้ำปราศจากไอออนจะมีเพียง โมเลกุลของน้ำ (H_2O) เท่านั้น ปัจจุบันวิธี deionzation เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำน้ำบริสุทธิ์ และยังสามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทำให้น้ำบริสุทธิ์วิธีอื่น ๆ เช่น RO (Reverse Osmosis) การกรอง การกลั่น และ การใช้ตัวดูดซับคาร์บอน (Carbon adsorption) ได้



รูปที่ 3.1 Deionized water

3.1.1.2 สารละลาย HCL

กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดเกลือ (อังกฤษ: hydrochloric acid) เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เป็นกรดแก่ เป็นส่วนประกอบหลักของกรดกระเพาะ (gastric acid) และใช้กันอย่างกว้างในอุตสาหกรรมเป็นของเหลวที่มีพลังการกัดกร่อนสูง และในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เช่น วินิลคลอไรด์ สำหรับผลิต PVC พลาสติก และ MDI/TDI (Toluene Diisocyanate) สำหรับผลิต พอลิยูรีเทน, (polyurethane) และใช้ในการผลิตขนาดเล็กเช่น การผลิต เจนลาติน (gelatin) ใช้ปรุงอาหาร และใช้ฟอกหนัง



รูปที่ 3.2 สารละลาย HCL

3.1.1.3 สารละลาย CoFe 0.1M (1:1)



รูปที่ 3.3 สารละลาย CoFe 0.1M (1:1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 Current Source



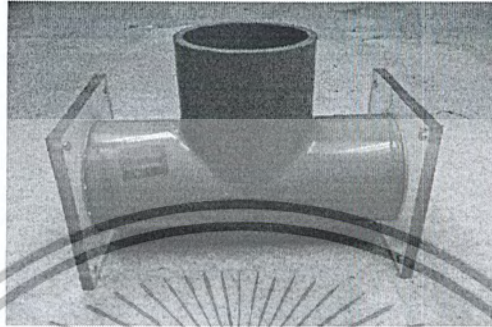
รูปที่ 3.4 Current Source

3.1.3 ชั้นสารทองแดง



รูปที่ 3.5 ชั้นสารทองแดง

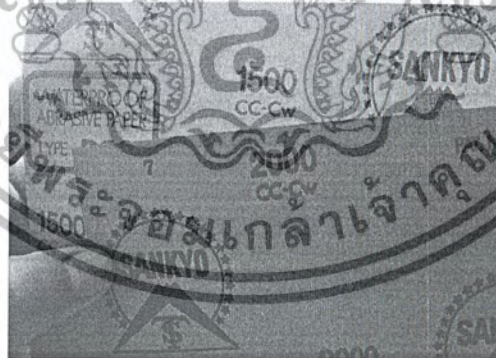
3.1.4 Cell



รูปที่ 3.6 Cell

3.1.5 กระดาษทราย

กระดาษทราย คือกระดาษรูปแบบหนึ่งซึ่งมีสารขัดถูติดหรือเคลือบอยู่บนหน้าของกระดาษ ใช้สำหรับขัดพื้นผิวของวัสดุอื่นเพื่อให้วัสดุนั้นเรียบ หรือขัดให้ชั้นพื้นผิวเก่าหลุดออก หรือบางครั้งอาจทำให้พื้นผิวขรุขระมากขึ้นเพื่อเตรียมการติดด้วยกาว เป็นต้น



รูปที่ 3.7 กระดาษทราย

3.1.6 pH Meter

พีเอชมิเตอร์ (pH meter) เป็นเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้วัดค่าพีเอชหรือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย การใช้งาน จะต้องปรับเทียบมาตรฐานก่อนการใช้โดยการปรับเทียบกับสารละลายบัฟเฟอร์ มาตรฐาน(พีเอช 4, 7 หรือ 10) อย่างน้อย 2 ค่า ที่มีค่าครอบคลุมในช่วงที่เราต้องการวัด วิธีการวัดทำได้โดยล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) หรือน้ำกลั่น (distilled water) และซับด้วยกระดาษทิชชู แล้วรีบจุ่มpH Meter ลงในสารละลายที่ต้องการวัดอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.8 พีเอชมิเตอร์ (pH meter)

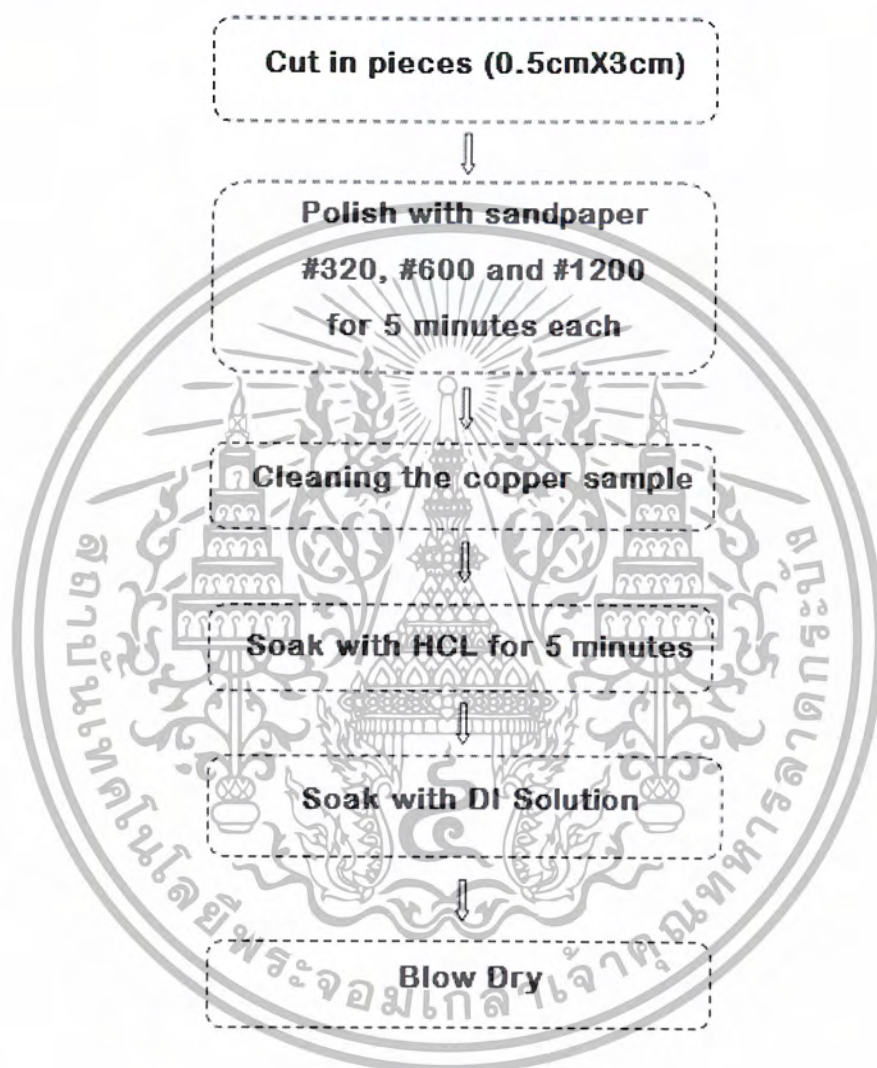
3.2 กระบวนการทดลอง

3.2.1 กระบวนการประกอบ Cell



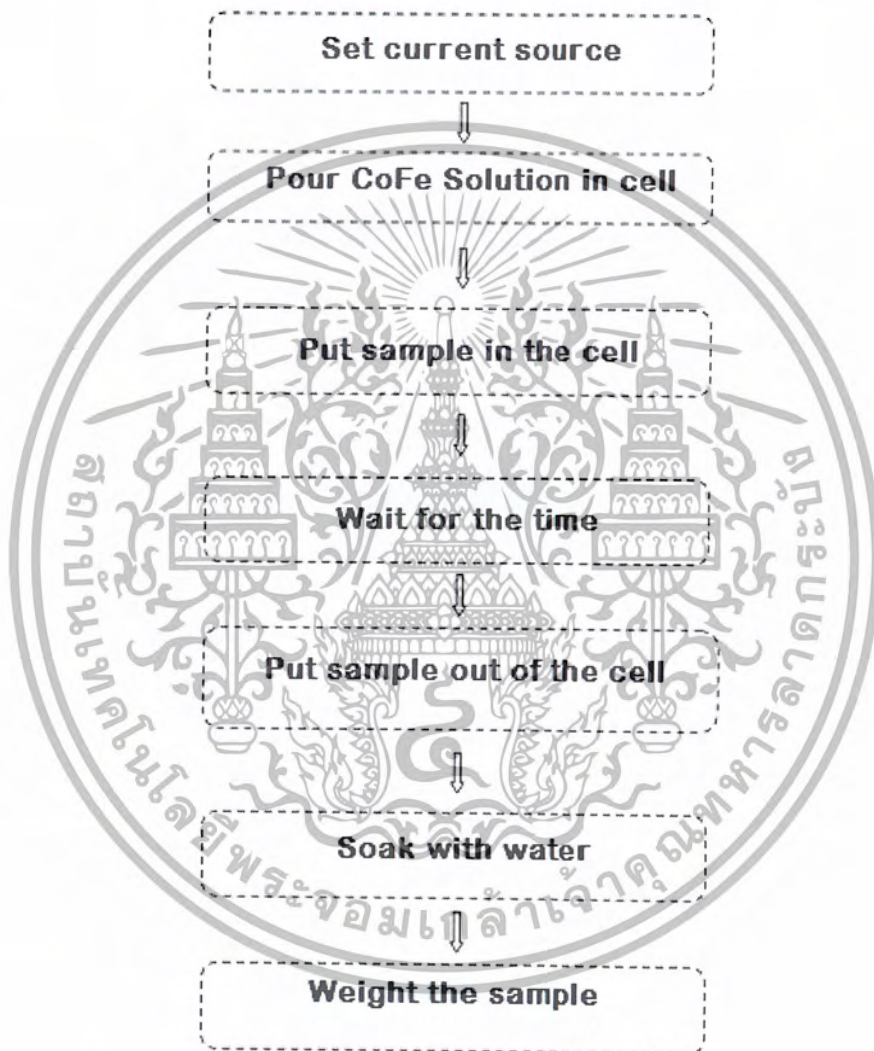
รูปที่ 3.9 กระบวนการประกอบ Cell

3.2.2 กระบวนการเตรียมชิ้นสารตัวอย่าง



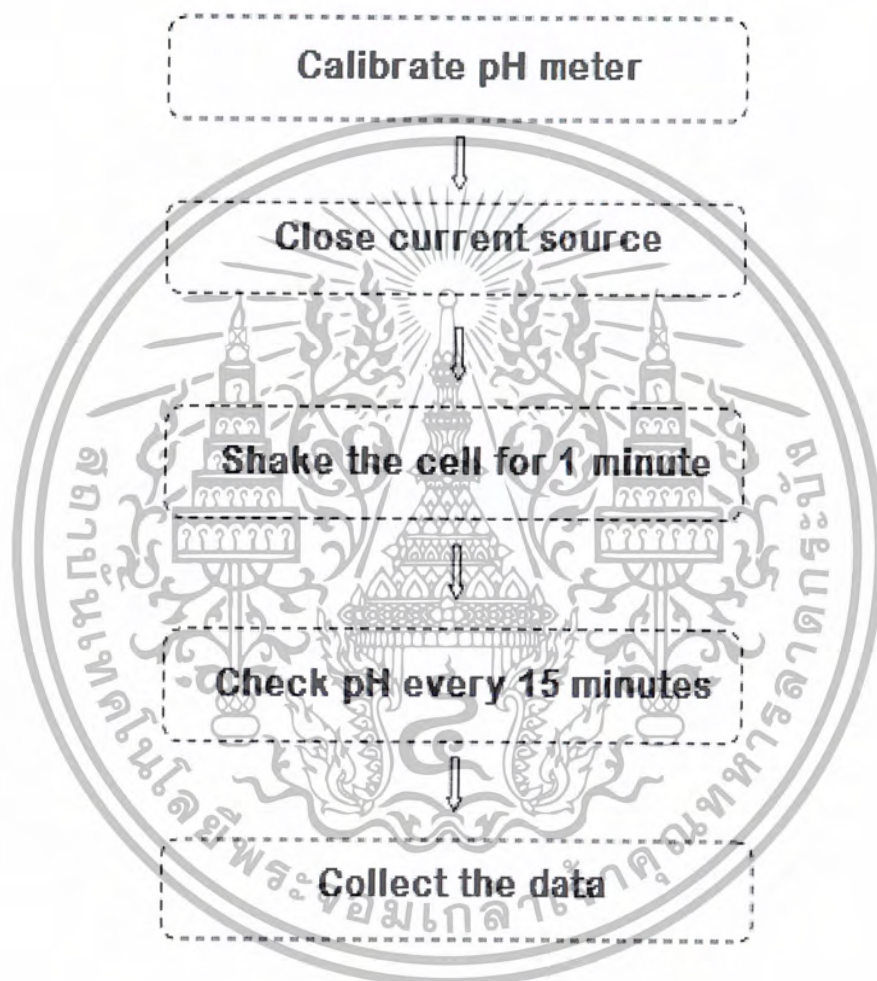
รูปที่ 3.10 กระบวนการเตรียมชิ้นสารตัวอย่าง

3.2.3 กระบวนการทำการทดลองการหุบสารแม่เหล็กสองชนิด



รูปที่ 3.11 กระบวนการทำการทดลองการหุบแม่เหล็กสองชนิด

3.2.4 กระบวนการวัดค่า pH ของซึ้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 กระบวนการวัดค่า pH ของซึ้นสารตัวอย่าง

3.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ

3.3.1 กระบวนการทำการทดลองการชุบแม่เหล็กสองชนิด

3.3.1.1 น้ำหนักชิ้นสารตัวอย่าง ในการวัดน้ำหนักทั้งก่อนและหลังการทดลองเพื่อนำน้ำหนักที่วัดได้ไปเพื่อดูความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า โดยในการวัดนั้น จะวัดน้ำหนักแผ่นของทองแดงเมื่อก่อนการทำการทดลอง รวมถึงวัดน้ำหนักของทองแดงเมื่อหลังการทดลอง เพื่อศึกษาว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีผลอย่างไรต่อน้ำหนักชิ้นสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไป

3.3.1.2 % Co , %Fe ในการวัดค่า % Co และ % Fe จะวัดเพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อจะดูว่าค่ากระแสไฟฟ้า มีผลอย่างไรกับค่า % Co และ % Fe โดยในการวัดค่า % Co และ % Fe จะวัดโดยใช้เครื่อง XRF ซึ่งต้องส่งชิ้นสารตัวอย่างไปที่ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติเพื่อทำการตรวจสอบ

3.3.1.3 ค่า pH ในการวัดค่า pH จะวัดเพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาว่าค่ากระแสไฟฟ้า มีผลอย่างไรกับค่า pH โดยในการวัดค่า pH จะวัดโดยใช้เครื่อง pH Meter

3.3.1.4 ขนาดของเกรน ในการวัดขนาดของเกรน จะวัดเพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อจะดูว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีผลอย่างไรกับขนาดของเกรน โดยในการวัดขนาดของเกรน จะวัดโดยใช้เครื่อง SEM ซึ่งต้องส่งชิ้นสารตัวอย่างไปที่ TMEC เพื่อทำการตรวจสอบ

โดยทำการควบคุมเวลาที่ 60 นาที และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วง 1.76 - 19.76mA เพื่อศึกษาว่ากระแสไฟฟ้ามีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของชิ้นสารตัวอย่าง, เปรอ์เซ็นต์ของ Cu และ Fe, ค่า pH และขนาดของเกรน

บทที่ 4

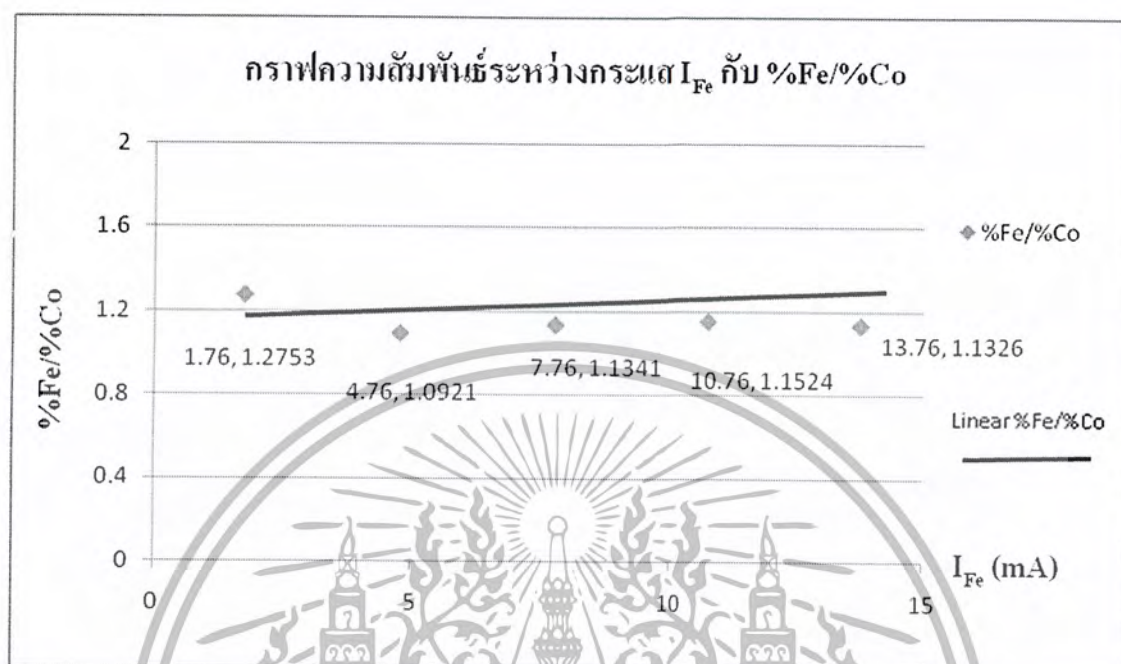
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการวัดน้ำหนักขึ้นสารตัวอย่าง และค่า %Fe กับ %Co ของสารตัวอย่างจากการทดลองการชุบวัสดุสารเหล็กสองชนิด

4.1.1 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

I_{Fe}	I_{Co}	%Fe	%Co	%Fe/%Co	เวลา (Hr.)
1.76mA	1.76mA	4.336	3.4	1.2753	1
4.76mA	1.76mA	13.35	12.22	1.0924	1
7.76mA	1.76mA	12.63	10.96	1.1341	1
10.76mA	1.76mA	20.09	17.55	1.1524	1
13.76mA	1.76mA	27.42	24.21	1.1326	1
16.76mA	1.76mA	15.97	15.42	1.037	1
19.76mA	1.76mA	36.61	35.64	1.027	1

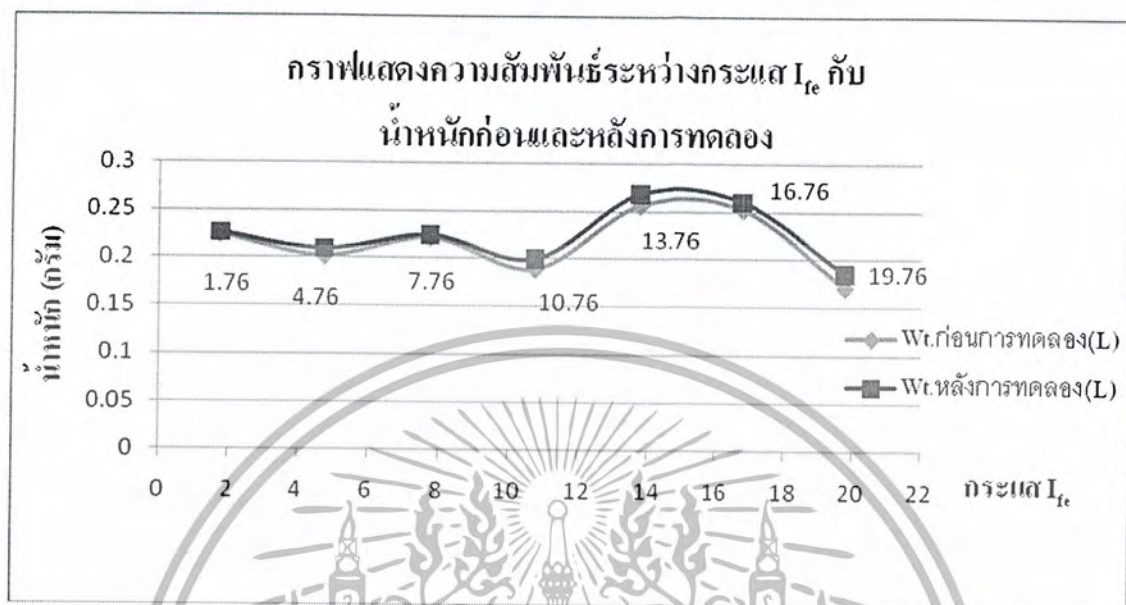
ตารางที่ 4.1 การชุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า %Fe กับ %Co



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{Fe} กับ %Fe/%Co

I_{Fe}	I_{Co}	เวลา (Hr.)	น้ำหนักก่อนการทดลอง (g.)	น้ำหนักหลังการทดลอง (g.)
1.76mA	1.76mA	1	0.224	0.226
4.76mA	1.76mA	1	0.201	0.209
7.76mA	1.76mA	1	0.221	0.224
10.76mA	1.76mA	1	0.188	0.199
13.76mA	1.76mA	1	0.256	0.268
16.76mA	1.76mA	1	0.252	0.26
19.76mA	1.76mA	1	0.17	0.185

ตารางที่ 4.2 การชั่งวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่าน้ำหนักของชิ้นสารตัวอย่าง
ทั้งก่อนและหลังการทดลอง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{Fe} กับน้ำหนักก่อนและหลังการทดลองของชิ้นสารตัวอย่าง



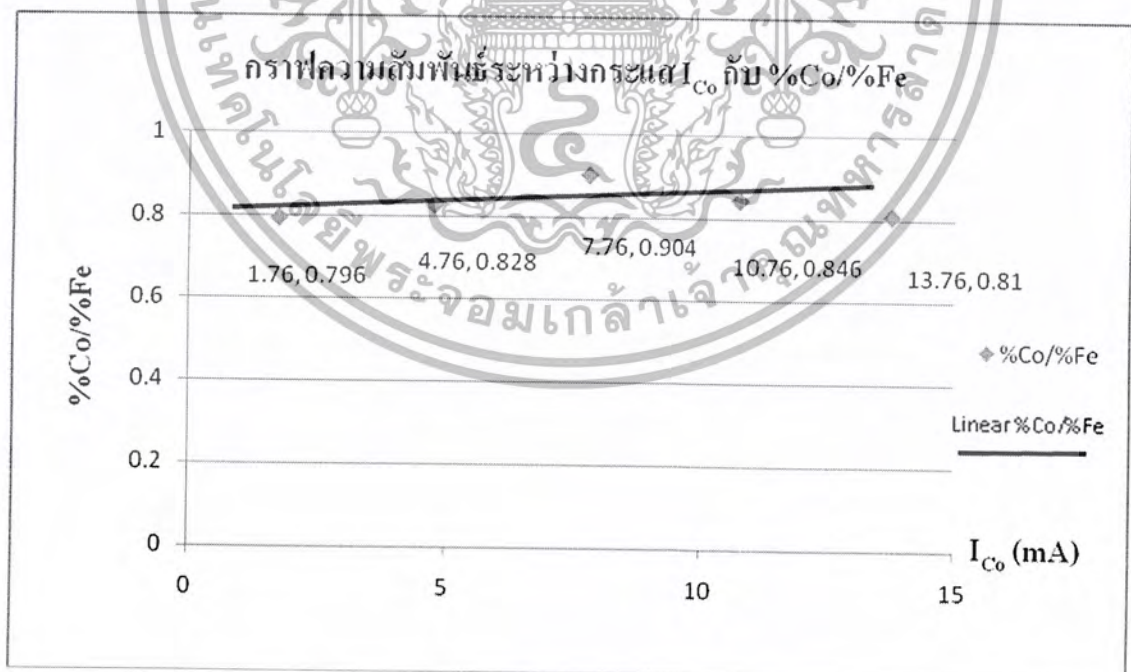
รูปที่ 4.3 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76$ mA, $I_{Fe} = 19.76$ mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$

I_{Fe}	I_{Co}	%Fe	%Co	%Co/%Fe	เวลา (Hr.)
1.76mA	1.76mA	1.303	1.037	0.796	1
1.76mA	4.76mA	2.282	1.89	0.828	1
1.76mA	7.76mA	10.4	9.397	0.904	1
1.76mA	10.76mA	2.924	2.474	0.846	1
1.76mA	13.76mA	13.78	11.16	0.81	1
1.76mA	16.76mA	18.10	14.92	0.824	1
1.76mA	19.76mA	29.43	25.03	0.851	1

ตารางที่ 4.3 การชุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า %Fe กับ %Co

