

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์

THE DEVELOPMENT OF ALTERNATING GRADIENT MAGNETOMETER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารศึกษาศาสตร์ที่ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-654-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์

THE DEVELOPMENT OF ALTERNATING GRADIENT MAGNETOMETER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-654-1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 35187
วัน, เดือน, ปี 3 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DEVELOPMENT OF ALTERNATING GRADIENT MAGNETOMETER



SIRIMONGKOL SUTTHISARN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2000

ISBN 974-622-654-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