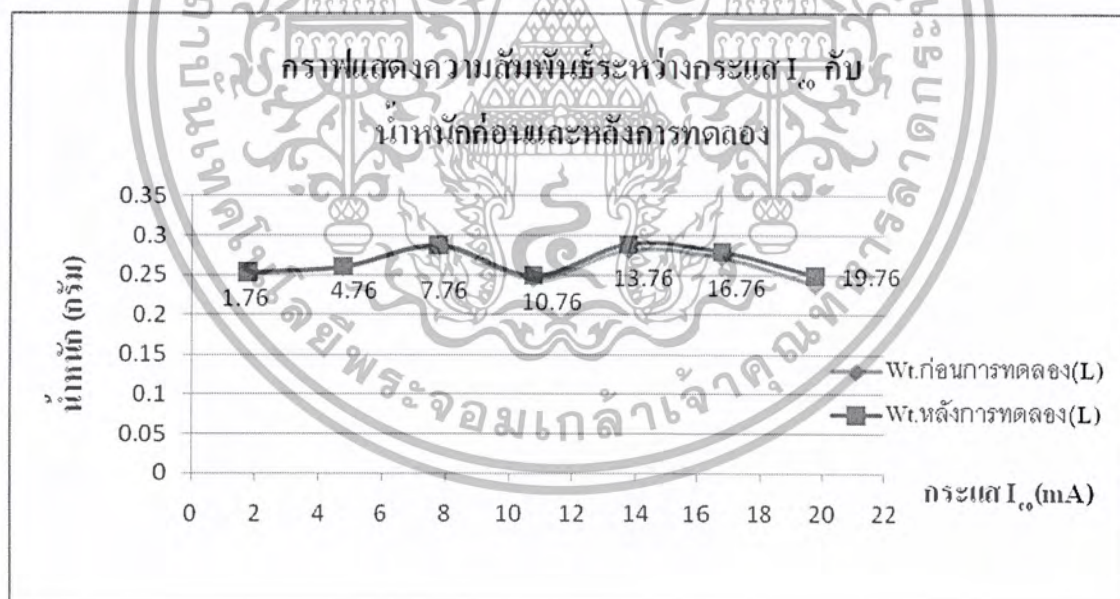


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{Co} กับ %Co/%Fe

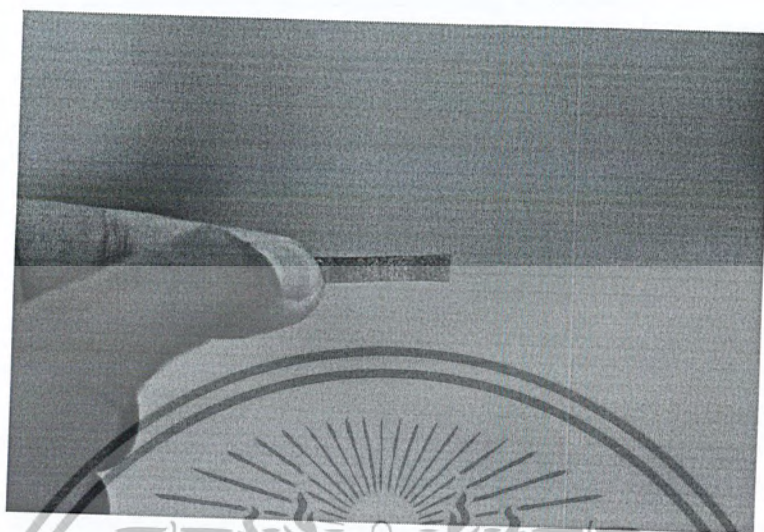
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{Fe}	I_{Co}	เวลา (Hr.)	น้ำหนักก่อนการทดลอง (g.)	น้ำหนักหลังการทดลอง (g.)
1.76mA	1.76mA	1	0.216g	0.220g
1.76mA	4.76mA	1	0.220g	0.222g
1.76mA	7.76mA	1	0.255g	0.259g
1.76mA	10.76mA	1	0.227g	0.229g
1.76mA	13.76mA	1	0.224g	0.241g
1.76mA	16.76mA	1	0.241g	0.259g
1.76mA	19.76mA	1	0.253g	0.272g

ตารางที่ 4.4 การหุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่าน้ำหนักของชิ้นสารตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการทดลอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{Fe} กับ น้ำหนักก่อนและหลังการทดลองของชิ้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.6 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$, $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$

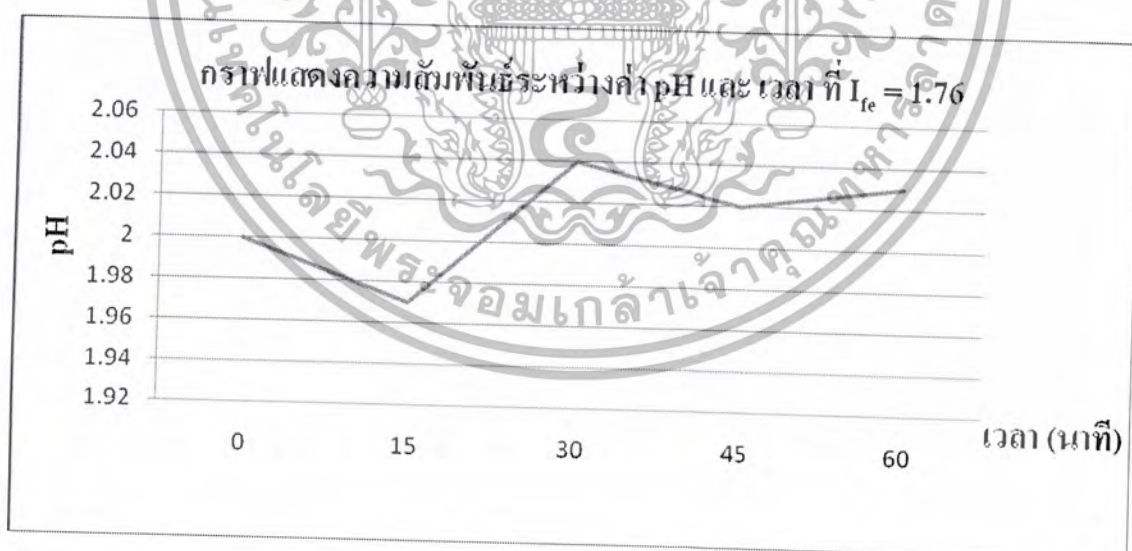


4.2 ผลของการวัดค่า pH ของสารตัวอย่างจากการทดลองการชุบวัสดุสารเหล็กสองชนิด

4.2.1 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

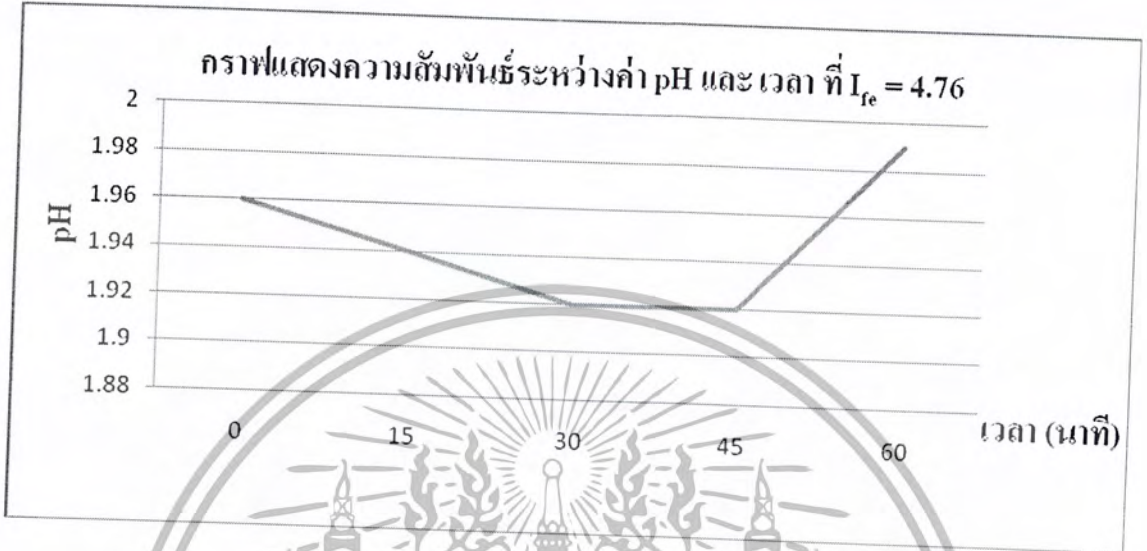
I_{Fe}	I_{Co}	0 min.	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.
1.76mA	1.76mA	2	1.97	2.04	2.02	2.03
4.76mA	1.76mA	1.96	1.94	1.92	1.92	1.99
7.76mA	1.76mA	1.93	1.89	1.57	1.57	1.81
10.76mA	1.76mA	1.88	1.79	1.76	1.76	1.69
13.76mA	1.76mA	1.95	1.94	1.72	1.72	1.77
16.76mA	1.76mA	1.97	1.92	1.89	1.89	1.96
19.76mA	1.76mA	2.49	2.46	2.35	2.35	1.92

ตารางที่ 4.5 การชุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า pH ของชิ้นสารตัวอย่าง

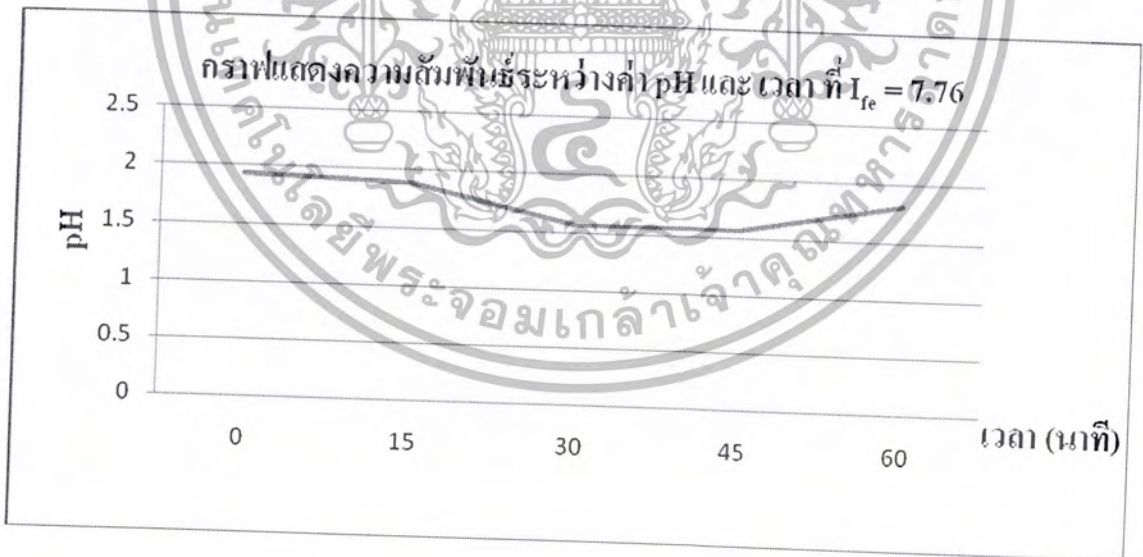


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 1.76$

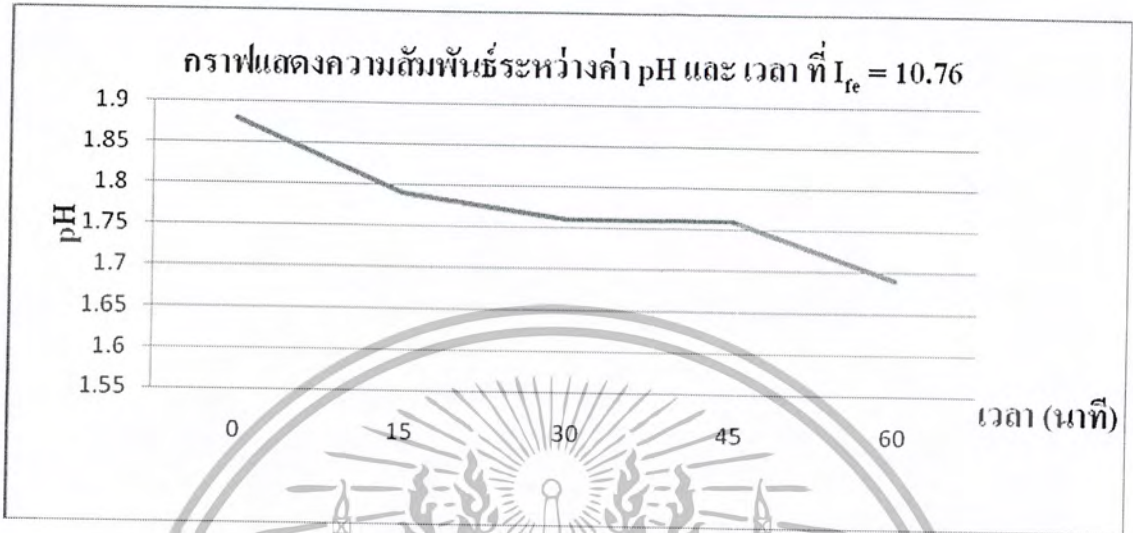
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



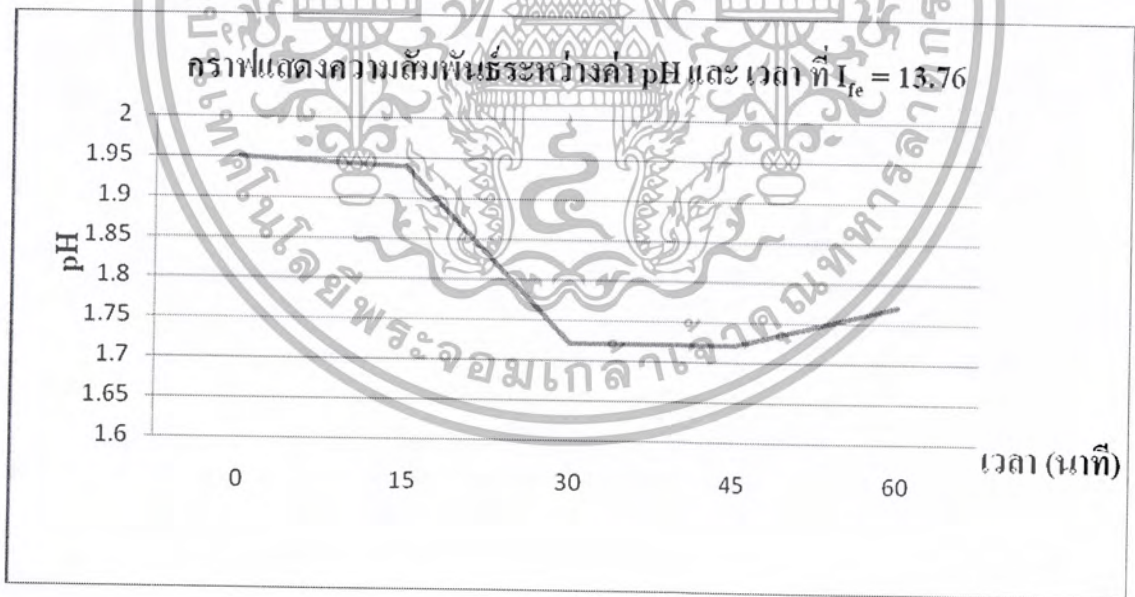
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 4.76$



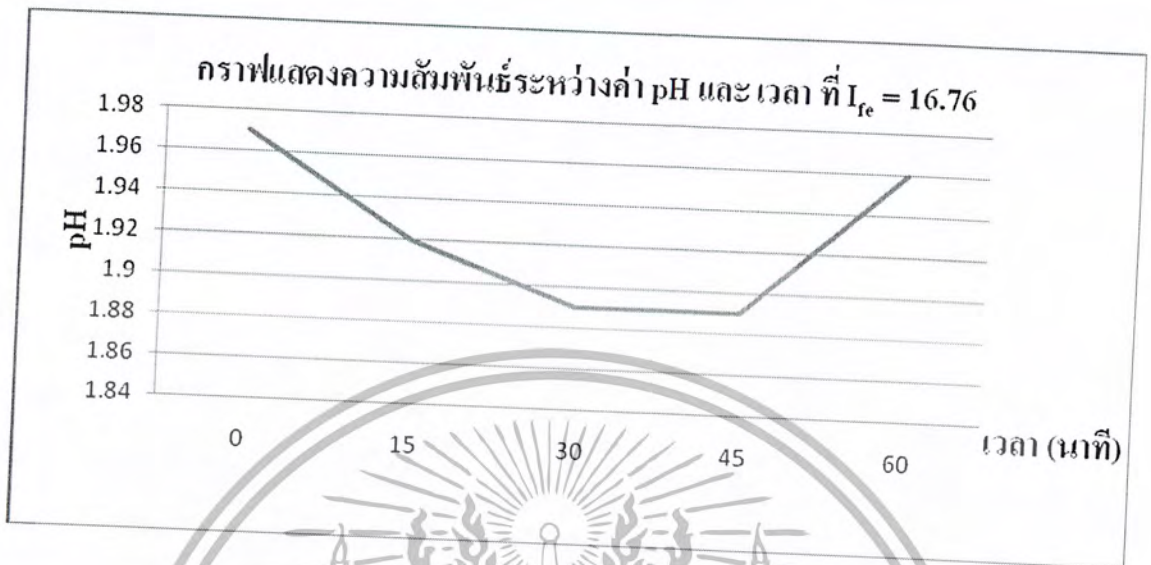
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 7.76$



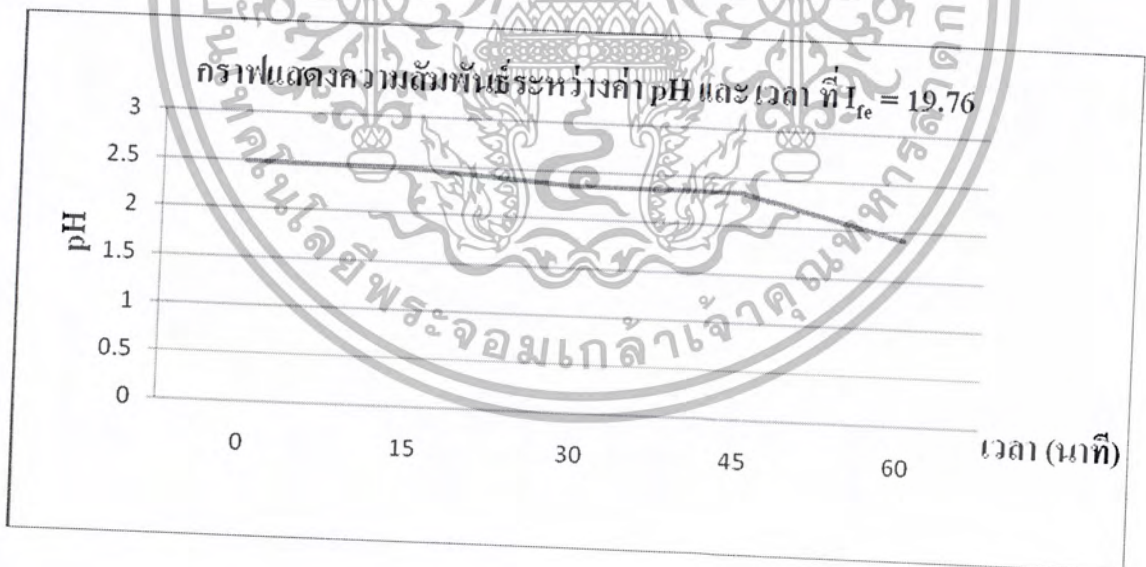
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 10.76$



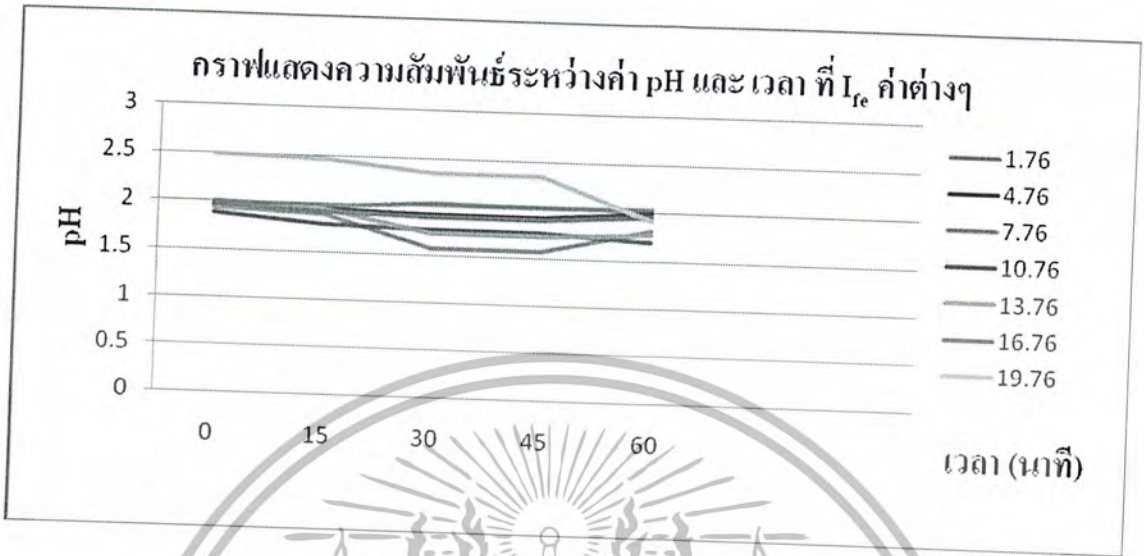
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 13.76$



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 16.76$



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{Fe} = 19.76$

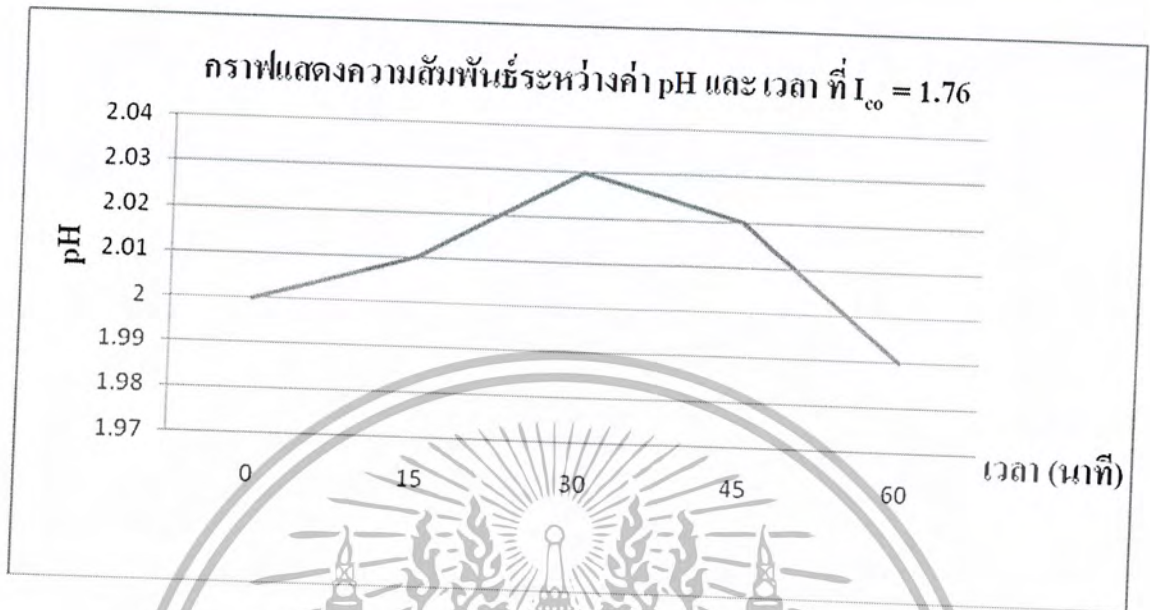


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ I_{Fe} ค่าต่างๆ

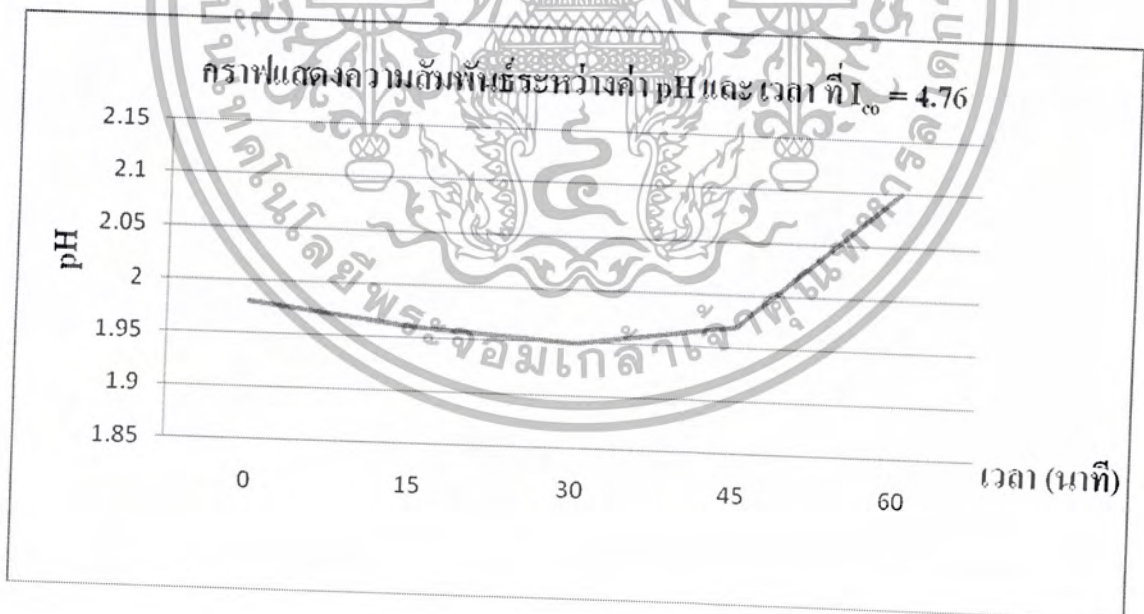
4.2.2 การชุบสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$

I_{Fe}	I_{Co}	0 min.	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.
1.76mA	1.76mA	2	2.01	2.03	2.02	1.99
1.76mA	4.76mA	1.98	1.96	1.95	1.97	2.1
1.76mA	7.76mA	2.3	2.35	2.38	2.23	2.21
1.76mA	10.76mA	2.1	2.3	2.2	2.24	2.3
1.76mA	13.76mA	2.4	2.4	2.36	2.38	2.3
1.76mA	16.76mA	2.2	2.1	2.03	2.14	2.19
1.76mA	19.76mA	1.99	1.97	1.97	1.95	1.98

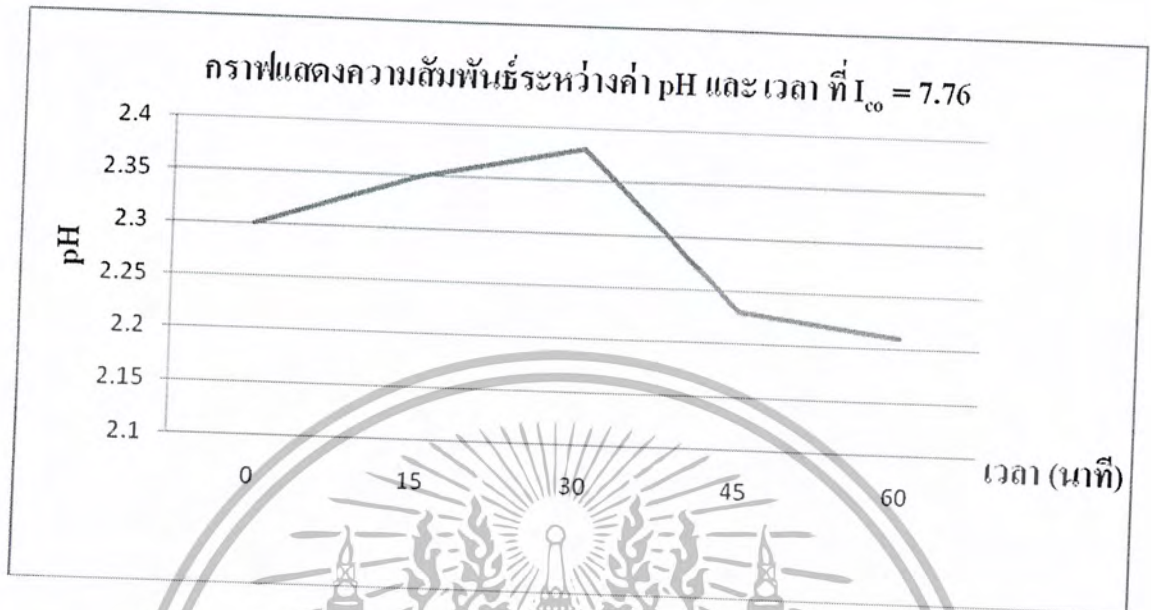
ตารางที่ 4.6 การชุบวัสดุสนามแม่เหล็กด้วย CoFe เพื่อศึกษาค่า pH ของชั้นสารตัวอย่าง



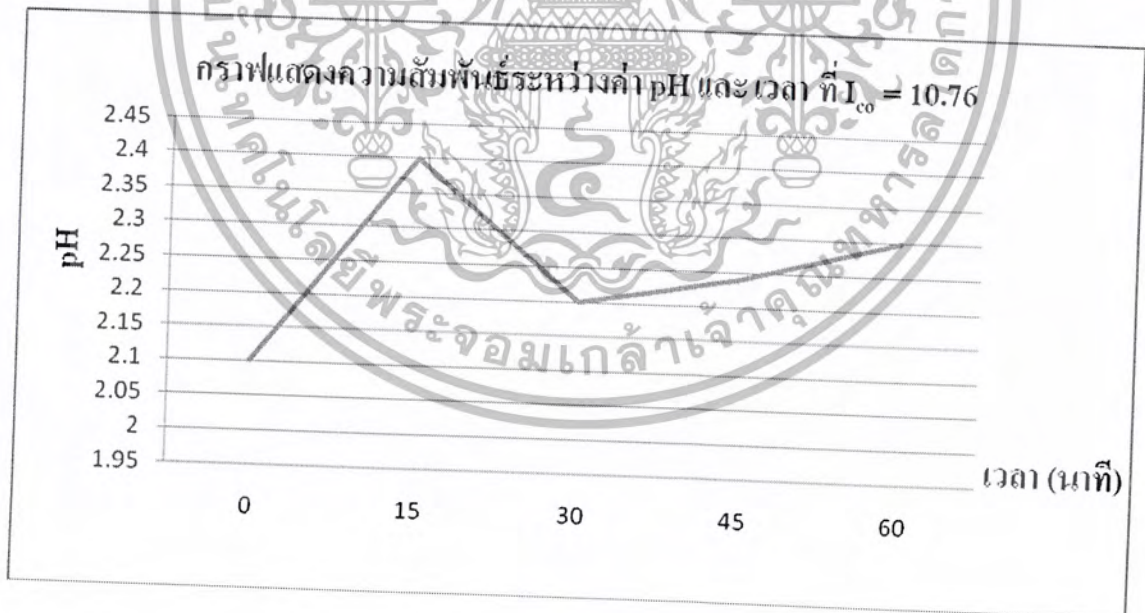
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 1.76$



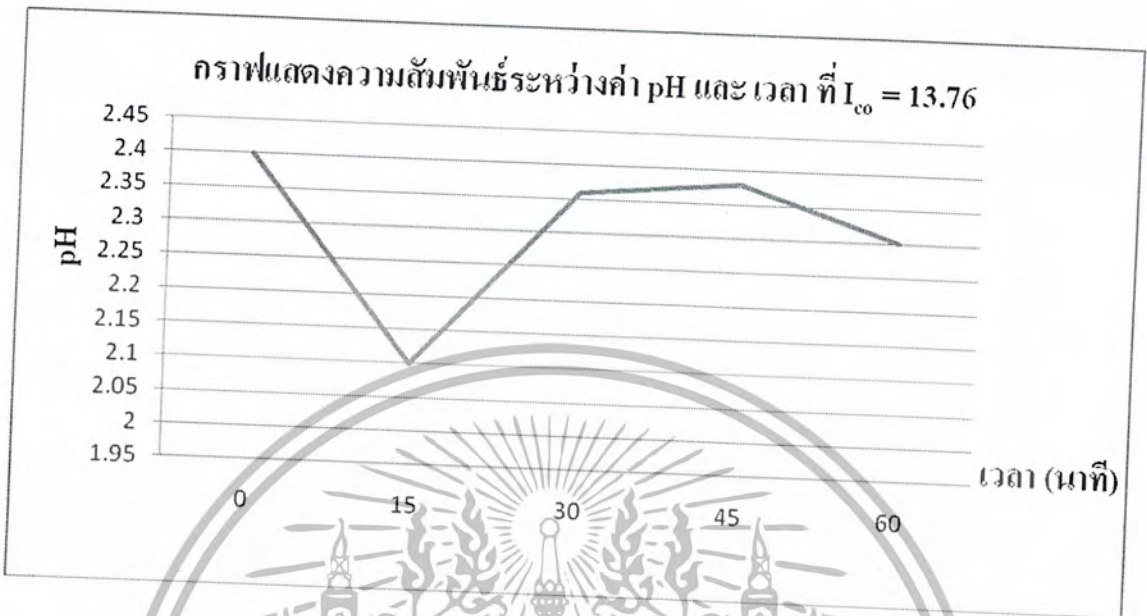
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 4.76$



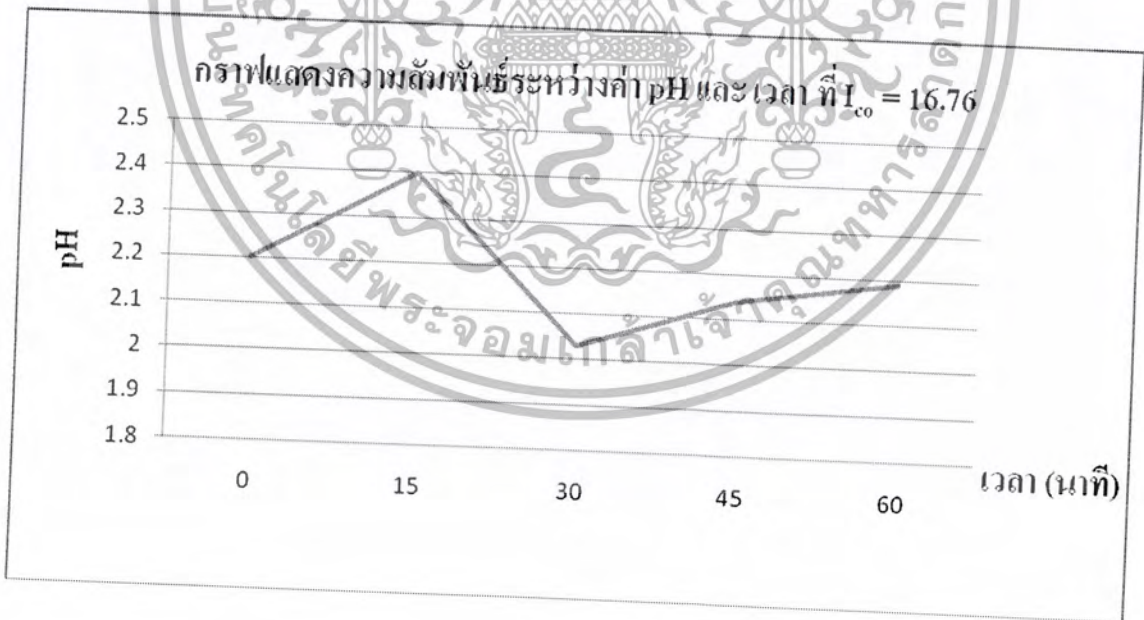
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 7.76$



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 10.76$

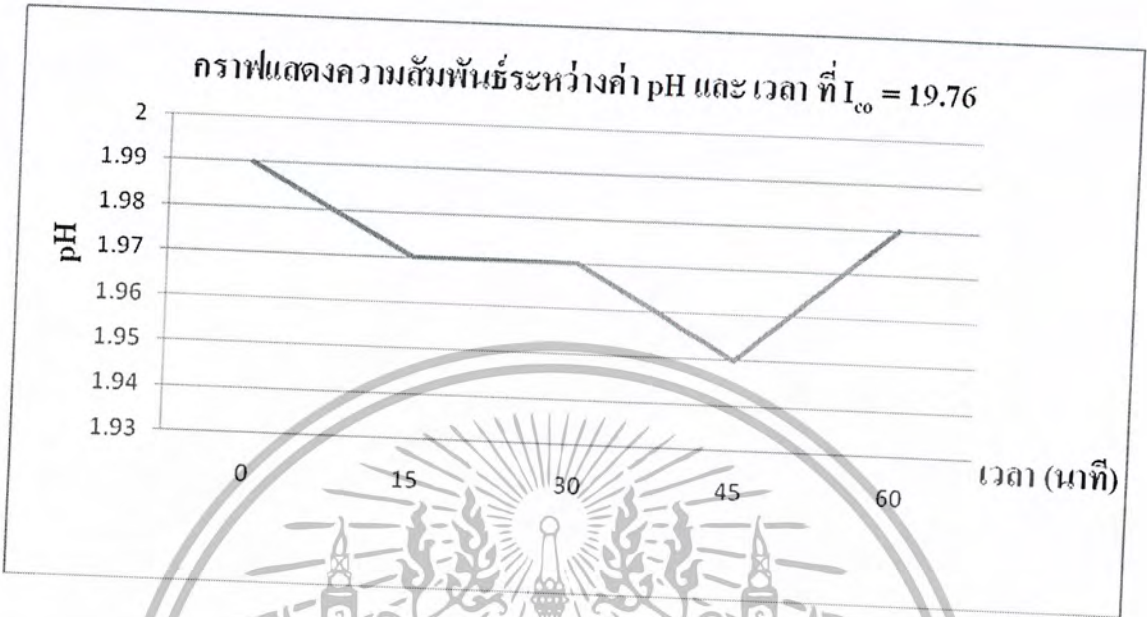


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 13.76$

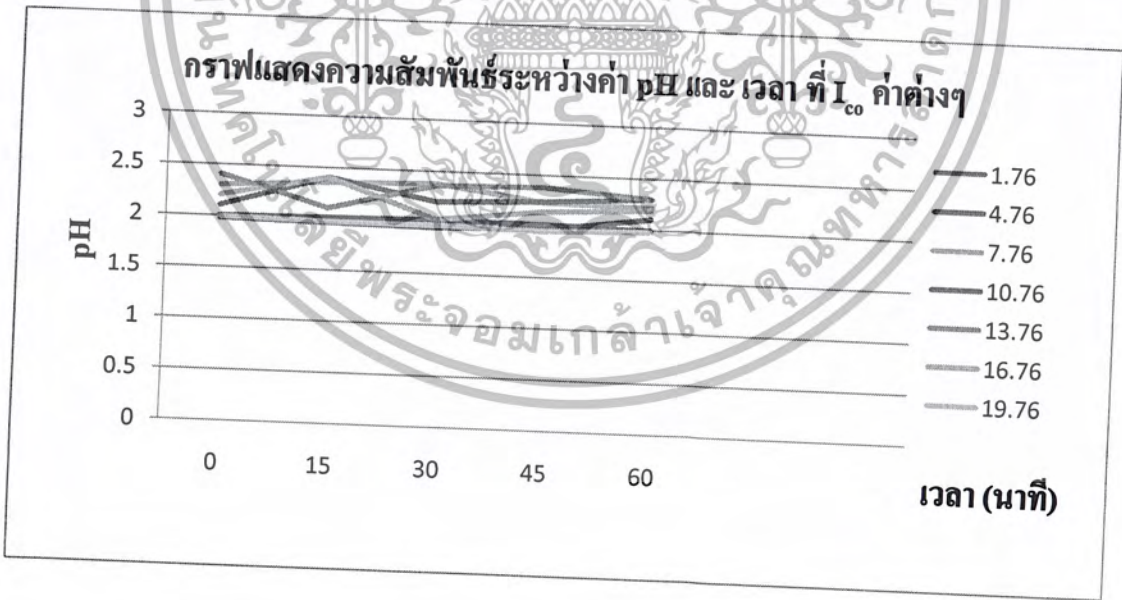


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 16.76$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ $I_{co} = 19.76$

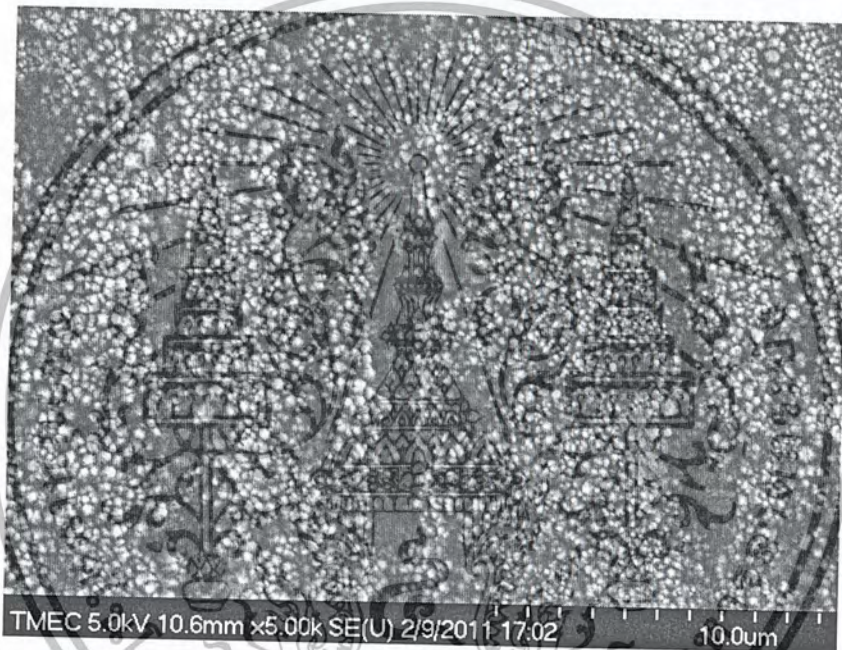


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ เวลา ที่ I_{co} ค่าต่างๆ

4.3 ผลของการวัดขนาดของเกรน ของสารตัวอย่างจากการทดลองการชุบวัสดุ สารเหล็กสองชนิด

4.3.1 การชุบวัสดุสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

4.3.1.1 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตำแหน่งที่ 1

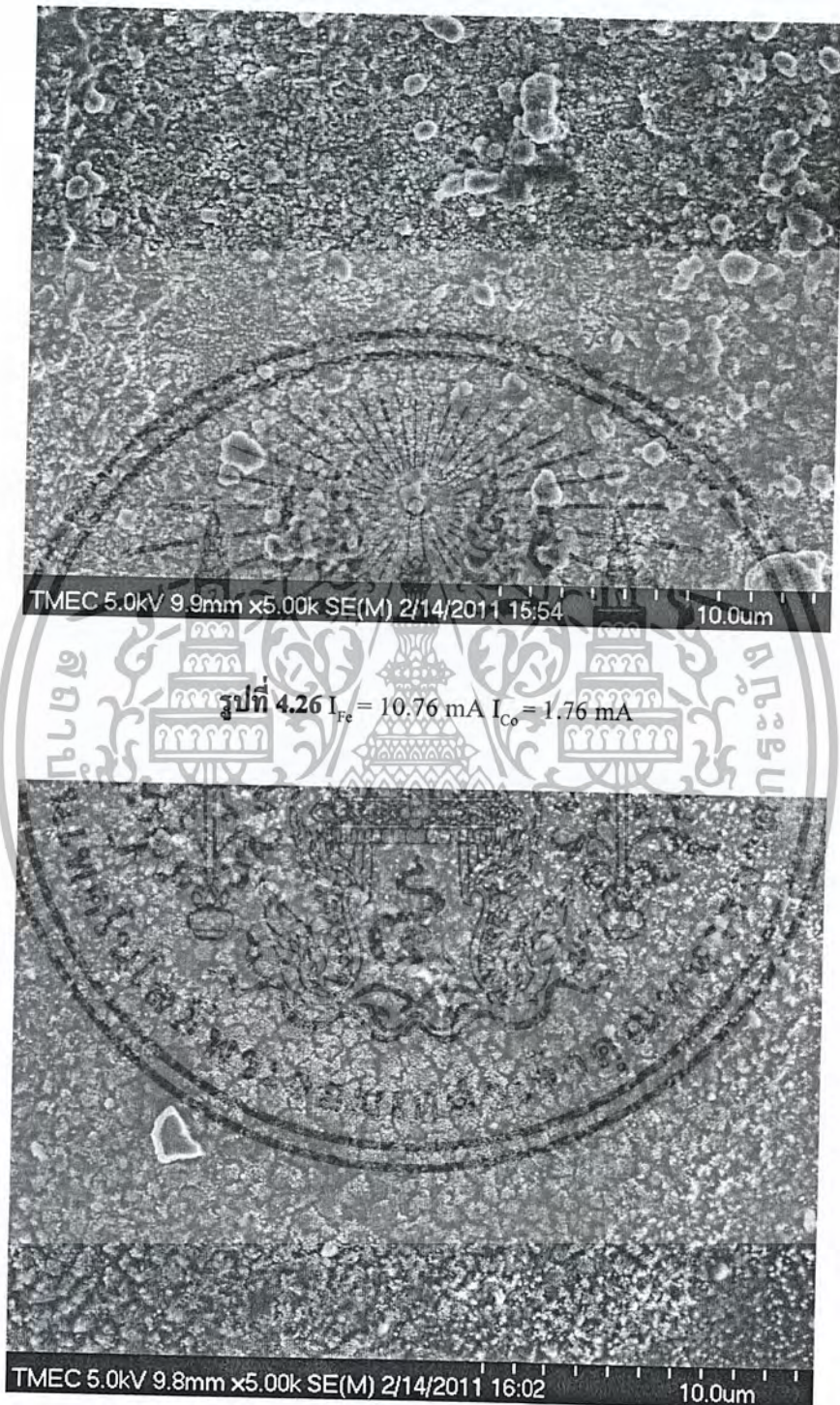


รูปที่ 4.23 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$



รูปที่ 4.25 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

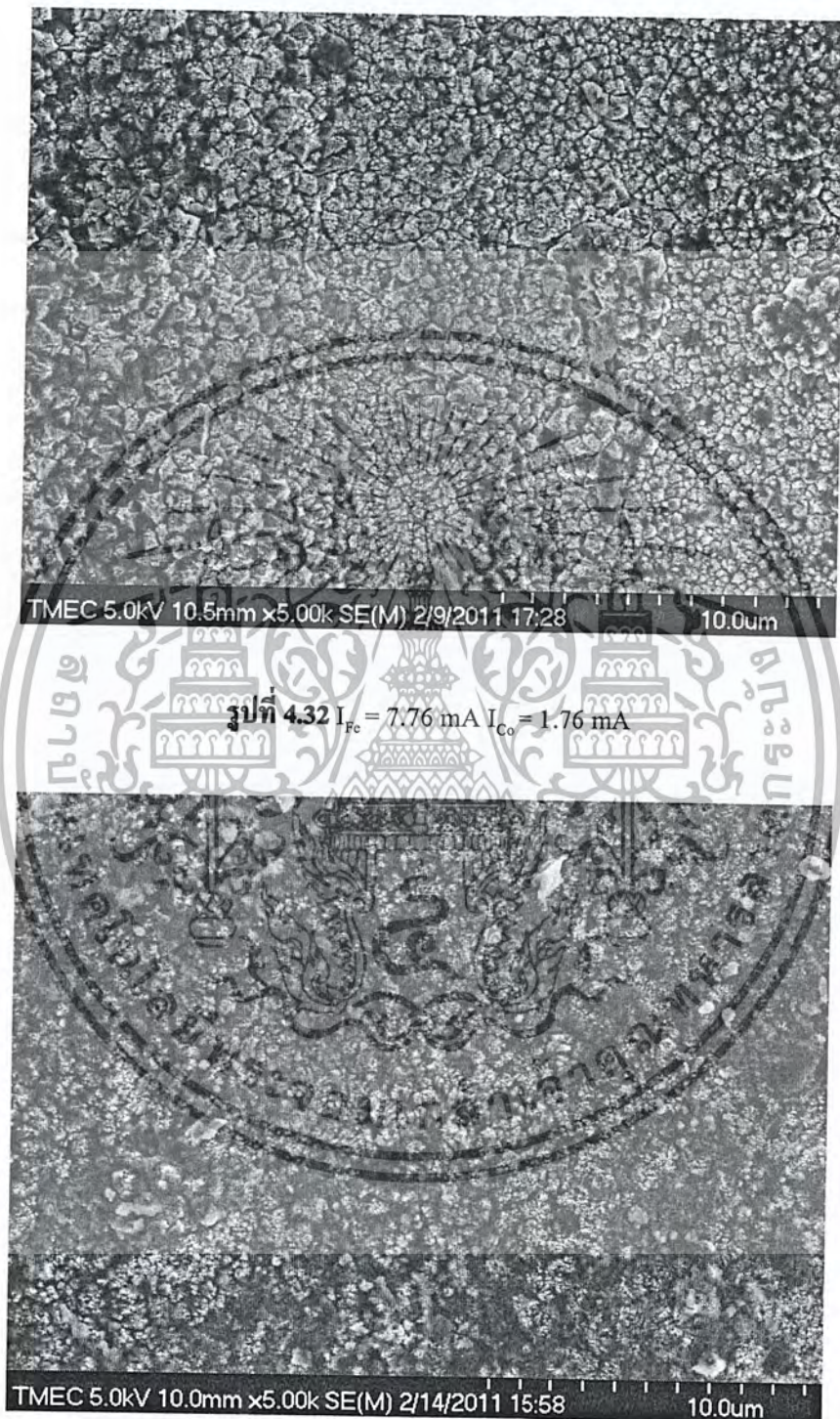
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.31 $I_{F_c} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{C_o} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



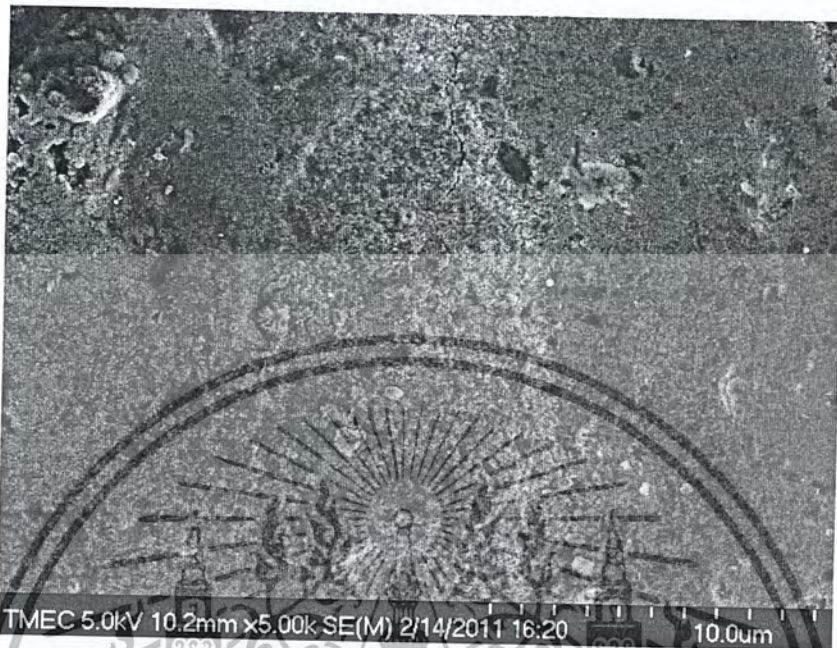
รูปที่ 4.33 $I_{Fc} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



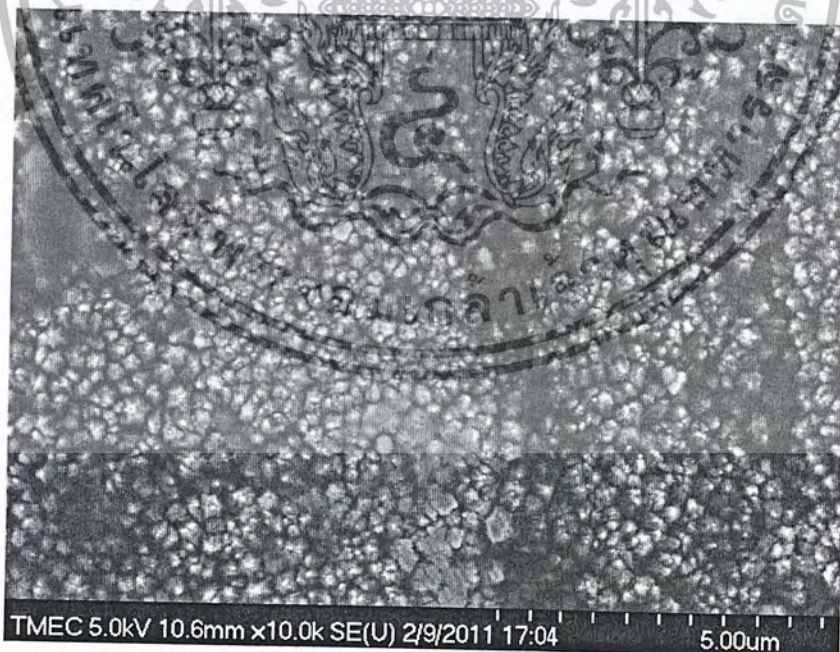
รูปที่ 4.35 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



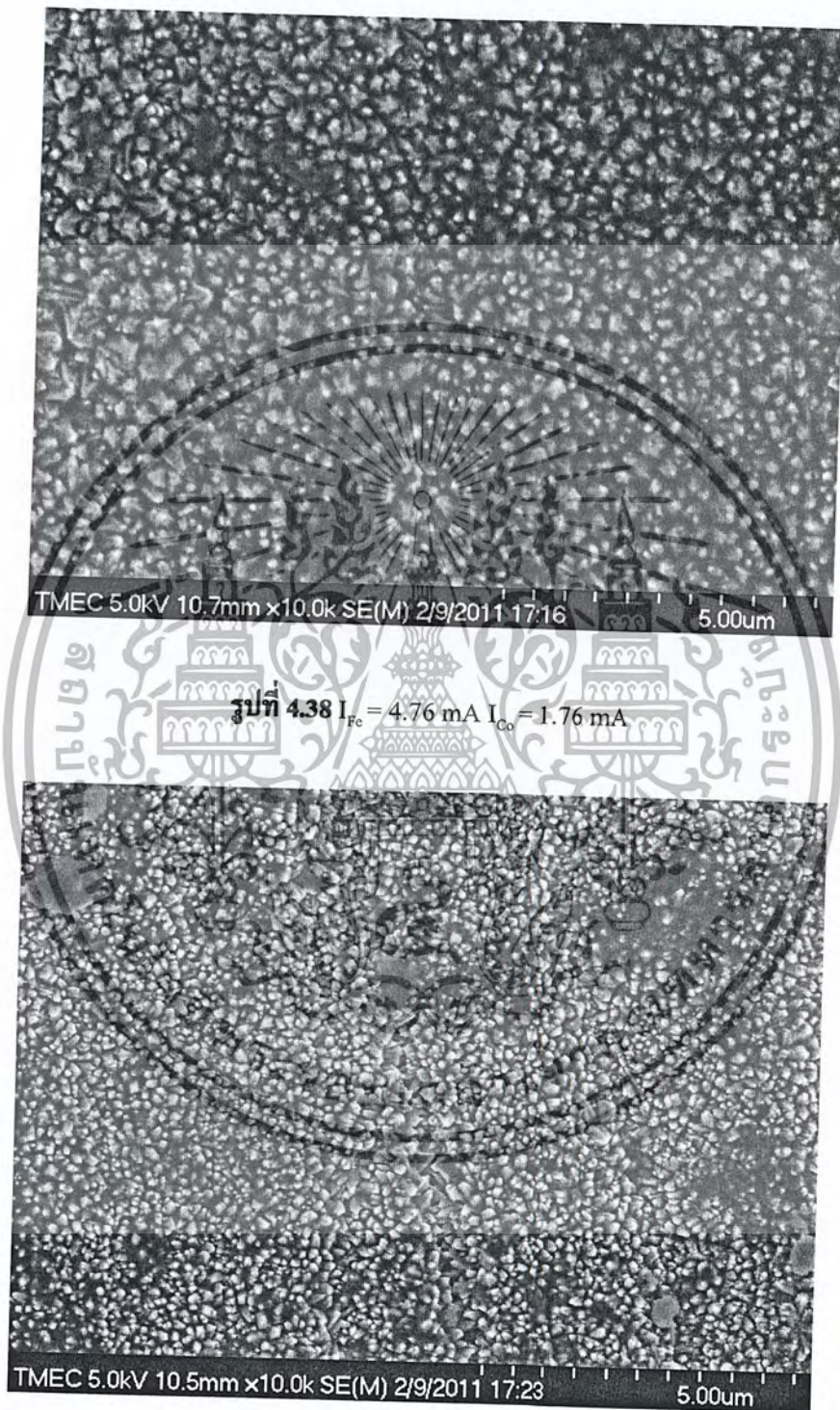
รูปที่ 4.36 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

4.3.1.3 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.37 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

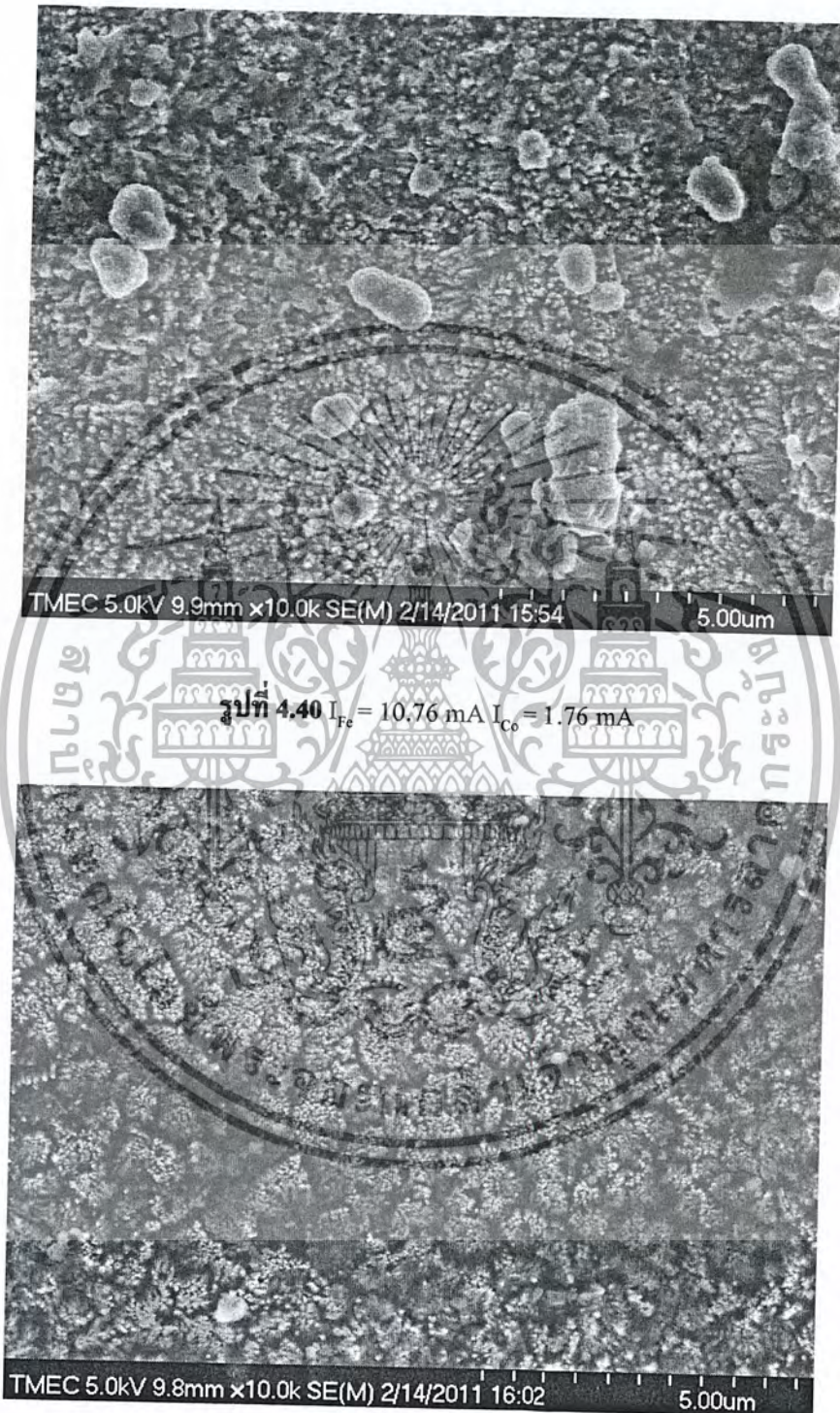
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

รูปที่ 4.39 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



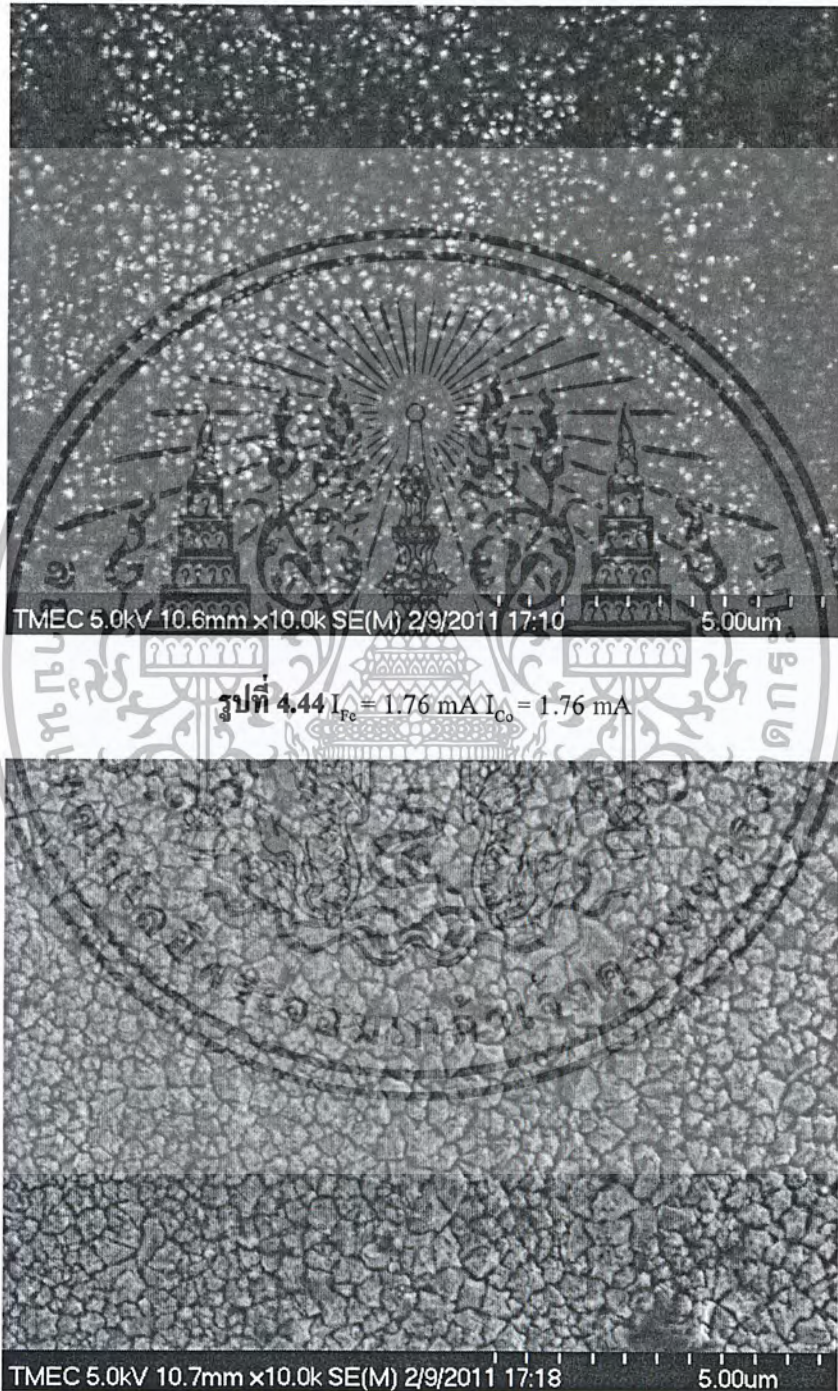
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 2

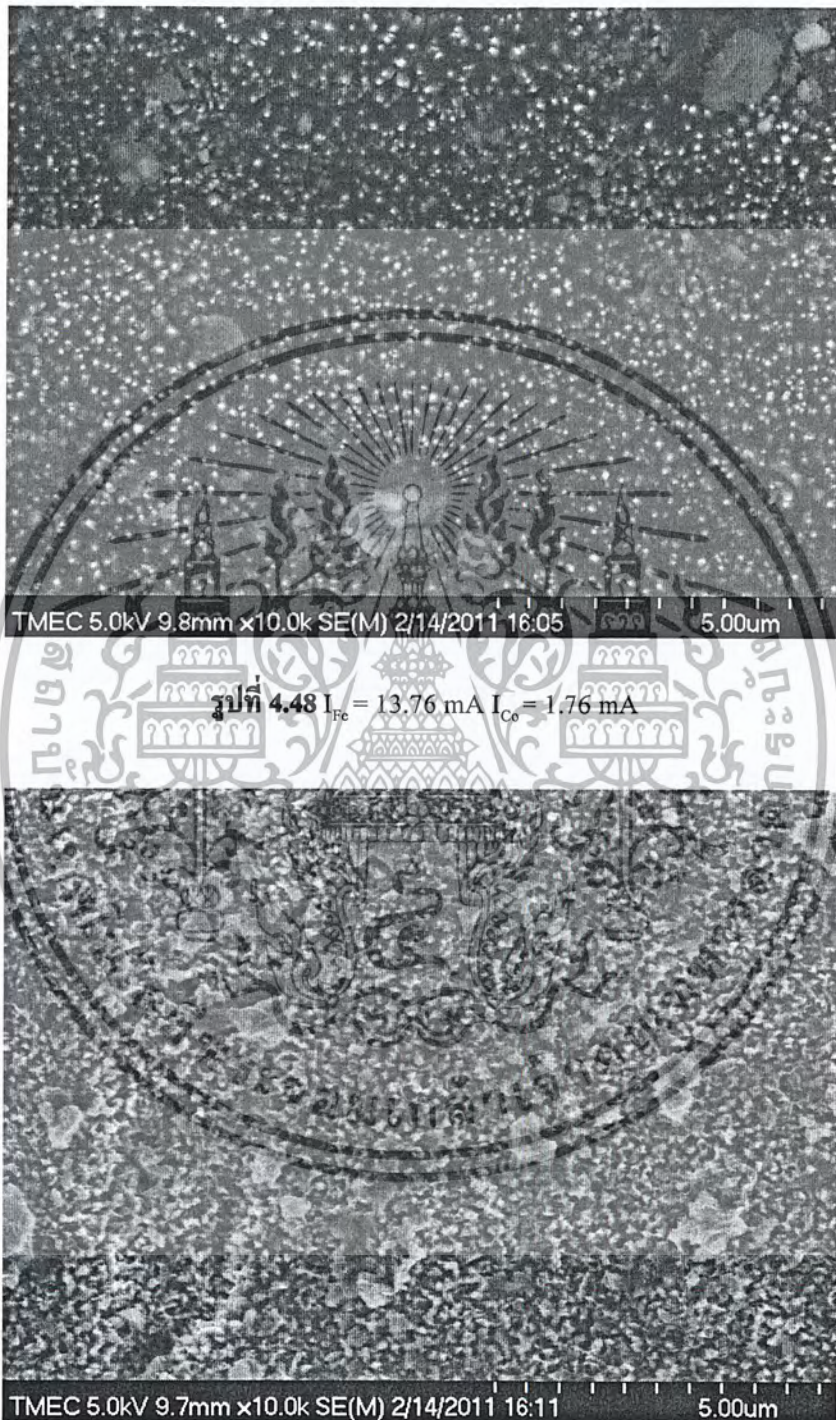


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



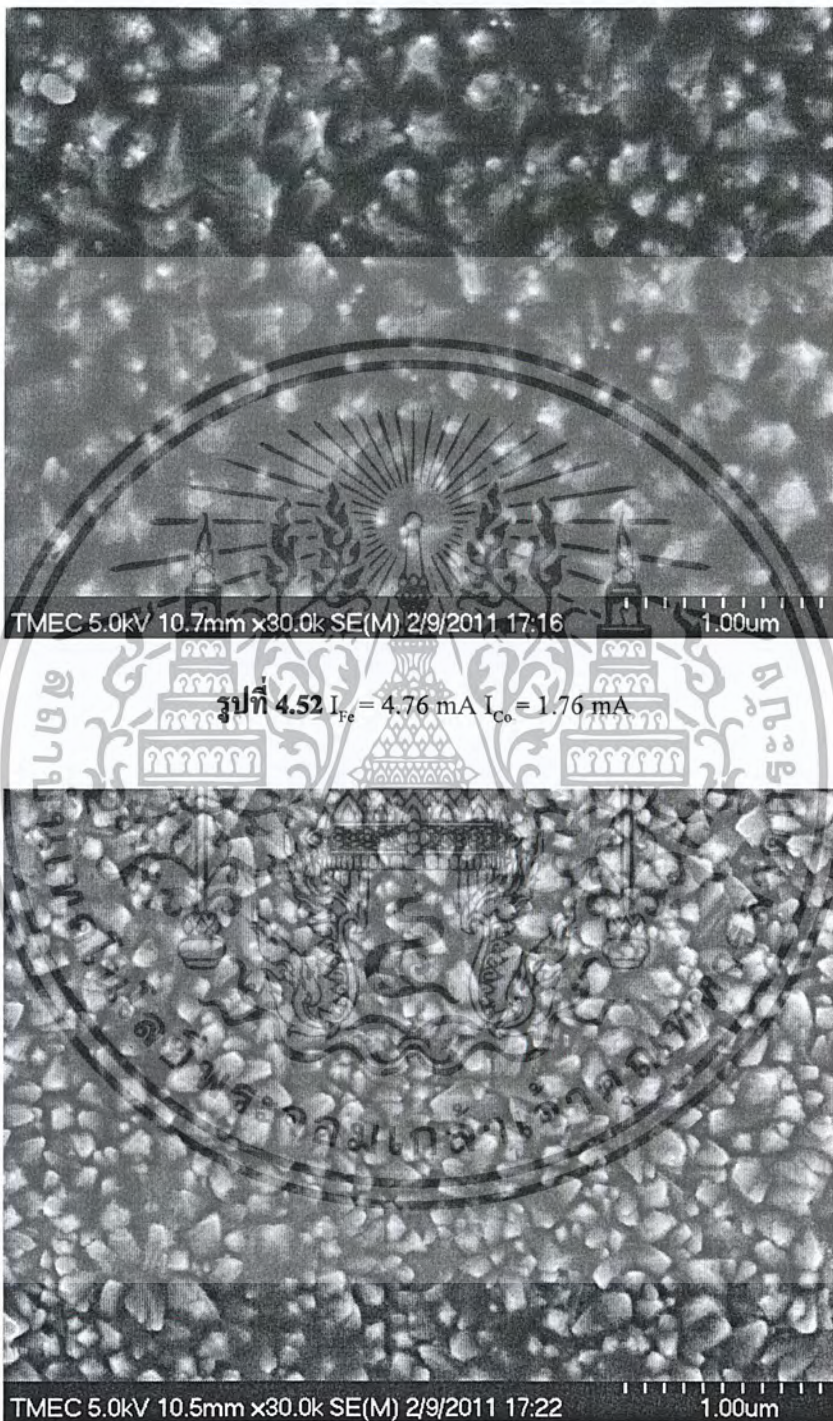
รูปที่ 4.50 $I_{Fc} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

4.3.1.5 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่1



รูปที่ 4.51 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

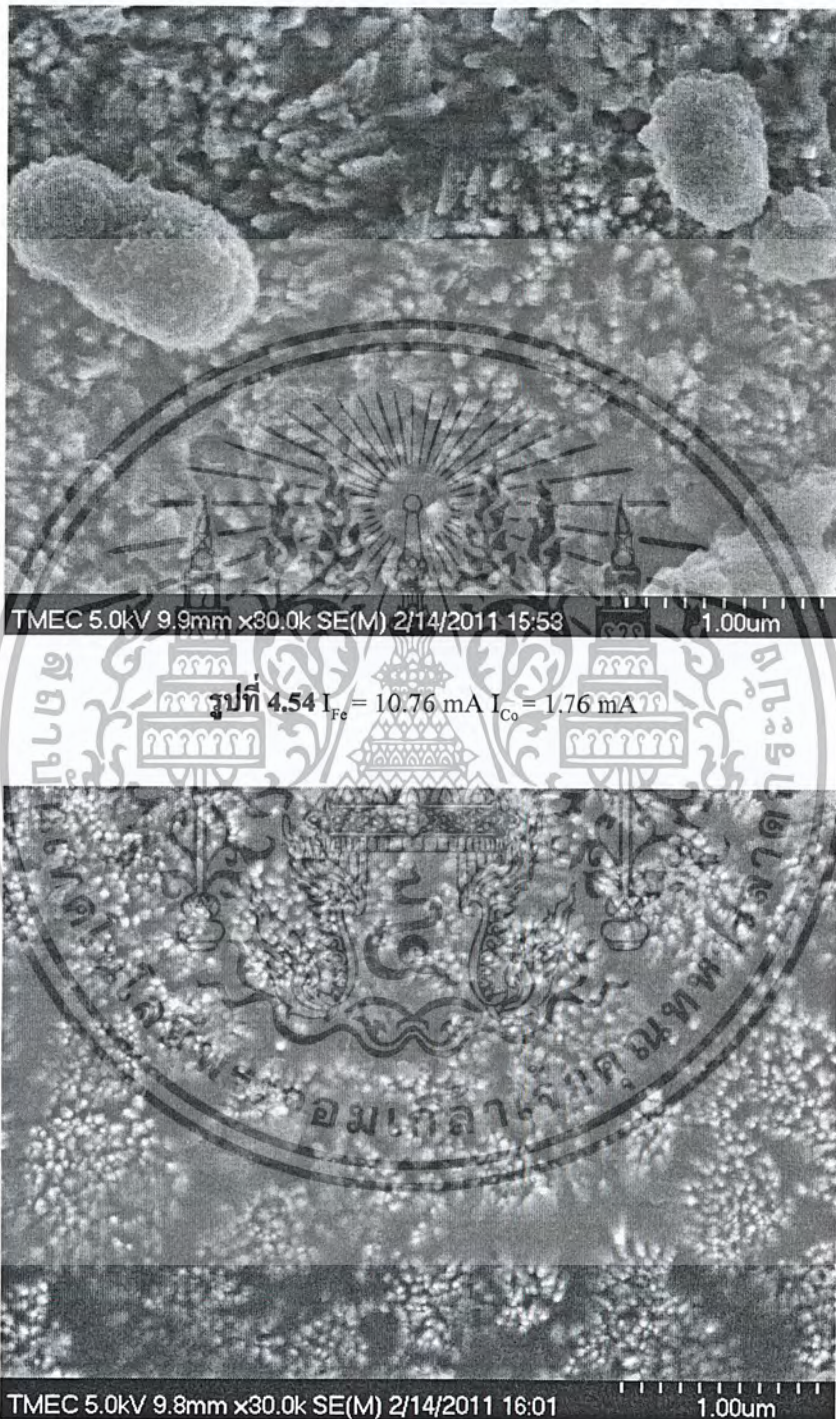
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

รูปที่ 4.53 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 $I_{Fe} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

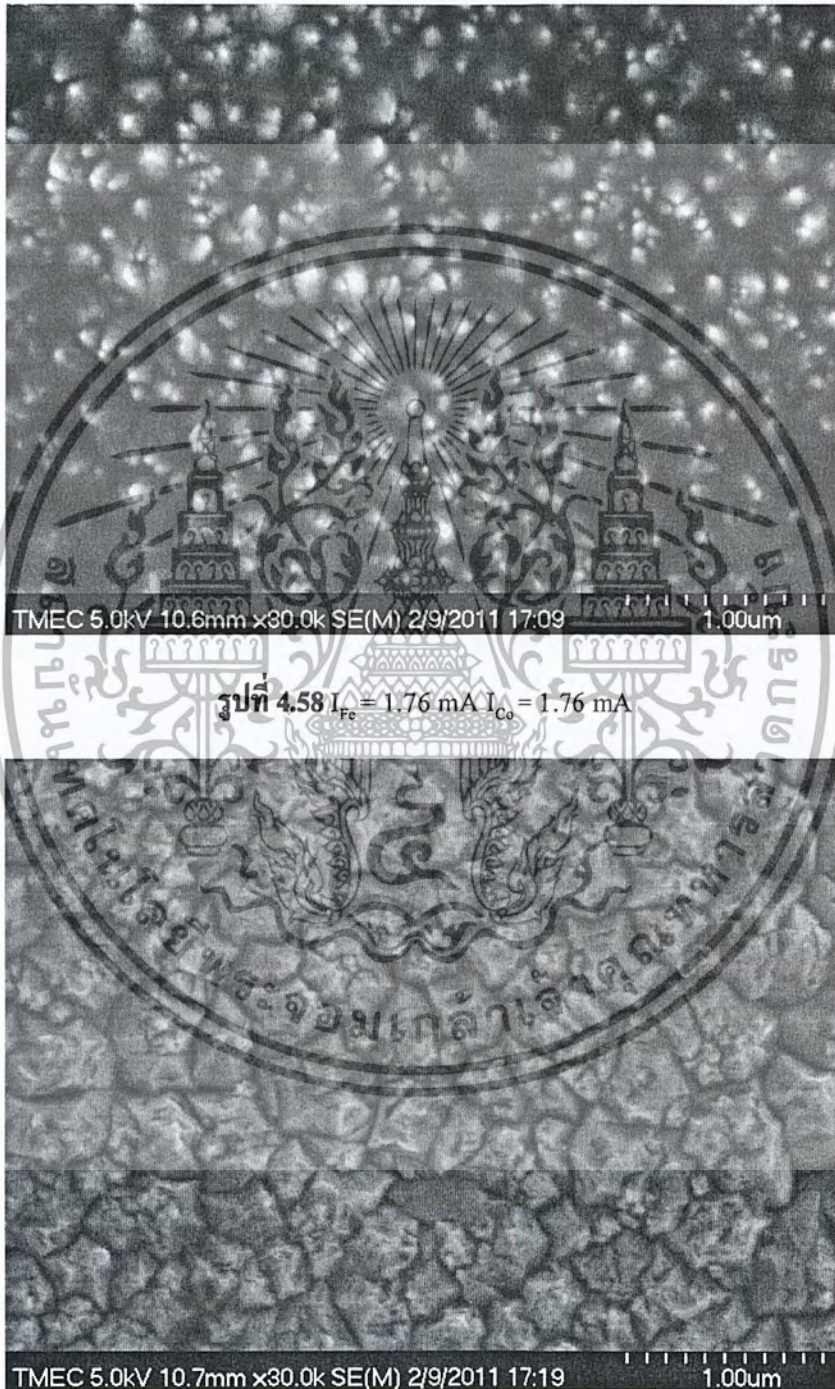
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

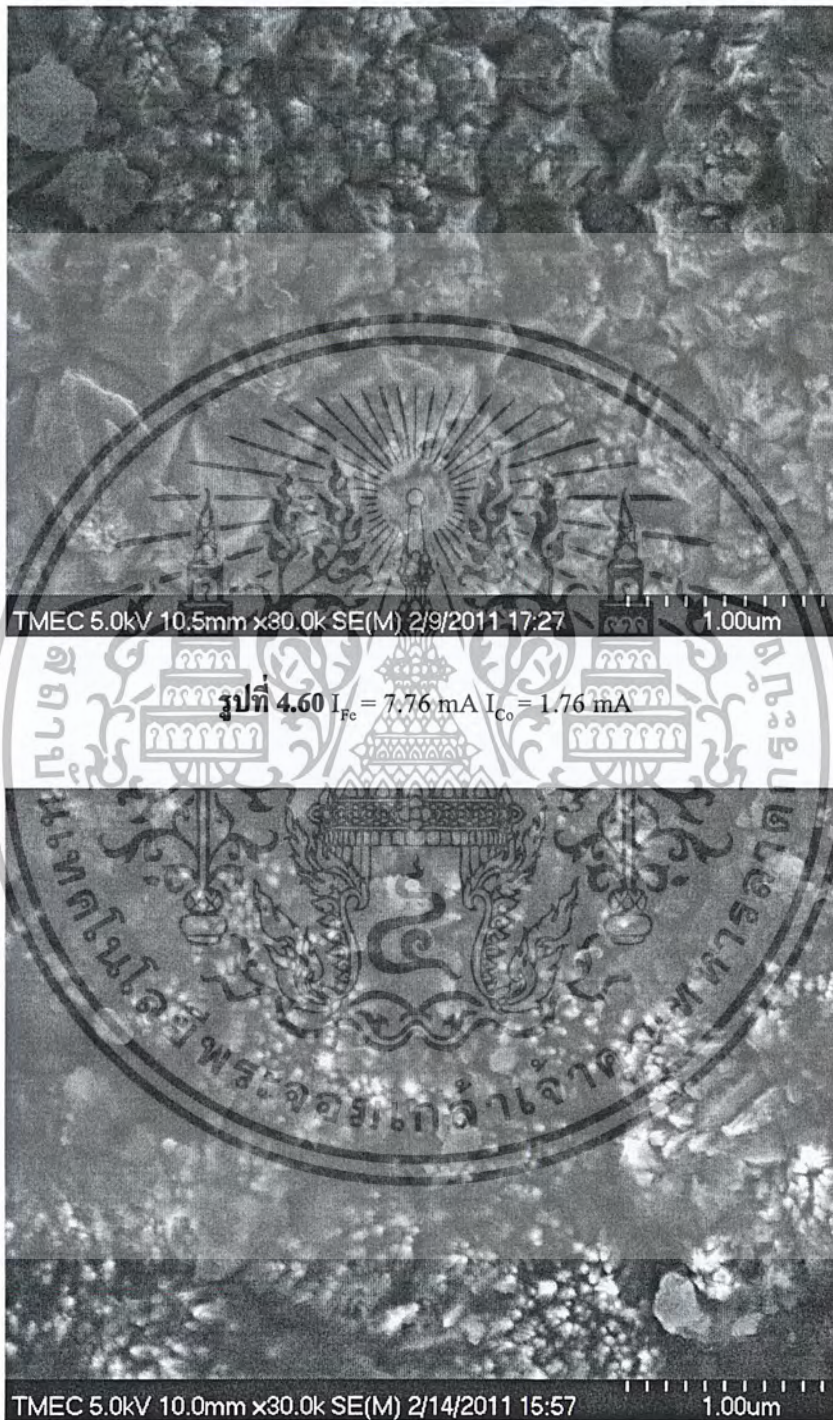
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.6 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่ 2



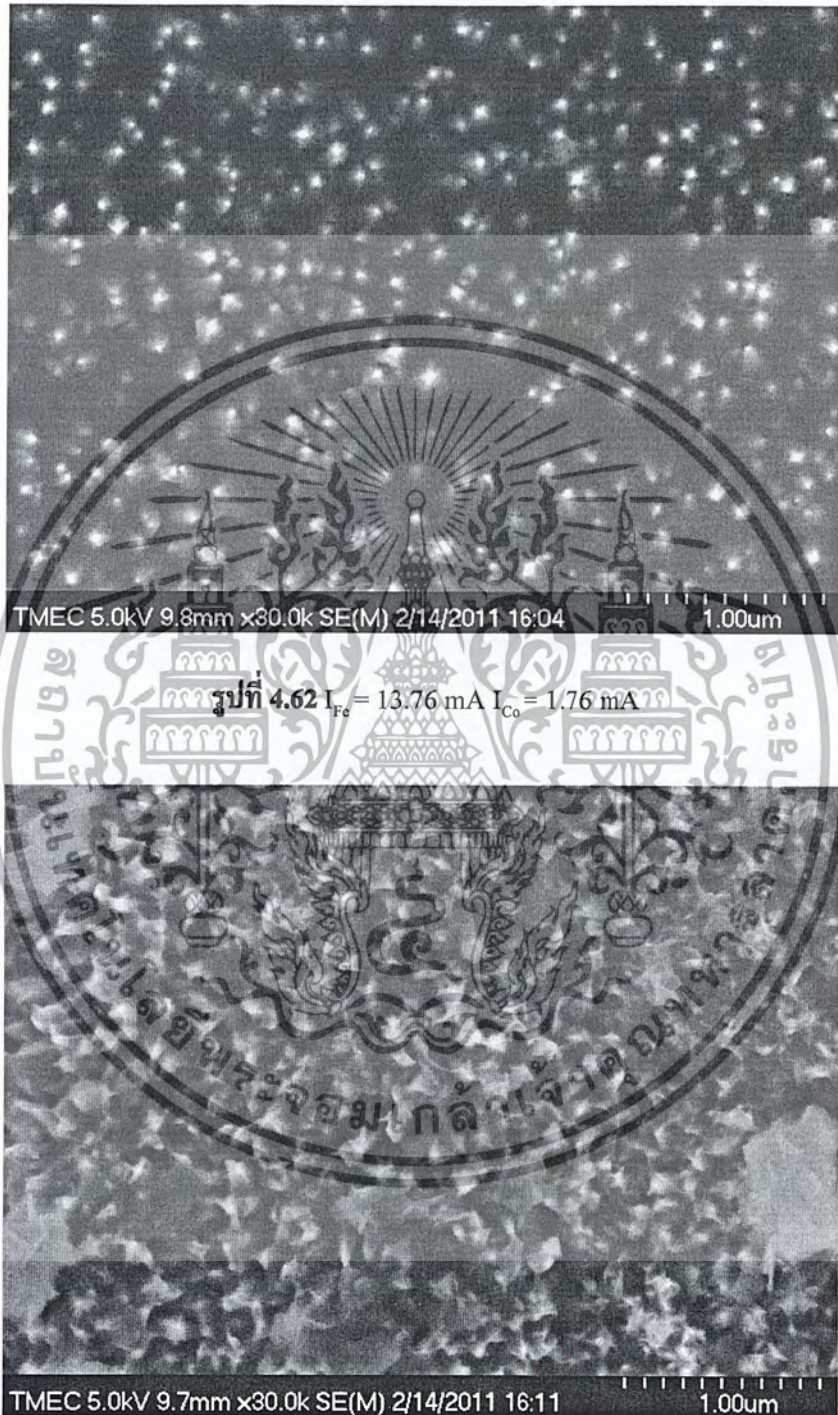
รูปที่ 4.59 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



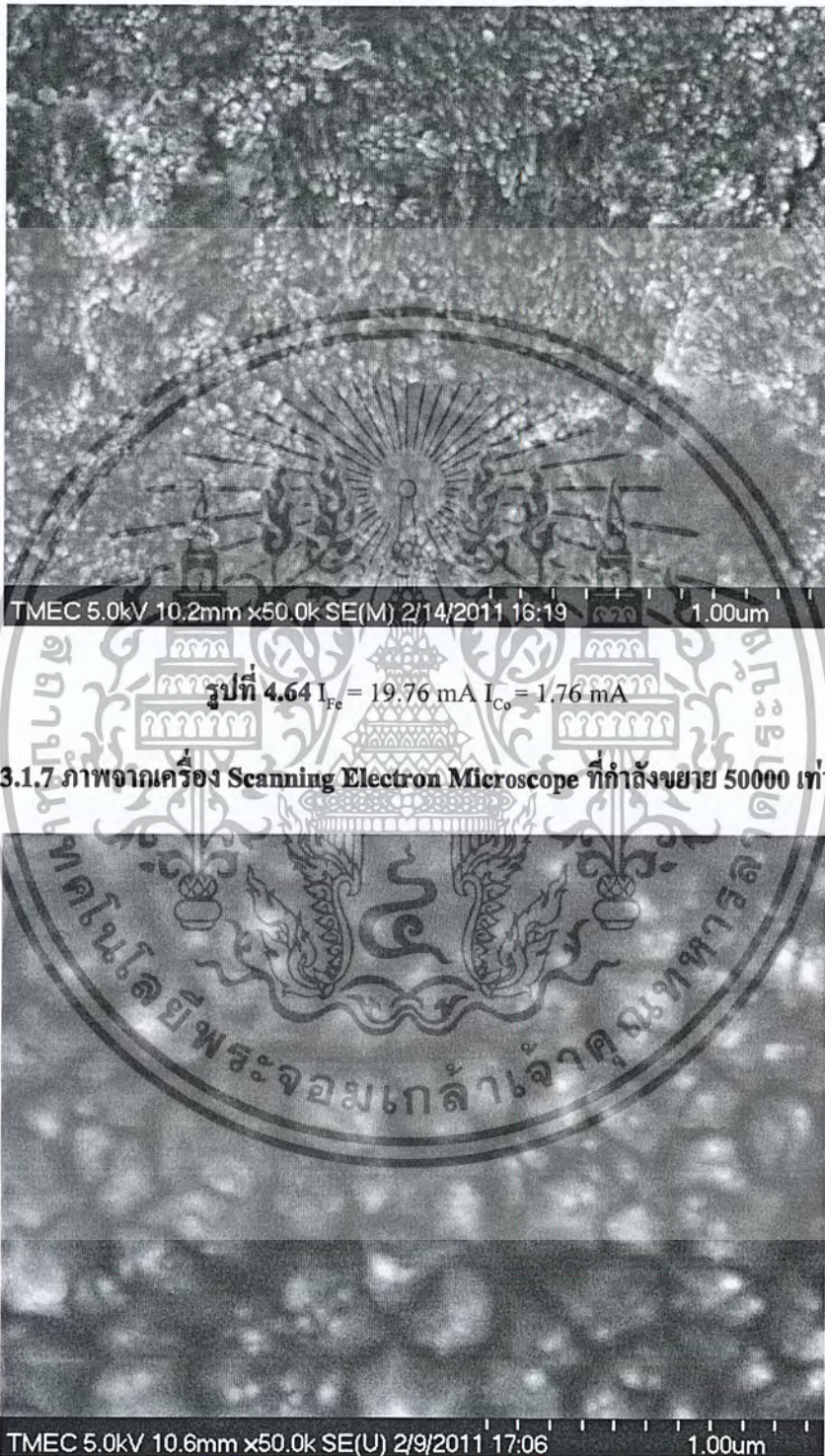
รูปที่ 4.61 $I_{F_c} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{C_o} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



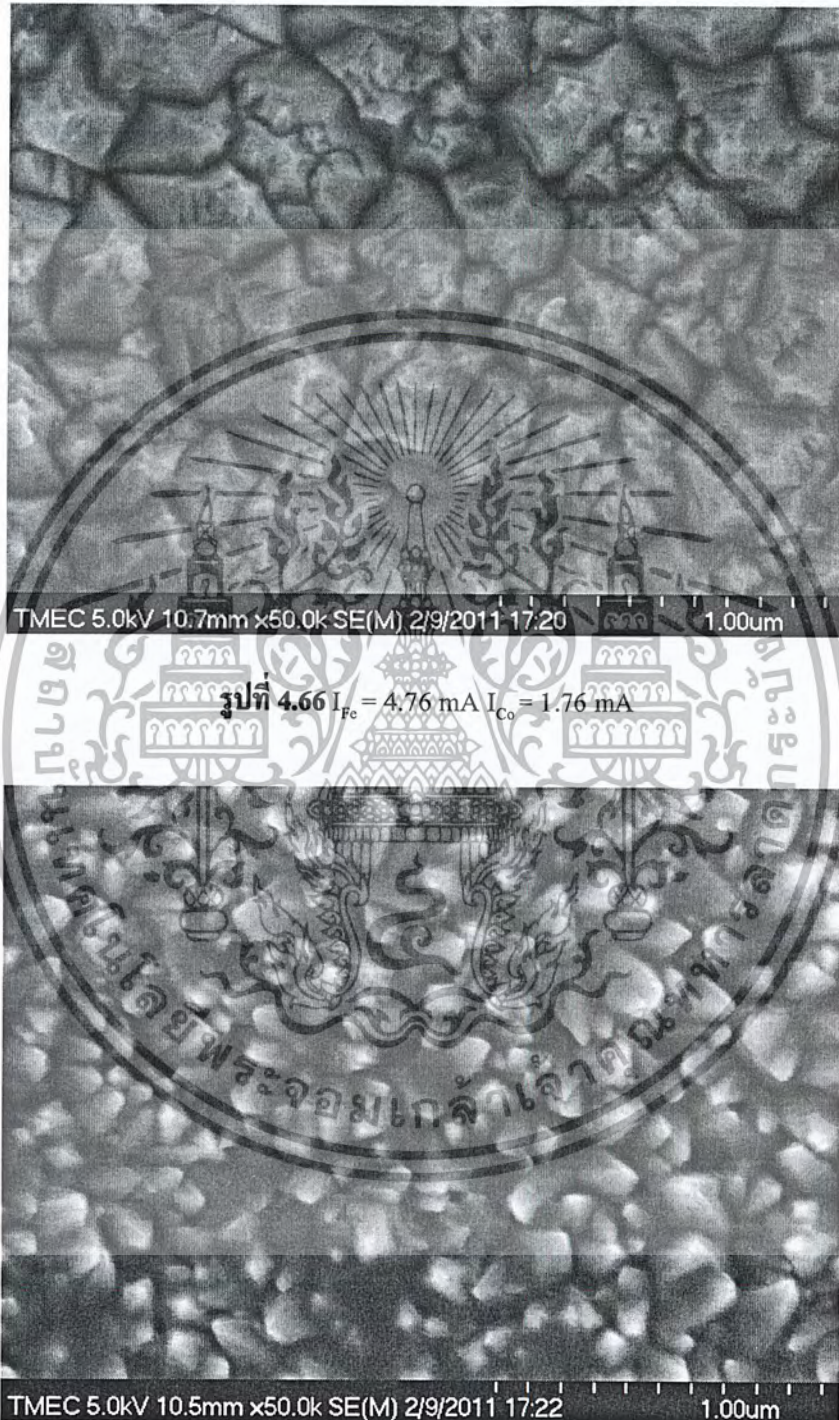
รูปที่ 4.63 $I_{fc} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.65 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 $I_{Fe} = 7.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

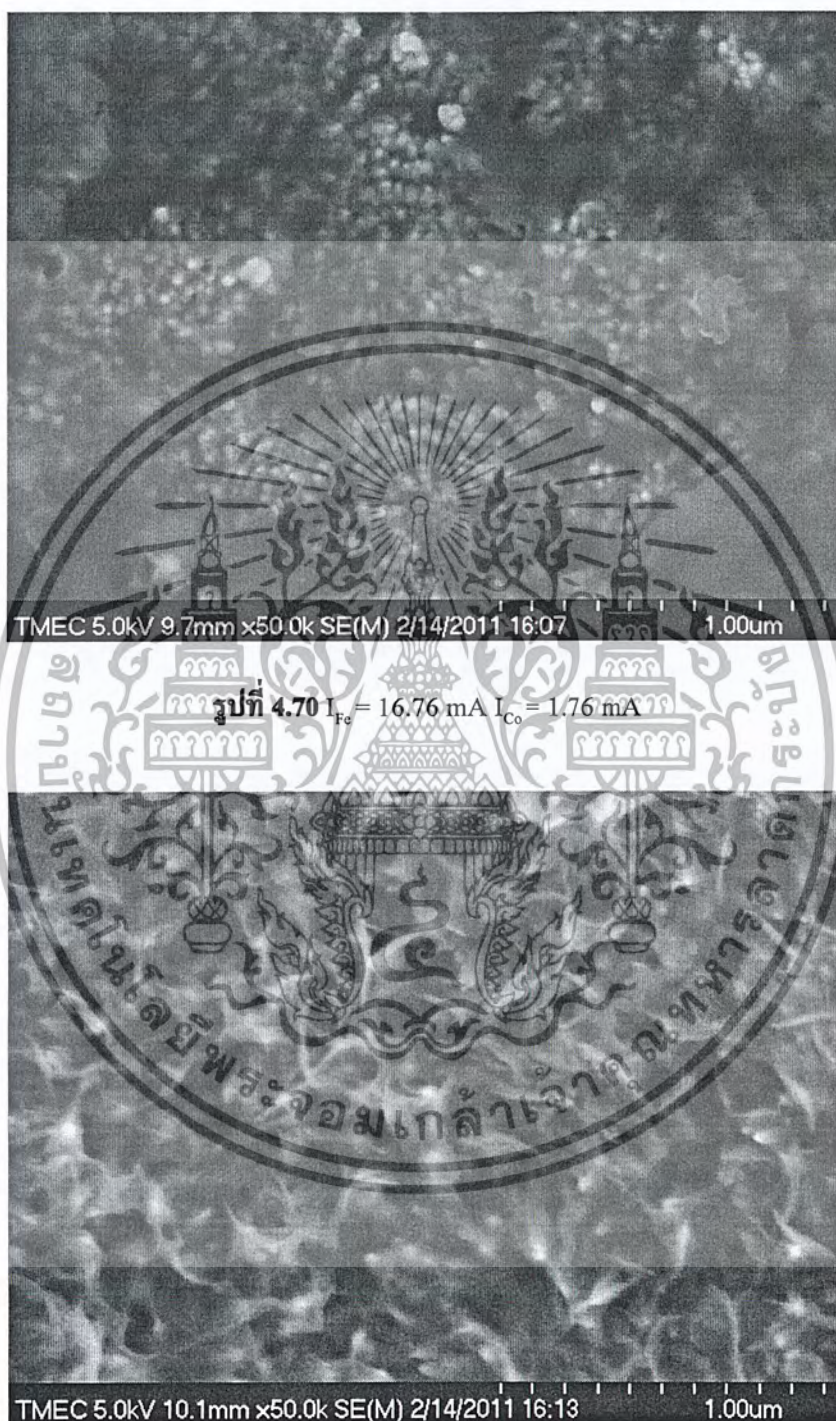
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 $I_{Fc} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

รูปที่ 4.69 $I_{Fc} = 13.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

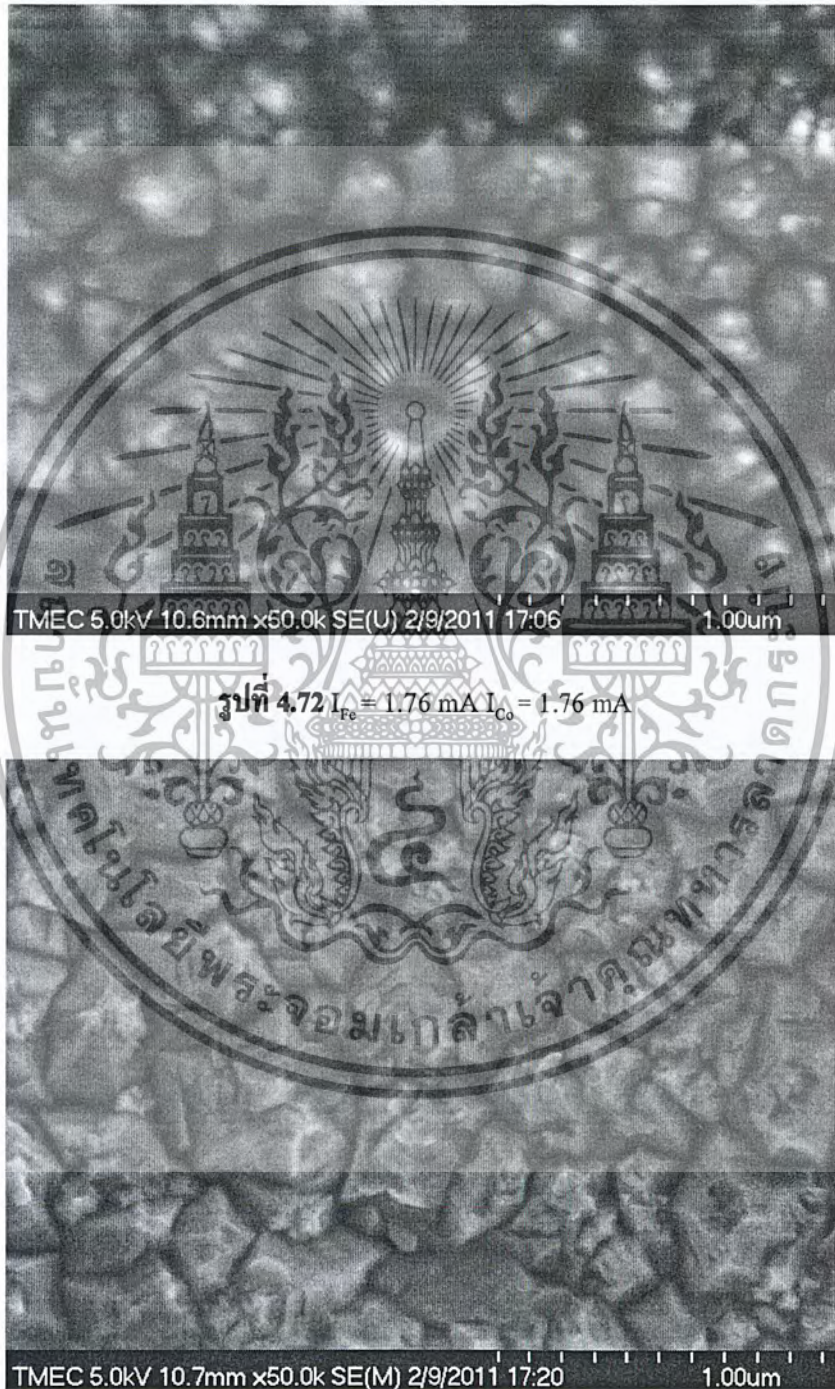
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 $I_{fc} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{co} = 1.76 \text{ mA}$

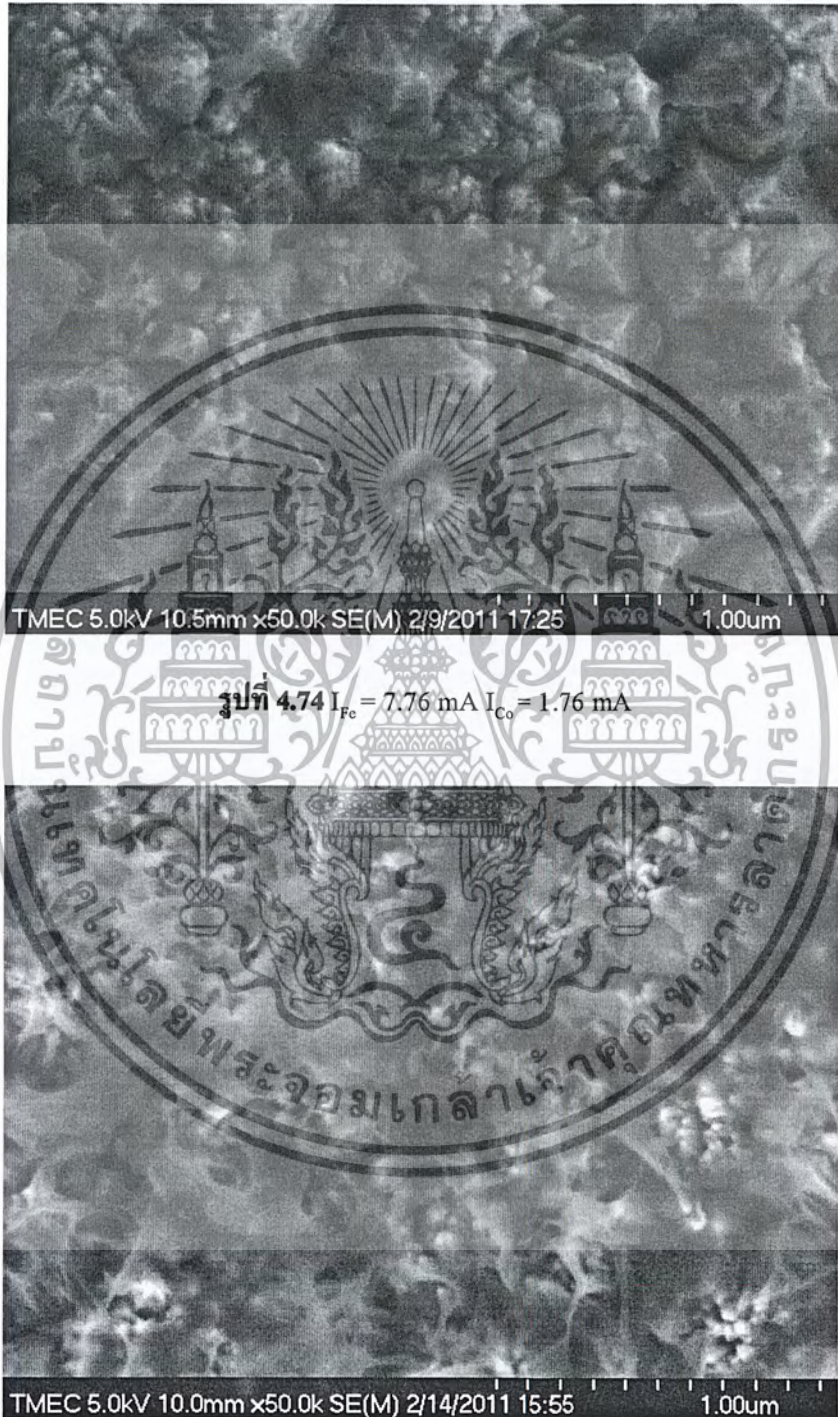
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.8 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.73 $I_{Fe} = 4.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



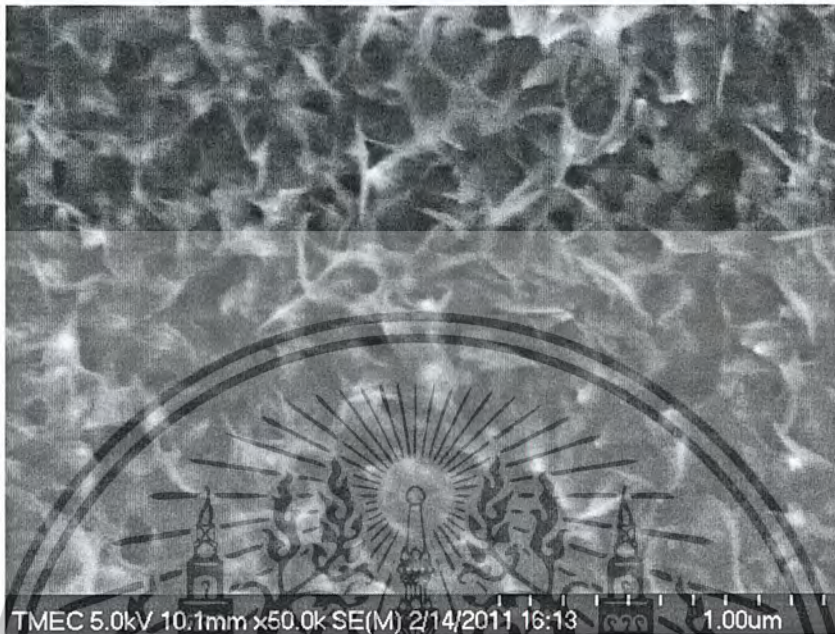
รูปที่ 4.75 $I_{Fe} = 10.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.77 $I_{Fe} = 16.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.78 $I_{Fe} = 19.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

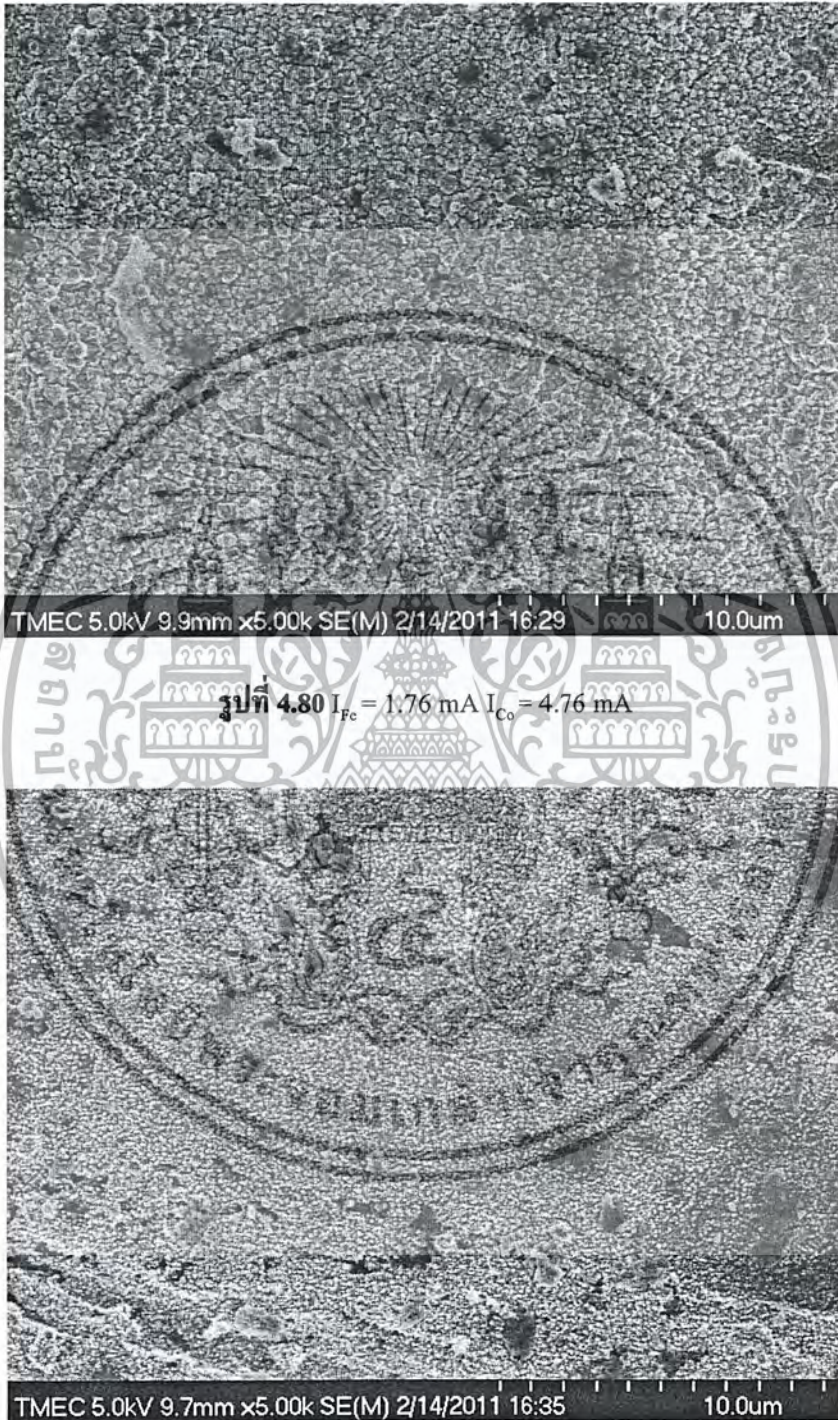
4.3.2 การชุบวัสดุสารแม่เหล็กด้วย CoFe 0.1 M โดยกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$

4.3.2.1 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่าตำแหน่งที่ 1



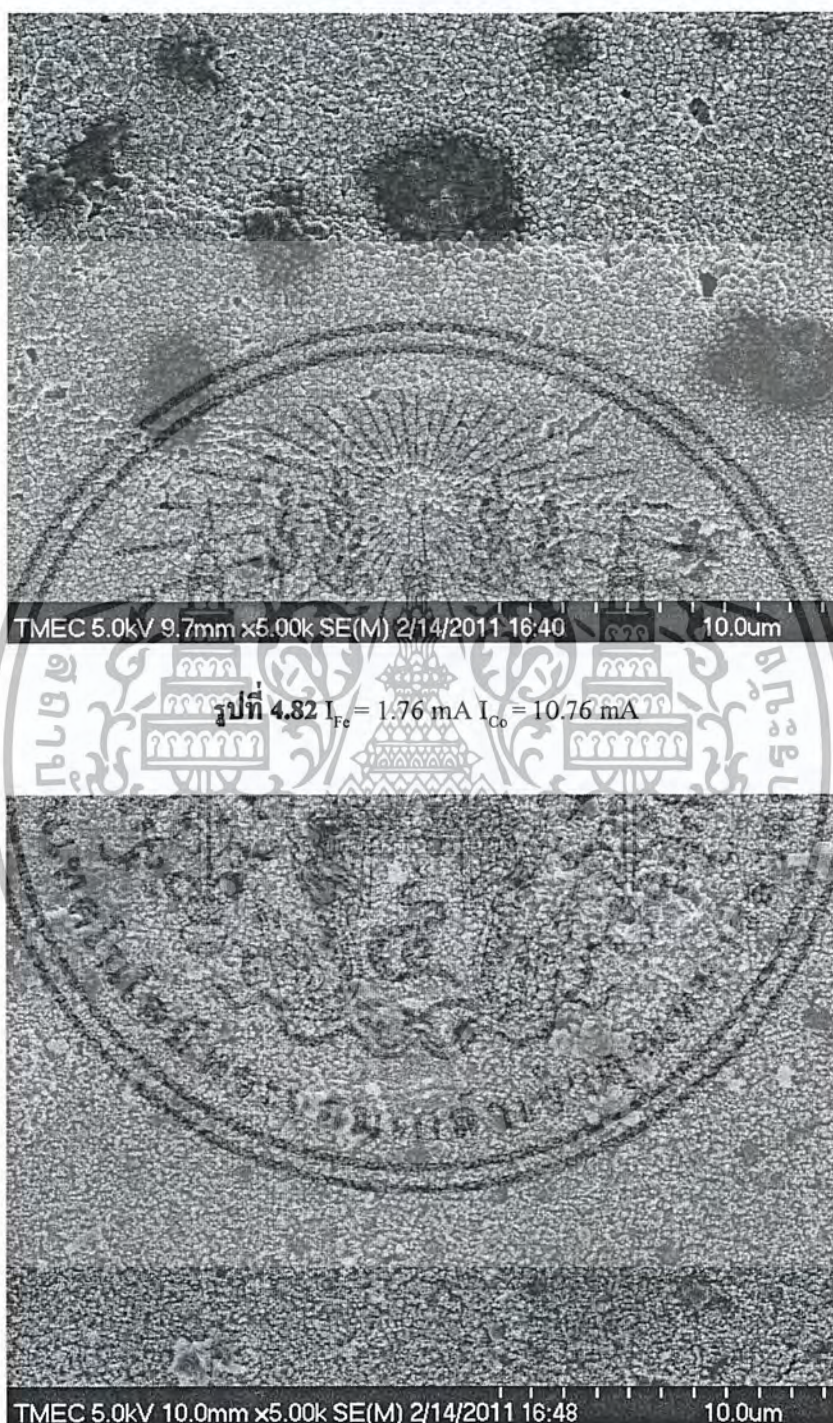
รูปที่ 4.79 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.81 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.83 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$

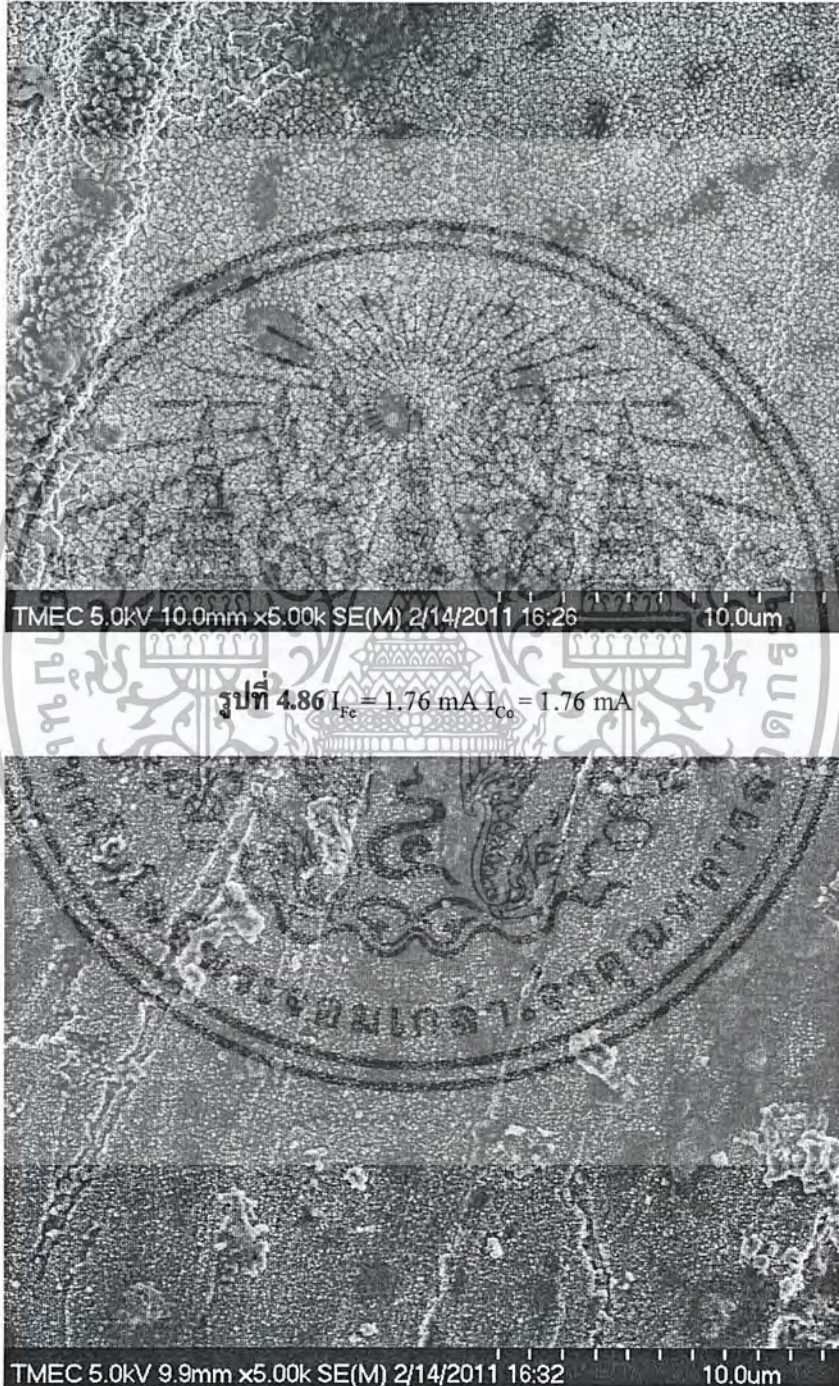
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

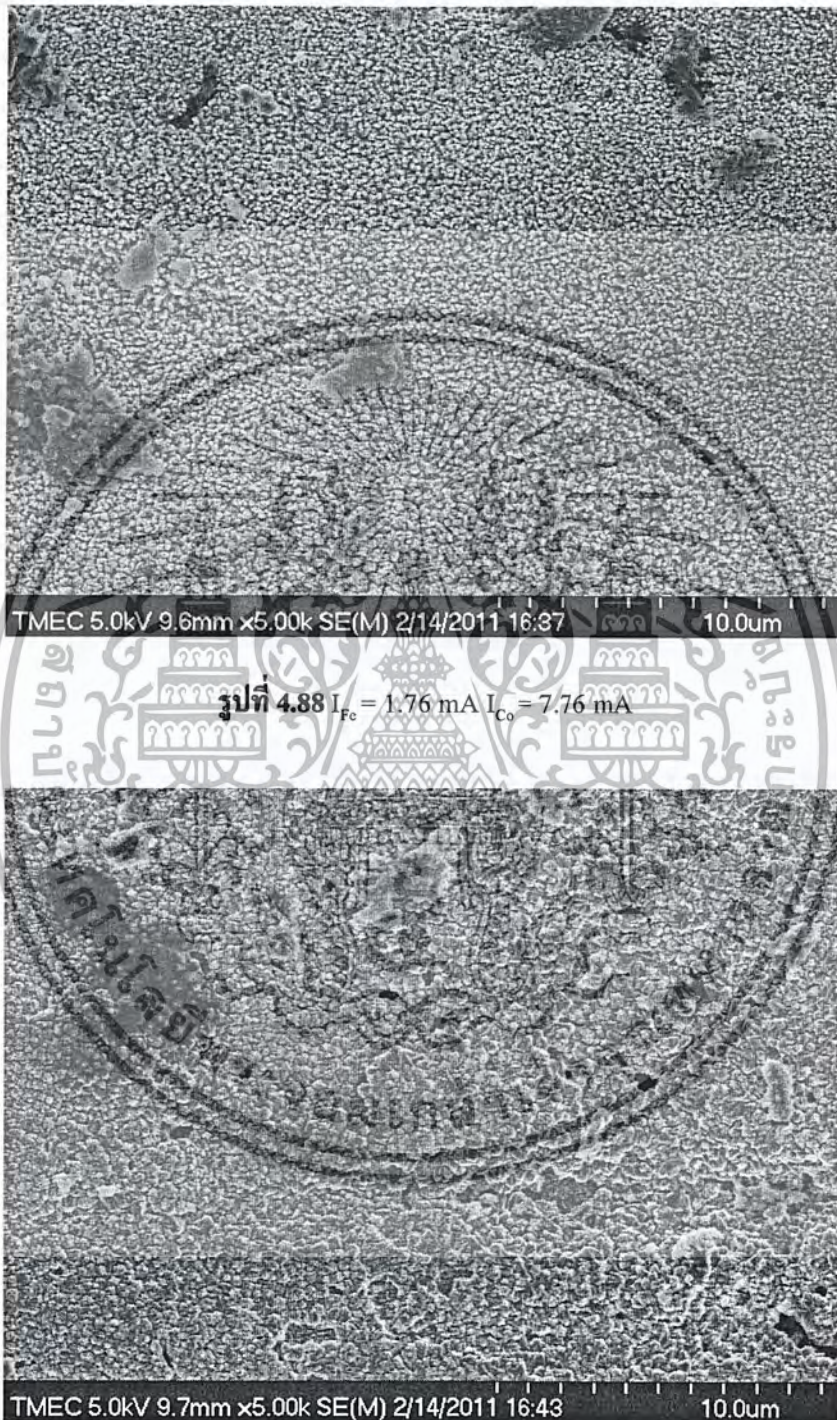
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 5000 เท่าตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.87 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



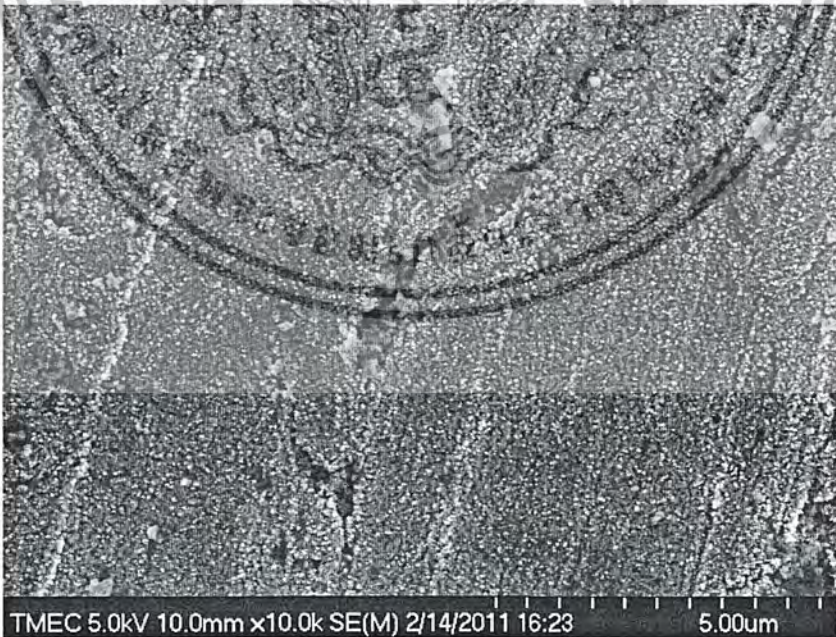
รูปที่ 4.91 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.92 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

4.3.2.3 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.93 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.95 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.97 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$

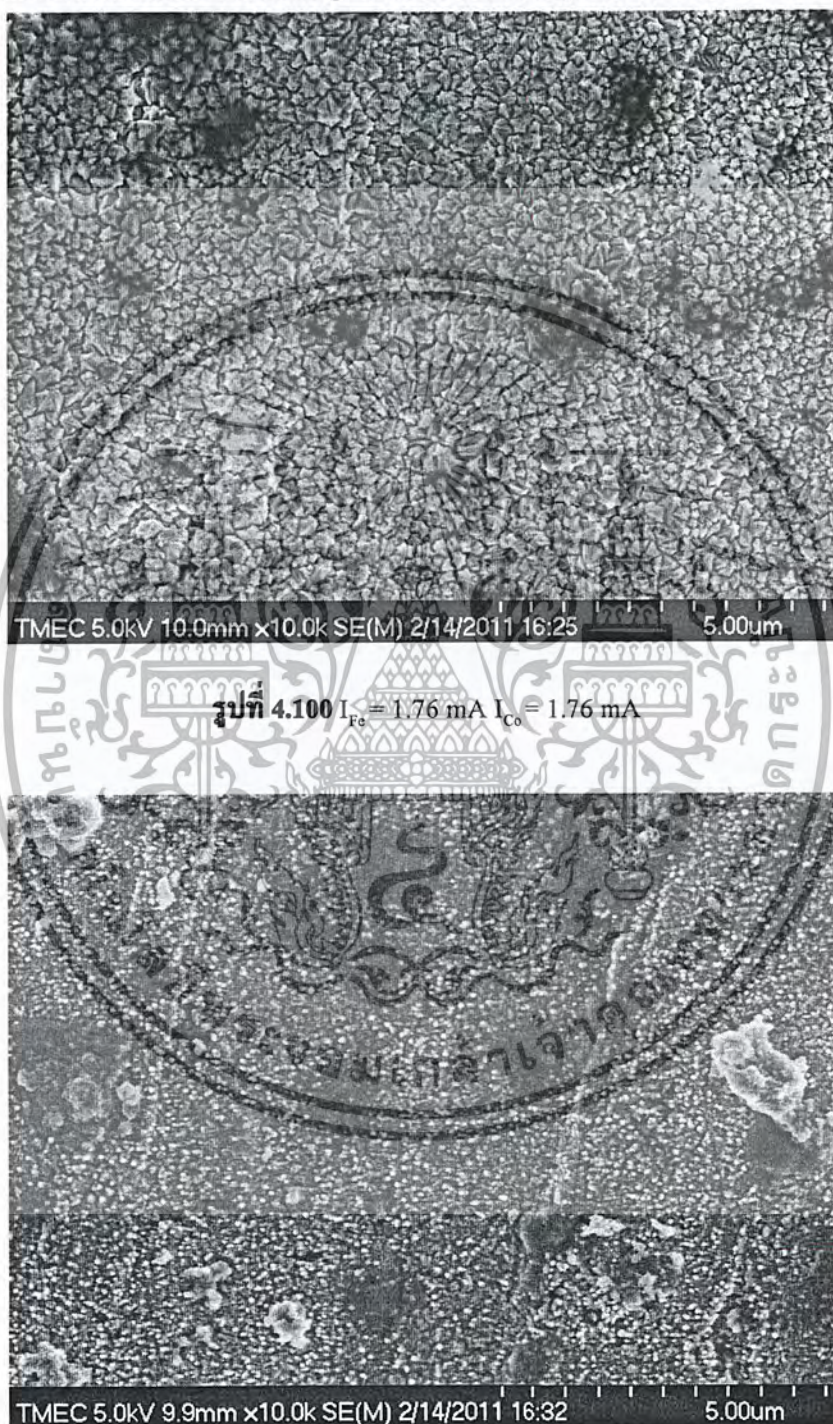
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.99 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

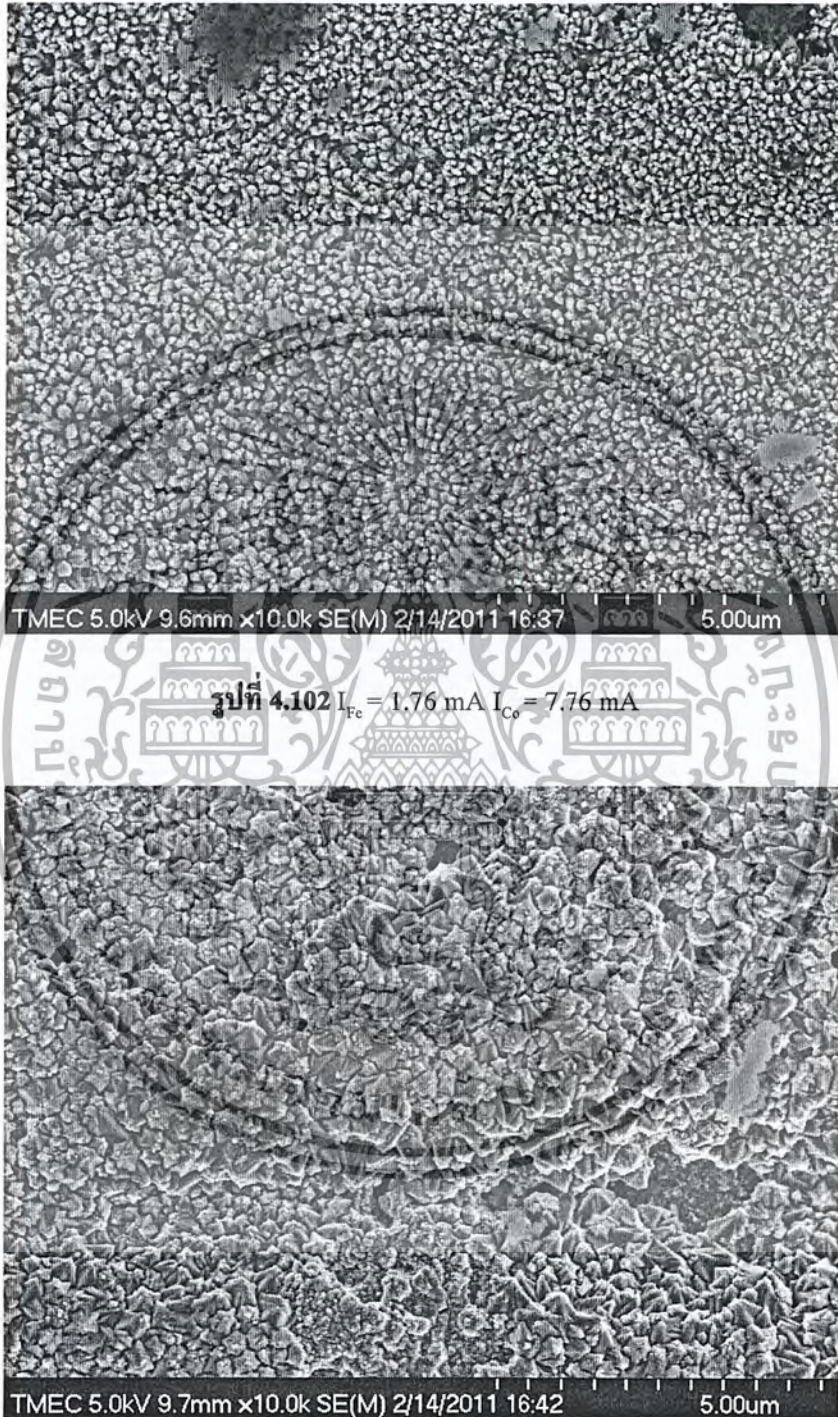
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.4 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 10000 เท่าตำแหน่งที่2



รูปที่ 4.101 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.103 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.105 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



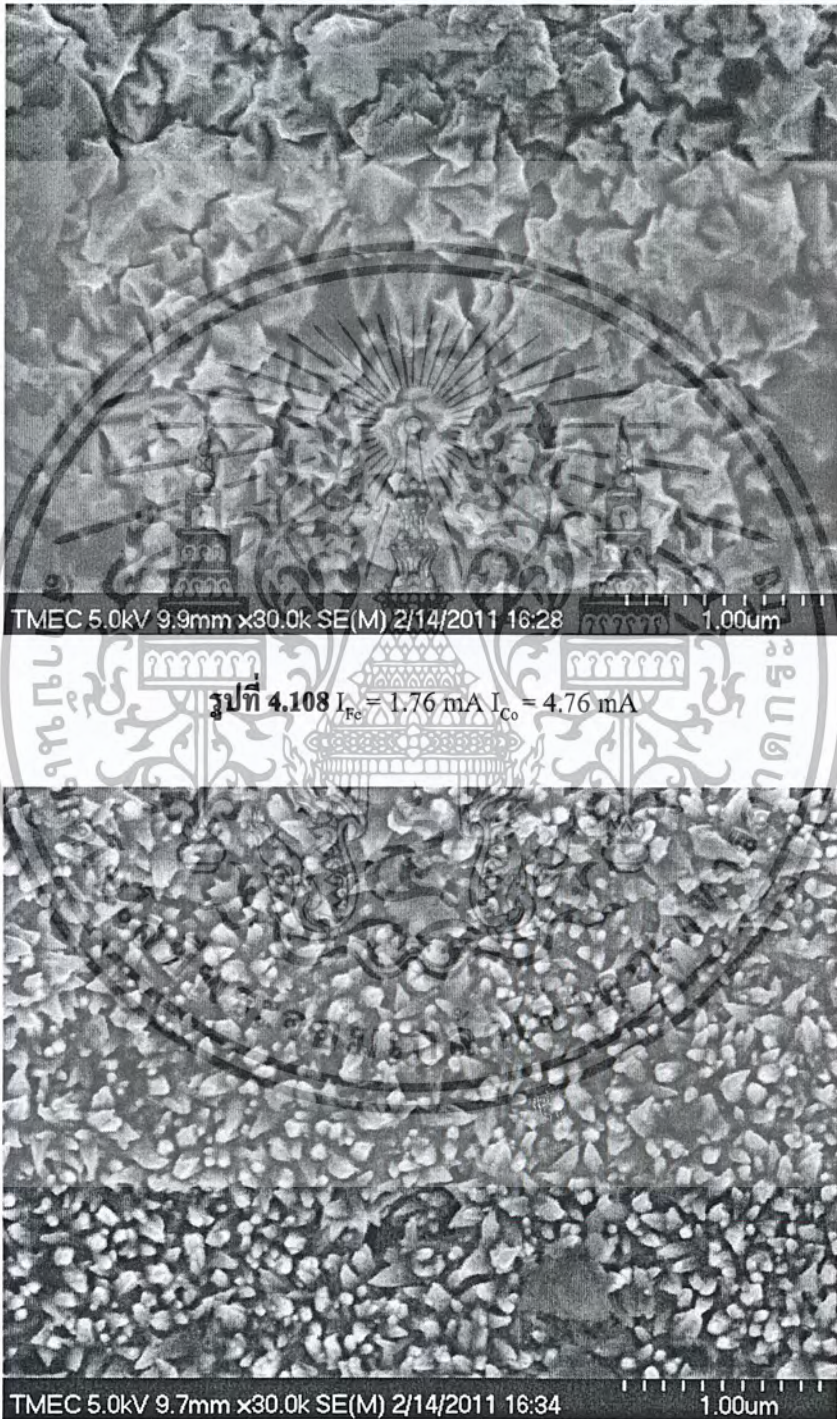
รูปที่ 4.106 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

4.3.2.5 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 4.107 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

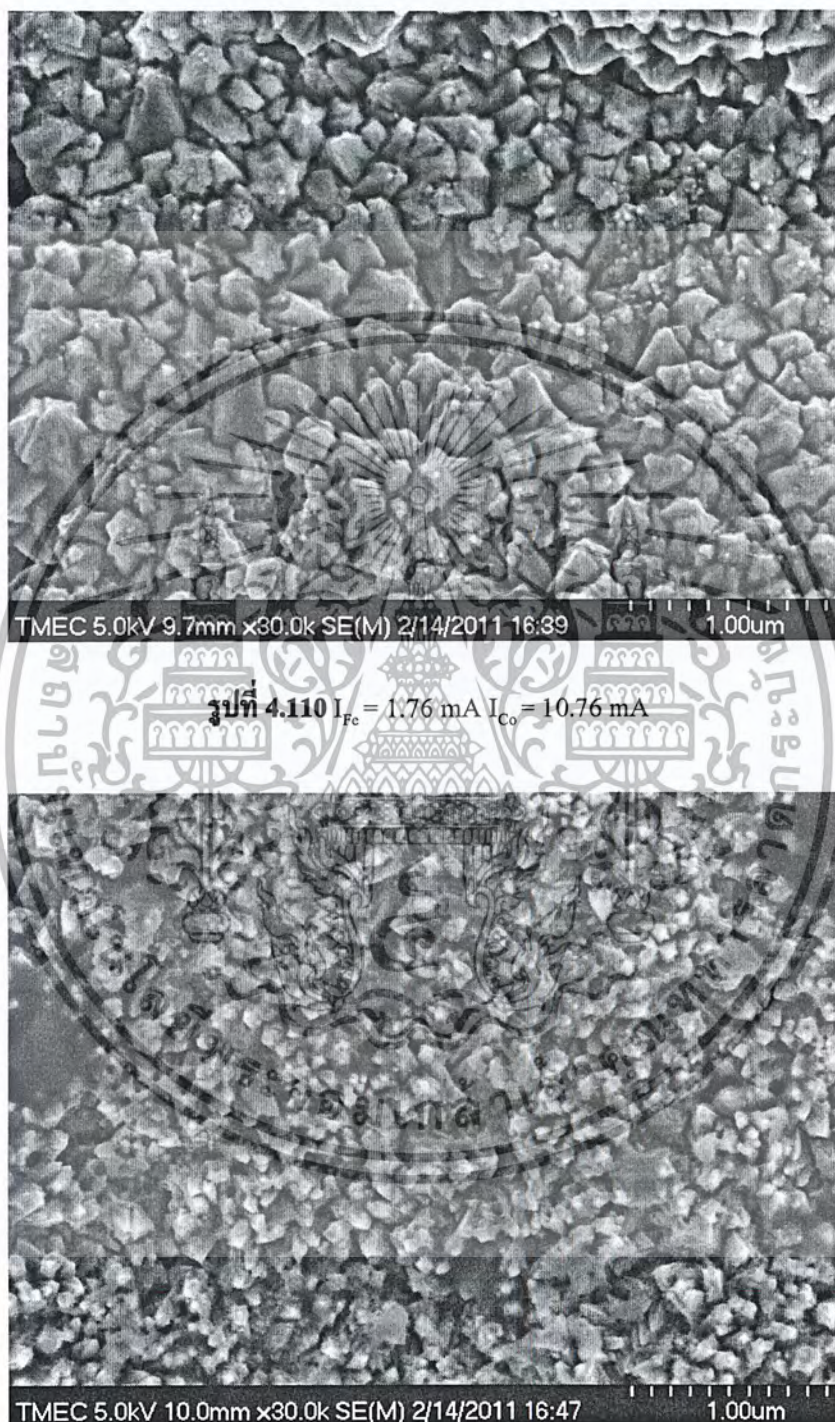
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.108 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$

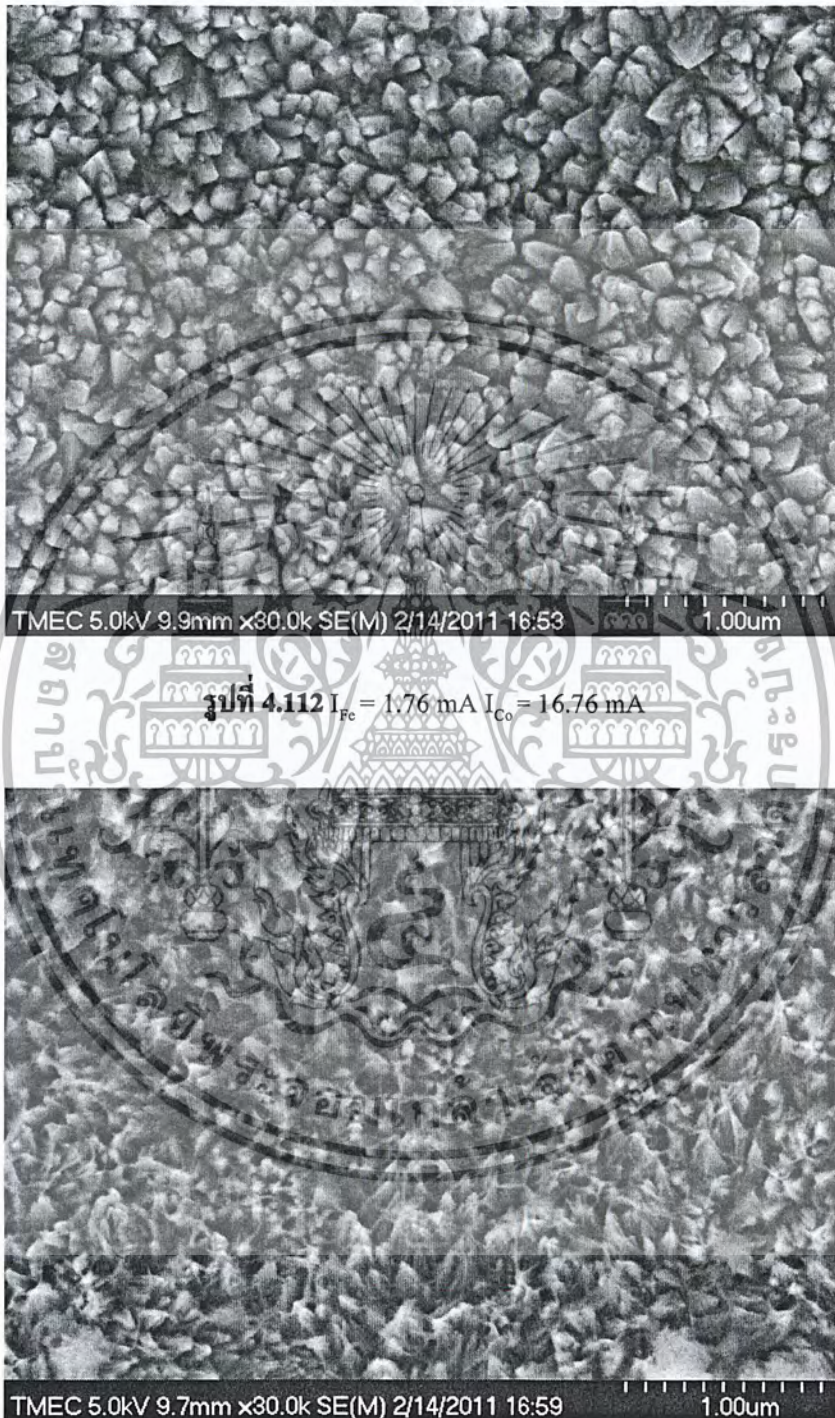
รูปที่ 4.109 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 7.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.111 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$

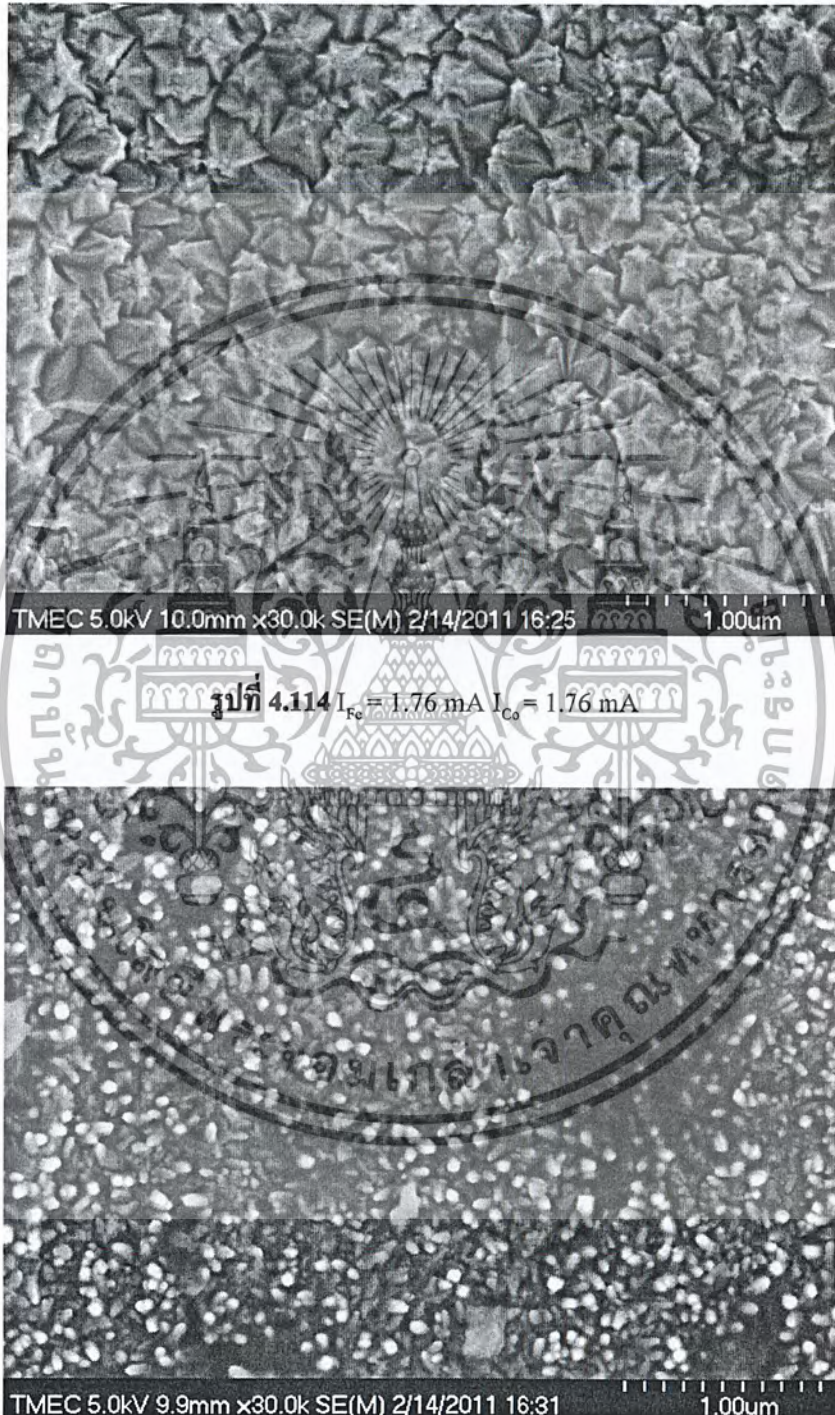
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.113 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

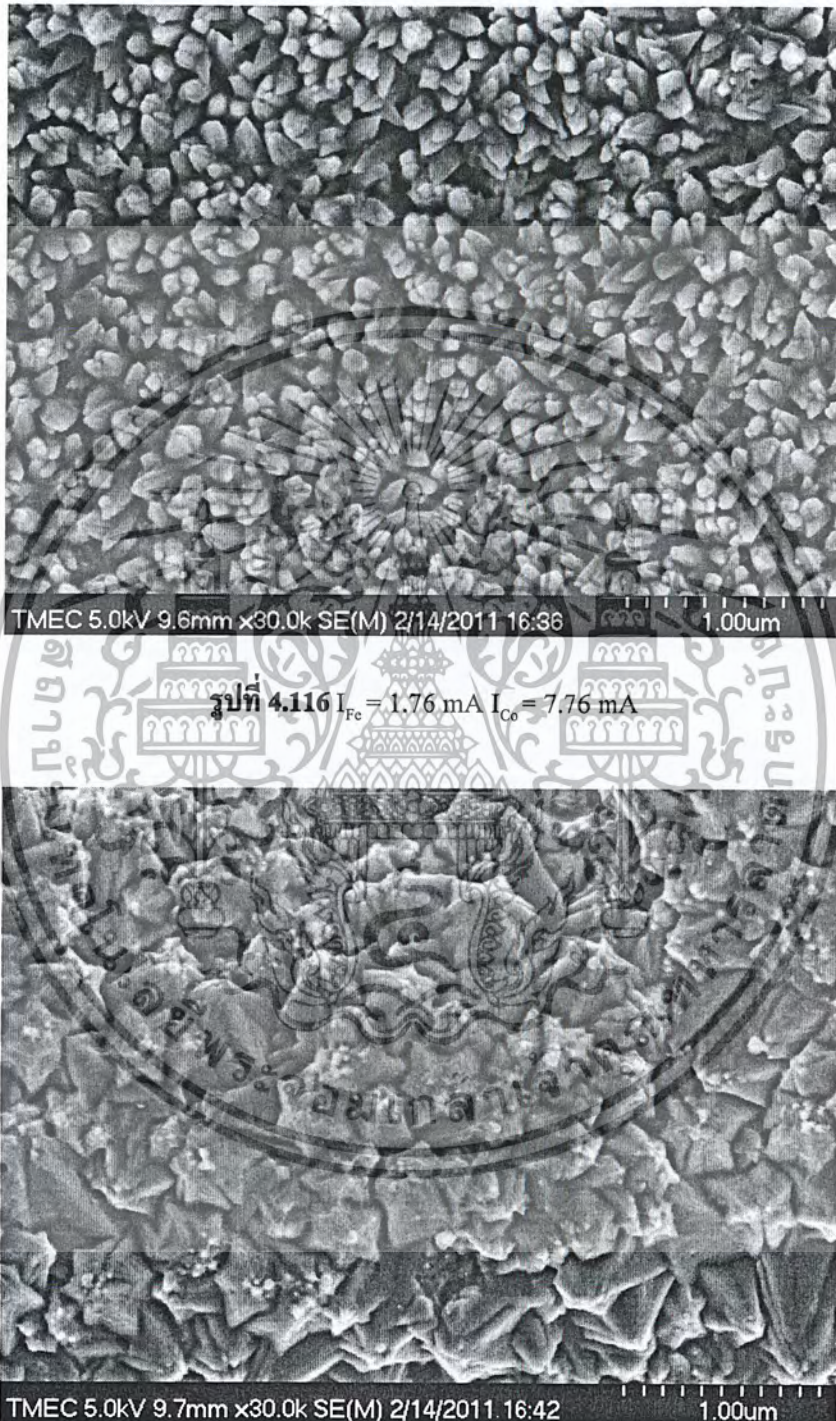
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.6 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 30000 เท่าตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 4.115 $I_{F_c} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{C_o} = 4.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



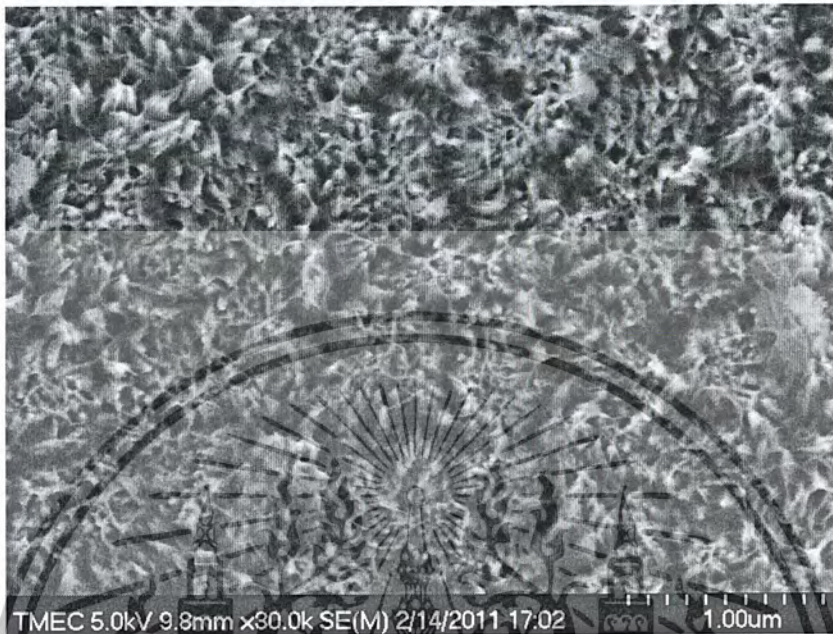
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.118 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$

รูปที่ 4.119 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.120 $I_{F_c} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{C_o} = 19.76 \text{ mA}$

4.3.2.7 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่1

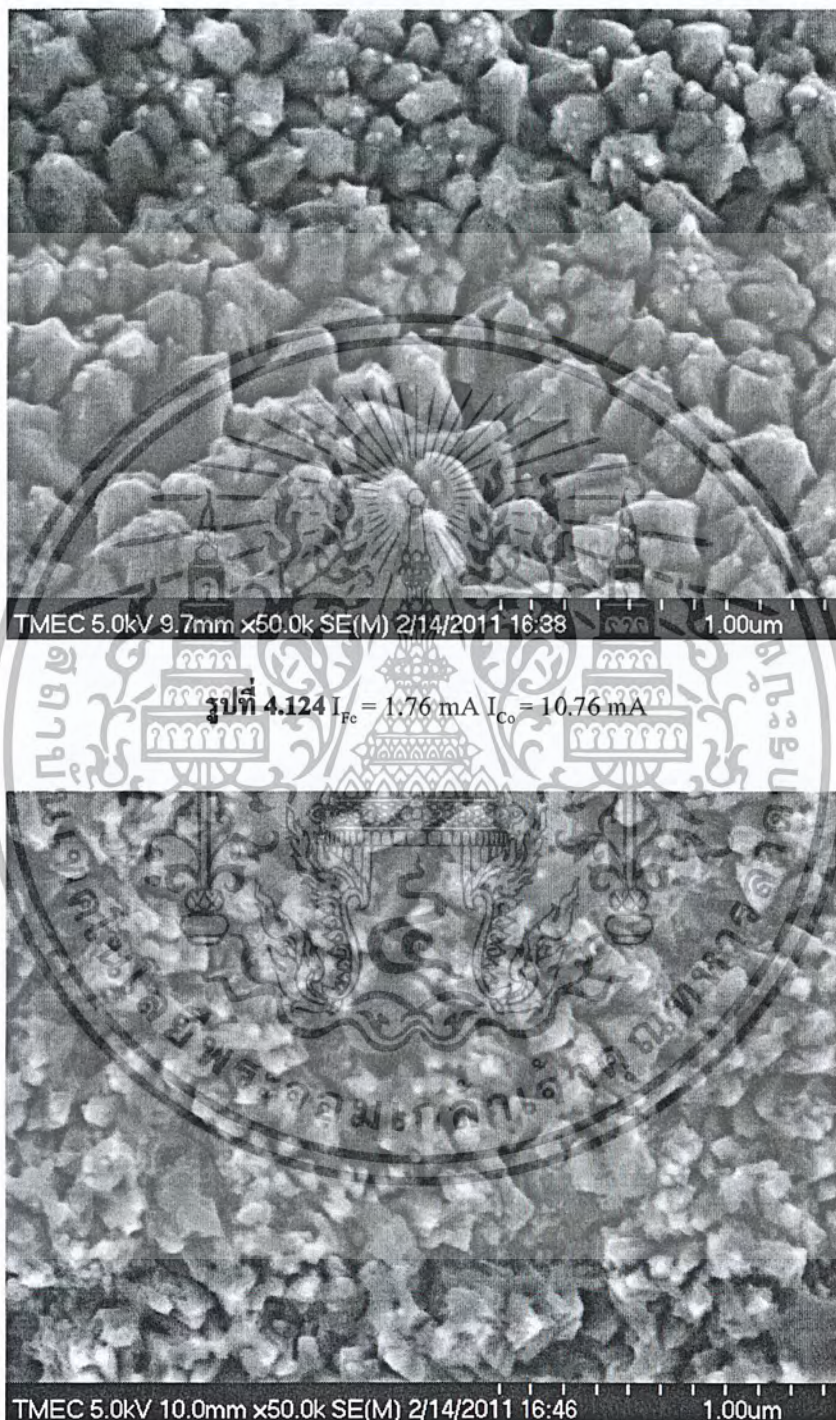


รูปที่ 4.121 $I_{F_c} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{C_o} = 1.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

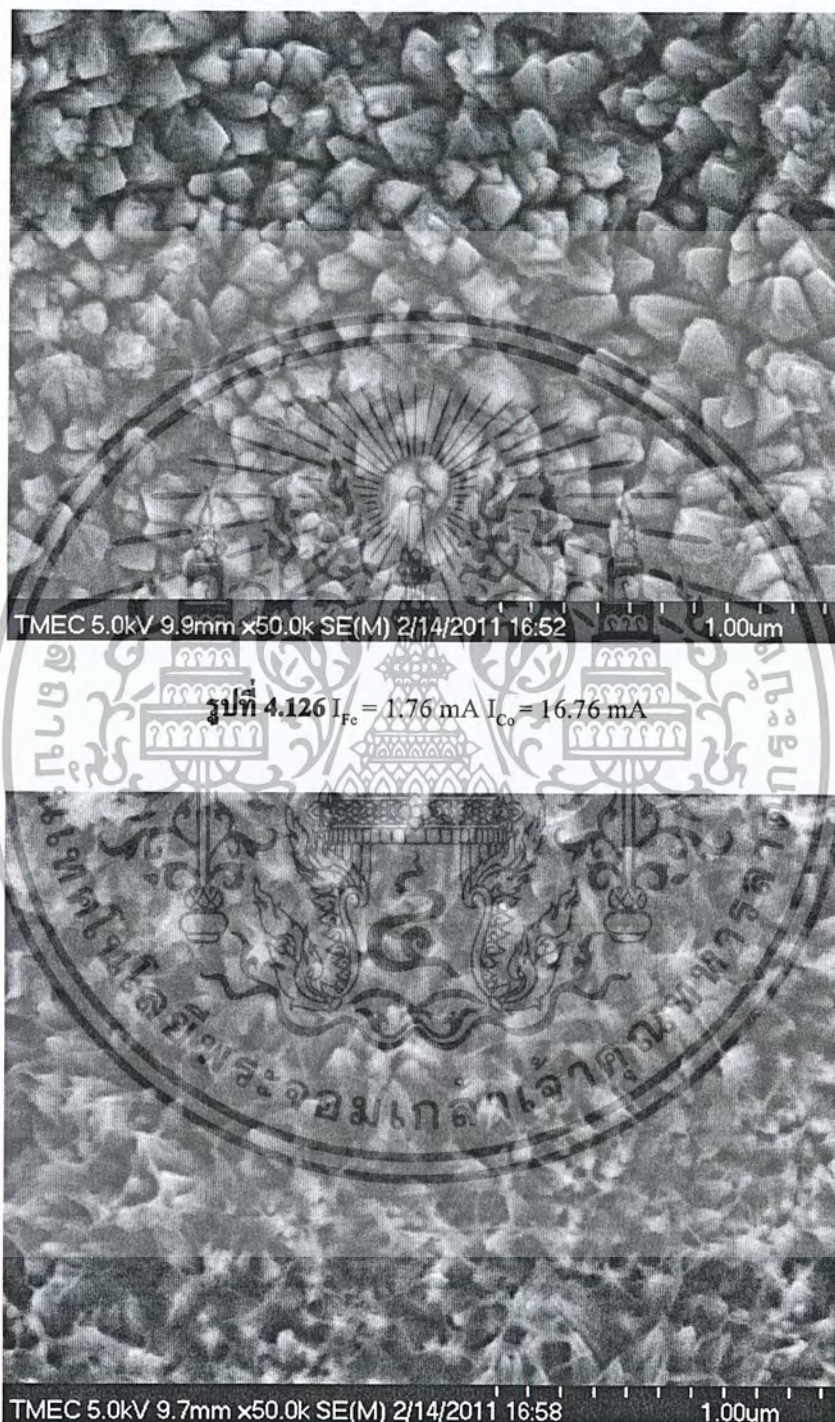


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.125 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 13.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.127 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

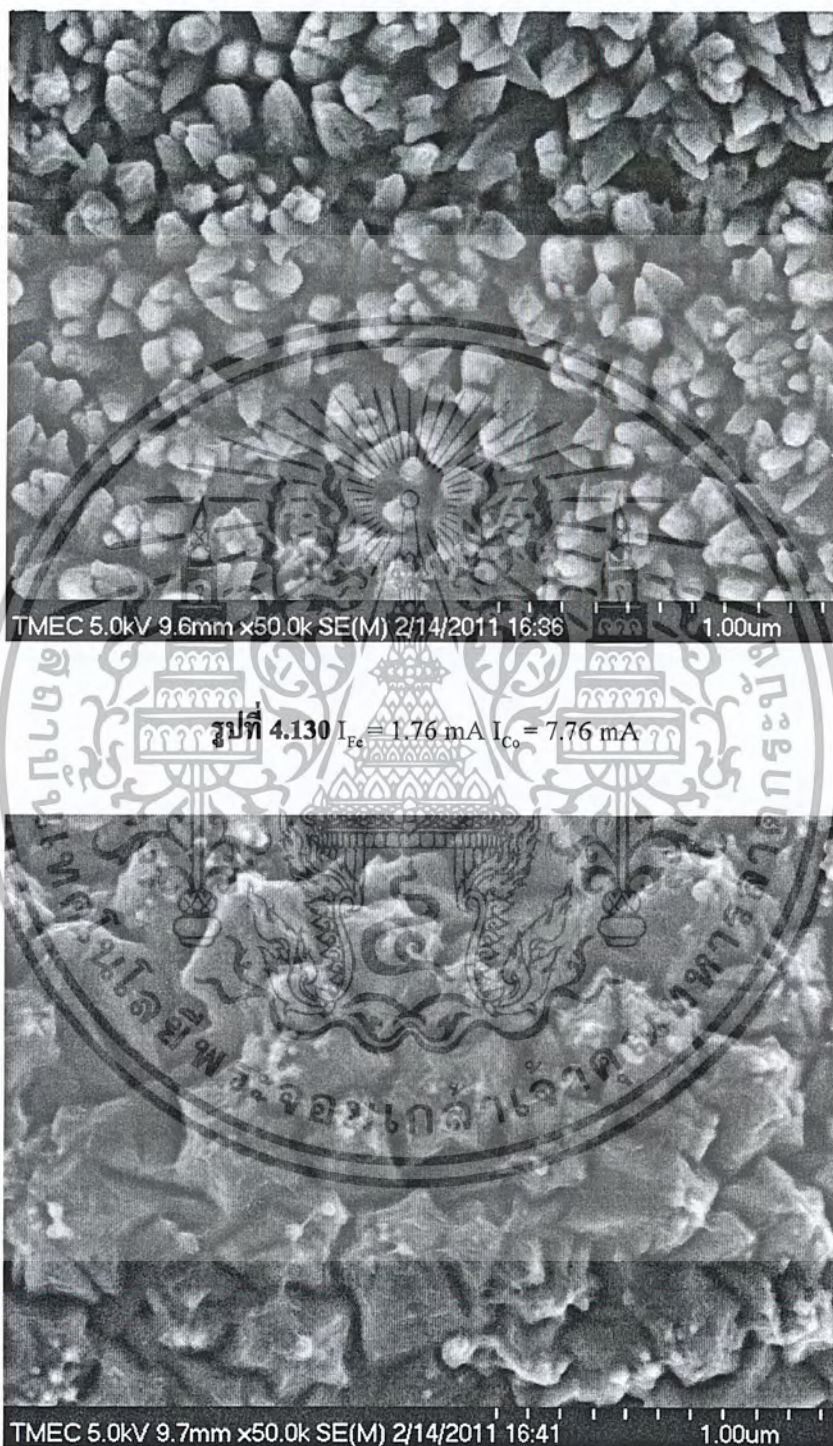
4.3.2.8 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 50000 เท่าตำแหน่งที่2



รูปที่ 4.128 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$

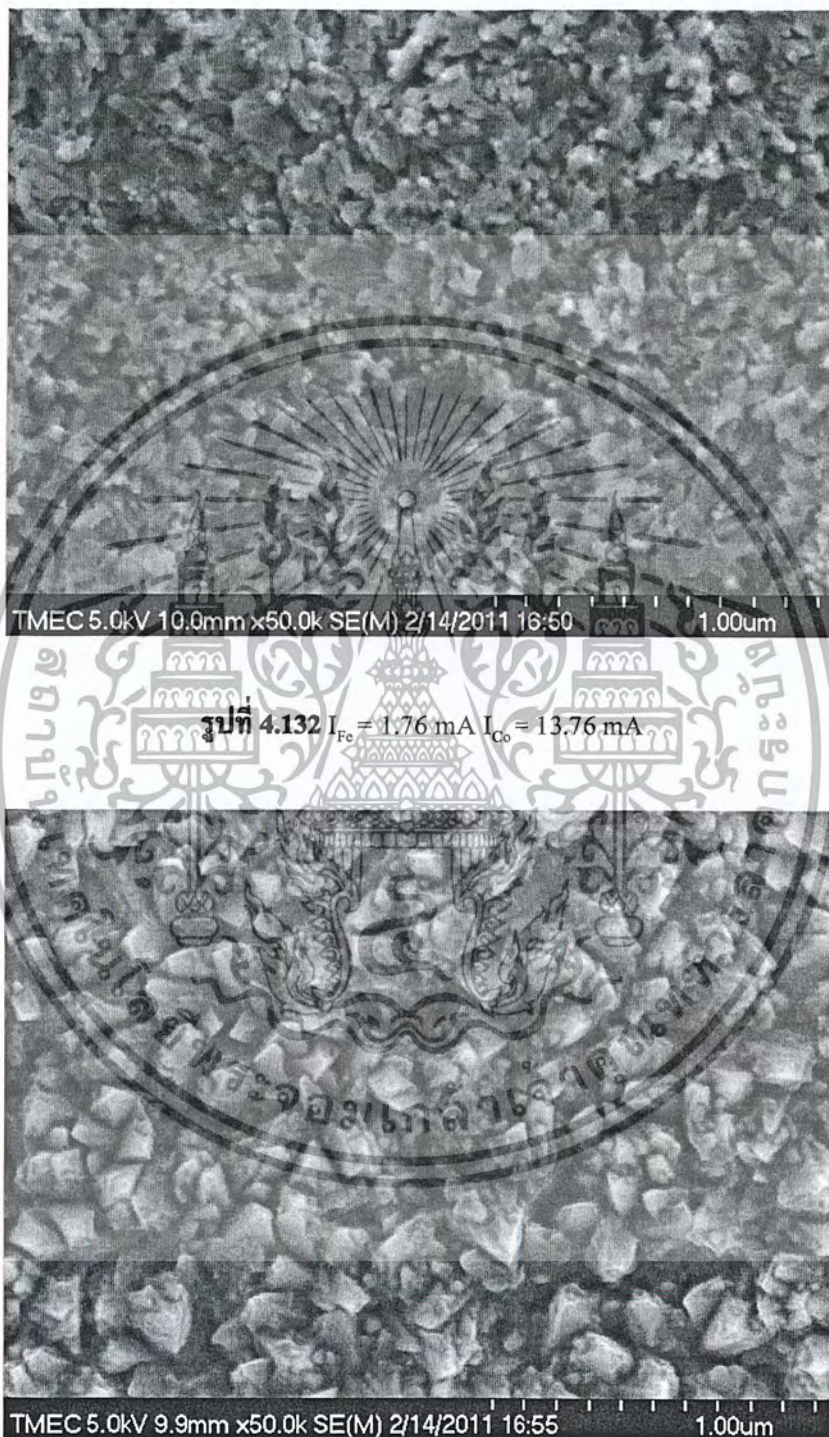
รูปที่ 4.129 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 4.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



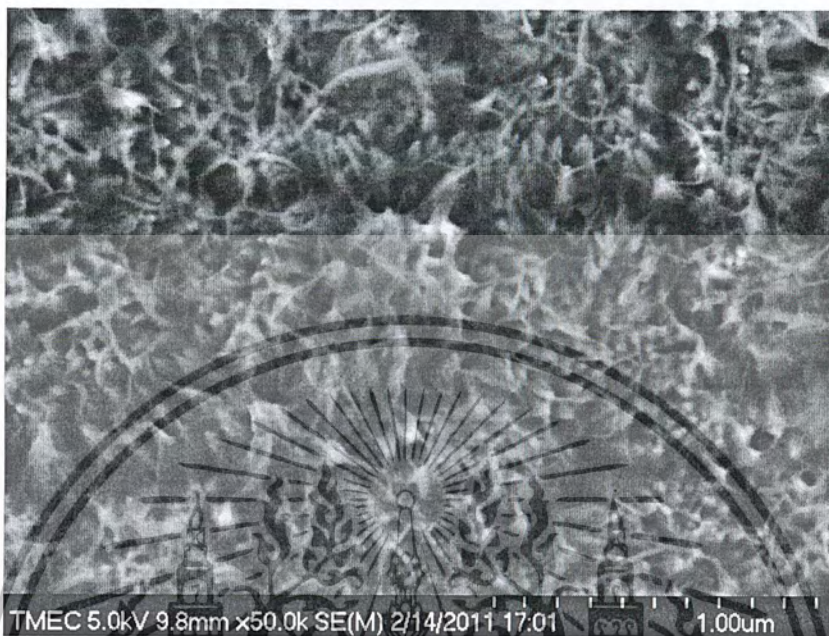
รูปที่ 4.131 $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 10.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.133 $I_{Fc} = 1.76 \text{ mA}$ $I_{Co} = 16.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.133 = 1.76 mA $I_{Co} = 19.76 \text{ mA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

รายงานนี้เป็นการศึกษาเรื่องการชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม Co-Ni-Fe ด้วยวิธีการเชิงกระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาการชุบวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะสองชนิด เพื่อศึกษาว่าค่ากระแสไฟฟ้า มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของชั้นสารตัวอย่าง, เปอร์เซ็นต์ของ Co และ Fe, ค่า pH และขนาดของเกรน

ผลการทดลอง เปอร์เซ็นต์ของ Co, Fe

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Fe} ไปเรื่อยๆ พบว่า %Fe/%Co มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Co} ไปเรื่อยๆ พบว่า %Co/%Fe มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดลอง น้ำหนักชั้นสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Fe} ไปเรื่อยๆ พบว่าวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ติดกับสารตัวอย่างมากขึ้นเรื่อยๆ

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Co} ไปเรื่อยๆ พบว่าวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ติดกับสารตัวอย่างมากขึ้นเรื่อยๆ

ผลการทดลอง ค่า pH

จากรูปที่ 4.7 – 4.13 เมื่อกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Fe} ไปเรื่อยๆ ในช่วงเวลา 0 – 60 นาที ค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากรูปที่ 4.15 – 4.21 เมื่อกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Co} ไปเรื่อยๆ ในช่วงเวลา 0 – 60 นาที ค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ผลการทดลอง ขนาดของเกรน

จากผลการทดลอง ได้แบ่งขนาดของกำลังขยาย 5000 เท่า 10000 เท่า 30000 เท่า และ 50000 เท่า จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Co} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Fe} ไปเรื่อยๆ พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดเล็กลง

จากผลการทดลอง ได้แบ่งขนาดของกำลังขยาย 5000 เท่า 10000 เท่า 30000 เท่า และ 50000 เท่า จะพบว่าเมื่อกำหนดค่า $I_{Fe} = 1.76 \text{ mA}$ และเปลี่ยนค่า I_{Co} ไปเรื่อยๆ พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดเล็กลง

จากผลการทดลองจะพบว่า

1. สามารถสร้างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม ได้ด้วยวิธีการ Electroplating
2. สามารถสร้างองค์ประกอบของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม CoFe ที่มีอัตราส่วนต่างๆ โดยการควบคุมด้วยค่ากระแสไฟฟ้า รวมถึงศึกษาส่วนต่างๆ และผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF และเครื่อง SEM
3. วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์แบบโลหะผสม CoFe ที่สร้าง มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Smith, J. Hashemi. Foundation of Materails Science and Engineering 4th edition. พิมพ์ครั้งที่ 4. England: The McGraw-Hill Companies, Inc. 2008
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช. วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2 : ตัวนำ แม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ ตัวนำยิ่งยวด วัสดุฉนวน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [3] ชัยวัฒน์ กุประตกุล , วิชาวัสดุศาสตร์, วิทยาศาสตร์กับมนุษย์, สำนักพิมพ์สารคดี, กรุงเทพ, 2539, หน้า 217-220.
- [4] Mr.P, เรียนวัสดุศาสตร์ได้...ที่ไหนบ้าง, วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 10, มกราคม-มีนาคม 2541, หน้า 31-33.
- [5] รศ.แม่น อมรสิทธิ์. อาจารย์ขนิษฐา กำวิสัยศักดิ์. วัสดุวิศวกรรม(Foundations of Materials Science and Engineering). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพ, 2550
- [6] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. 2539. วัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สกายบุ๊กส์.
- [7] <http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/magnetic/menuitime.html>
- [8] <http://www.vcharkarn.com/vcafe/47088>
- [9] <http://www.kr.ac.th/tech/det48m2/word5.htm>
- [10] http://siamtechno.blogspot.com/2009/10/blog-post_30.html
- [11] <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/s4410564/PAGE1.htm>
- [12] <http://www.wisegeek.com/what-is-electroplating.htm>
- [13] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=nickel_electroplating
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Electroplating#Current_density
- [15] <http://www.finishing.com/faqs/howworks.html>
- [16] <http://th.wikipedia.org/wiki/PH>
- [17] <http://www.engineerthailand.com/phmeter.html>

ภาคผนวก



ภาพแสดงวงจรการชุบวัสดุสารแม่เหล็กสองชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	I Fe 1.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	A A X X X X	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0380 %	0.0046 %
23	V	Vanadium	< 0.0054 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.0322 %	0.0017 %
25	Mn	Manganese	0.00636 %	0.00093 %
26	Fe	Iron	4.336 %	0.010 %
27	Co	Cobalt	3.400 %	0.009 %
28	Ni	Nickel	< 0.0038 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	90.03 %	0.08 %
30	Zn	Zinc	0.3369 %	0.0088 %
31	Ga	Gallium	0.163 %	0.011 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.1005 %	0.0028 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.010 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0096 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.010 %	(0.0059) %
48	Cd	Cadmium	< 0.011 %	(0.0) %
49	In	Indium	0.0304 %	0.0075 %
50	Sn	Tin	< 0.016 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	0.0167 %	0.0096 %
74	W	Tungsten	0.904 %	0.025 %
78	Pt	Platinum	< 0.029 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.024 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.011 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	I Co 1.76 I Fe 4.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	AAXXXX	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.0071 %	(0.0) %
23	V	Vanadium	< 0.0048 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	< 0.0036 %	(0.0) %
25	Mn	Manganese	0.0274 %	0.0013 %
26	Fe	Iron	13.35 %	0.02 %
27	Co	Cobalt	12.22 %	0.02 %
28	Ni	Nickel	< 0.013 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	53.26 %	0.06 %
30	Zn	Zinc	0.1926 %	0.0076 %
31	Ga	Gallium	0.0186 %	0.0066 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0864 %	0.0017 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0066 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	0.0087 %	0.0044 %
47	Ag	Silver	0.0348 %	0.0055 %
48	Cd	Cadmium	< 0.0094 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.011 %	(0.0023) %
50	Sn	Tin	< 0.013 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	0.0162 %	0.0084 %
74	W	Tungsten	0.349 %	0.021 %
78	Pt	Platinum	< 0.014 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.013 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.0081 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	I Fe 7.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0352 %	0.0052 %
23	V	Vanadium	< 0.0060 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.0267 %	0.0017 %
25	Mn	Manganese	0.0429 %	0.0018 %
26	Fe	Iron	12.43 %	0.02 %
27	Co	Cobalt	10.96 %	0.02 %
28	Ni	Nickel	< 0.015 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	74.96 %	0.07 %
30	Zn	Zinc	0.2789 %	0.0090 %
31	Ga	Gallium	0.0827 %	0.0089 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0755 %	0.0020 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.010 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0092 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	0.0107 %	0.0055 %
48	Cd	Cadmium	< 0.011 %	(0.0031) %
49	In	Indium	< 0.012 %	(0.0092) %
50	Sn	Tin	< 0.015 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.016 %	(0.0077) %
74	W	Tungsten	0.589 %	0.025 %
78	Pt	Platinum	< 0.023 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.010 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preset Sample Data

Sample Name:	I Fe 10.76	Dilution Material:	
Description:		Sample Mass (g):	8.0000
Method:	3069fpo	Dilution Mass (g):	0.0000
Job Number:	04/02/11	Dilution Factor:	1.0000
Sample State:	Alloys, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Legierung	Date of Receipt:	02/04/2011
Sample Status:	A A X X X X	Date of Evaluation:	02/04/2011

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0382 %	0.0056 %
23	V	Vanadium	< 0.0059 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	< 0.0043 %	(0.0) %
25	Mn	Manganese	0.0706 %	0.0022 %
26	Fe	Iron	20.09 %	0.03 %
27	Co	Cobalt	17.55 %	0.02 %
28	Ni	Nickel	< 0.019 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	> 60.98 %	0.06 %
30	Zn	Zinc	0.2504 %	0.0090 %
31	Ga	Gallium	0.0315 %	0.0074 %
40	Zr	Zirconium	< 0.050 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0636 %	0.0016 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0096 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0088 %	(0.0021) %
47	Ag	Silver	0.0097 %	0.0056 %
48	Cd	Cadmium	< 0.011 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.012 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.016 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	0.0178 %	0.0090 %
74	W	Tungsten	0.442 %	0.025 %
78	Pt	Platinum	< 0.018 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.016 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.0092 %	(0.0) %

— Preset Sample Data

Sample Name	I Fe 13.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	A A X X X X	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error	
20	Ca	Calcium	< 0.030	%	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.0087	%	(0.0) %
23	V	Vanadium	< 0.0058	%	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.0210	%	0.0016 %
25	Mn	Manganese	0.0457	%	0.0018 %
26	Fe	Iron	27.42	%	0.03 %
27	Co	Cobalt	24.21	%	0.03 %
28	Ni	Nickel	< 0.022	%	(0.0) %
29	Cu	Copper	46.78	%	0.06 %
30	Zn	Zinc	0.2281	%	0.0090 %
31	Ga	Gallium	< 0.011	%	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051	%	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0552	%	0.0014 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30	%	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0092	%	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0083	%	(0.0047) %
47	Ag	Silver	< 0.0091	%	(0.0068) %
48	Cd	Cadmium	< 0.011	%	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.012	%	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.018	%	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.014	%	(0.011) %
74	W	Tungsten	0.253	%	0.024 %
78	Pt	Platinum	< 0.014	%	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.013	%	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.0094	%	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	I Fe 16.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration		Abs. Error	
20	Ca	Calcium	< 0.030	%	(0.0)	%
22	Ti	Titanium	0.0275	%	0.0054	%
23	V	Vanadium	< 0.0061	%	(0.0)	%
24	Cr	Chromium	0.0351	%	0.0020	%
25	Mn	Manganese	0.0434	%	0.0018	%
26	Fe	Iron	15.97	%	0.02	%
27	Co	Cobalt	15.42	%	0.02	%
28	Ni	Nickel	< 0.017	%	(0.0)	%
29	Cu	Copper	67.10	%	0.07	%
30	Zn	Zinc	0.2434	%	0.0090	%
31	Ga	Gallium	< 0.015	%	(0.0)	%
40	Zr	Zirconium	< 0.051	%	(0.0)	%
41	Nb	Niobium	0.0712	%	0.0018	%
42	Mo	Molybdenum	< 0.30	%	(0.0)	%
45	Rh	Rhodium	< 0.0100	%	(0.0)	%
46	Pd	Palladium	0.0085	%	0.0052	%
47	Ag	Silver	0.0108	%	0.0056	%
48	Cd	Cadmium	< 0.011	%	(0.0)	%
49	In	Indium	< 0.012	%	(0.010)	%
50	Sn	Tin	< 0.016	%	(0.0)	%
51	Sb	Antimony	< 0.015	%	(0.0095)	%
74	W	Tungsten	0.483	%	0.025	%
78	Pt	Platinum	< 0.019	%	(0.0)	%
79	Au	Gold	< 0.017	%	(0.0)	%
82	Pb	Lead	< 0.010	%	(0.0)	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data

Sample Name	I Fe 19.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	04/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/04/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/04/2011

— Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.0086 %	(0.0) %
23	V	Vanadium	< 0.0055 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	< 0.0042 %	(0.0) %
25	Mn	Manganese	0.0938 %	0.0024 %
26	Fe	Iron	36.61 %	0.04 %
27	Co	Cobalt	35.64 %	0.04 %
28	Ni	Nickel	< 0.028 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	26.53 %	0.04 %
30	Zn	Zinc	0.1680 %	0.0079 %
31	Ga	Gallium	< 0.0077 %	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0543 %	0.0013 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0091 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0080 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	0.0165 %	0.0059 %
48	Cd	Cadmium	< 0.010 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.012 %	(0.0038) %
50	Sn	Tin	< 0.014 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.015 %	(0.0061) %
74	W	Tungsten	0.138 %	0.021 %
78	Pt	Platinum	< 0.011 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.011 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.0083 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data

Sample Name	Ico 1.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	AAXXXX	Date of Evaluation	02/03/2011

— Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0439 %	0.0043 %
23	V	Vanadium	< 0.0049 %	(0.0019) %
24	Cr	Chromium	0.0573 %	0.0022 %
25	Mn	Manganese	< 0.0035 %	(0.0) %
26	Fe	Iron	1.303 %	0.006 %
27	Co	Cobalt	1.037 %	0.005 %
28	Ni	Nickel	< 0.0060 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	95.11 %	0.08 %
30	Zn	Zinc	0.3460 %	0.0087 %
31	Ga	Gallium	0.264 %	0.012 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.1116 %	0.0032 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0097 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	0.0099 %	0.0055 %
47	Ag	Silver	< 0.011 %	(0.0024) %
48	Cd	Cadmium	< 0.012 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.014 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.017 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.019 %	(0.0) %
74	W	Tungsten	1.018 %	0.025 %
78	Pt	Platinum	< 0.031 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.025 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.011 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	Ico 4.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/03/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0246 %	0.0040 %
23	V	Vanadium	< 0.0052 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.0629 %	0.0021 %
25	Mn	Manganese	< 0.0040 %	(0.0014) %
26	Fe	Iron	2.282 %	0.007 %
27	Co	Cobalt	1.890 %	0.006 %
28	Ni	Nickel	< 0.0077 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	193.65 %	0.08 %
30	Zn	Zinc	0.3642 %	0.0083 %
31	Ga	Gallium	0.385 %	0.011 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.1428 %	0.0030 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	0.0237 %	0.0019 %
46	Pd	Palladium	0.0695 %	0.0043 %
47	Ag	Silver	0.0179 %	0.0057 %
48	Cd	Cadmium	< 0.015 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.018 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.024 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.026 %	(0.0059) %
74	W	Tungsten	1.079 %	0.023 %
78	Pt	Platinum	< 0.030 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.026 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.012 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	Ico 7.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	AAXXXX	Date of Evaluation	02/03/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0077 %	0.0048 %
23	V	Vanadium	< 0.0057 %	(0.0016) %
24	Cr	Chromium	0.0367 %	0.0019 %
25	Mn	Manganese	0.00519 %	0.00053 %
26	Fe	Iron	10.40 %	0.02 %
27	Co	Cobalt	9.397 %	0.016 %
28	Ni	Nickel	< 0.013 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	78.13 %	0.07 %
30	Zn	Zinc	0.3116 %	0.0092 %
31	Ga	Gallium	< 0.018 %	(0.0082) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0775 %	0.0021 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.010 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.0100 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.011 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	0.0160 %	0.0058 %
49	In	Indium	< 0.016 %	(0.0093) %
50	Sn	Tin	< 0.021 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.025 %	(0.013) %
74	W	Tungsten	0.691 %	0.026 %
78	Pt	Platinum	< 0.024 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.011 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Preset Sample Data

Sample Name	Ico 10.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/03/2011

- Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	0.0157 %	0.0040 %
23	V	Vanadium	< 0.0052 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.01270 %	0.00100 %
25	Mn	Manganese	0.0126 %	0.0014 %
26	Fe	Iron	2.924 %	0.008 %
27	Co	Cobalt	2.474 %	0.007 %
28	Ni	Nickel	< 0.0085 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	92.37 %	0.08 %
30	Zn	Zinc	0.8919 %	0.0088 %
31	Ga	Gallium	0.465 %	0.012 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.1105 %	0.0031 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.012 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	< 0.012 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.013 %	(0.0072) %
48	Cd	Cadmium	< 0.016 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.019 %	(0.0046) %
50	Sn	Tin	< 0.026 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	0.028 %	0.014 %
74	W	Tungsten	1.131 %	0.025 %
78	Pt	Platinum	< 0.038 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.030 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.012 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— Preset Sample Data —

Sample Name	Ico 13.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	AA××××	Date of Evaluation	02/03/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.0089 %	(0.0044) %
23	V	Vanadium	< 0.0060 %	(0.0015) %
24	Cr	Chromium	0.0251 %	0.0017 %
25	Mn	Manganese	0.0435 %	0.0019 %
26	Fe	Iron	13.78 %	0.02 %
27	Co	Cobalt	11.16 %	0.02 %
28	Ni	Nickel	< 0.016 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	73.17 %	0.07 %
30	Zn	Zinc	0.3190 %	0.0096 %
31	Ga	Gallium	0.0606 %	0.0097 %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0806 %	0.0020 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0099 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	0.0129 %	0.0051 %
47	Ag	Silver	< 0.0098 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	< 0.012 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.013 %	(0.0097) %
50	Sn	Tin	< 0.016 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	0.0174 %	0.0096 %
74	W	Tungsten	0.588 %	0.028 %
78	Pt	Platinum	< 0.025 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.023 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.011 %	(0.0) %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preset Sample Data

Sample Name:	Ico 16.76	Dilution Material:	
Description:		Sample Mass (g):	8.0000
Method:	3069fpo	Dilution Mass (g):	0.0000
Job Number:	03/02/11	Dilution Factor:	1.0000
Sample State:	Alloys, 32 mm	Sample rotation:	No
Sample Type:	Legierung	Date of Receipt:	02/03/2011
Sample Status:	A A X X X X	Date of Evaluation:	02/03/2011

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.0078 %	(0.0) %
23	V	Vanadium	< 0.0051 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	0.00740 %	0.00081 %
25	Mn	Manganese	0.0527 %	0.0018 %
26	Fe	Iron	18.10 %	0.02 %
27	Co	Cobalt	14.92 %	0.02 %
28	Ni	Nickel	< 0.016 %	(0.0) %
29	Cu	Copper	50.62 %	0.05 %
30	Zn	Zinc	0.2509 %	0.0084 %
31	Ga	Gallium	0.0197 %	0.0071 %
40	Zr	Zirconium	< 0.050 %	(0.0) %
41	Nb	Niobium	0.0579 %	0.0014 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0074 %	(0.0) %
46	Pd	Palladium	0.0122 %	0.0042 %
47	Ag	Silver	0.0138 %	0.0048 %
48	Cd	Cadmium	< 0.0086 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.0098 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.011 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.013 %	(0.0027) %
74	W	Tungsten	0.359 %	0.024 %
78	Pt	Platinum	< 0.016 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.015 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.0083 %	(0.0) %

— Preset Sample Data —

Sample Name	Ico 19.76	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	03/02/11	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	02/03/2011
Sample Status	A A X X X X	Date of Evaluation	02/03/2011

— Results —

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error	
20	Ca	Calcium	< 0.030	% (0.0)	%
22	Ti	Titanium	< 0.0093	% (0.0034)	%
23	V	Vanadium	< 0.0060	% (0.0)	%
24	Cr	Chromium	< 0.0044	% (0.0013)	%
25	Mn	Manganese	0.0773	% 0.0023	%
26	Fe	Iron	29.43	% 0.04	%
27	Co	Cobalt	25.03	% 0.03	%
28	Ni	Nickel	< 0.024	% (0.0)	%
29	Cu	Copper	43.78	% 0.06	%
30	Zn	Zinc	0.2737	% 0.0096	%
31	Ga	Gallium	< 0.012	% (0.0)	%
40	Zr	Zirconium	< 0.051	% (0.0)	%
41	Nb	Niobium	0.0607	% 0.0015	%
42	Mo	Molybdenum	< 0.30	% (0.0)	%
45	Rh	Rhodium	< 0.0093	% (0.0)	%
46	Pd	Palladium	< 0.0084	% (0.0)	%
47	Ag	Silver	< 0.0092	% (0.0079)	%
48	Cd	Cadmium	< 0.011	% (0.0034)	%
49	In	Indium	< 0.012	% (0.0)	%
50	Sn	Tin	< 0.014	% (0.0)	%
51	Sb	Antimony	< 0.015	% (0.0092)	%
74	W	Tungsten	0.315	% 0.027	%
78	Pt	Platinum	< 0.016	% (0.0)	%
79	Au	Gold	< 0.015	% (0.0)	%
82	Pb	Lead	< 0.0095	% (0.0)	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้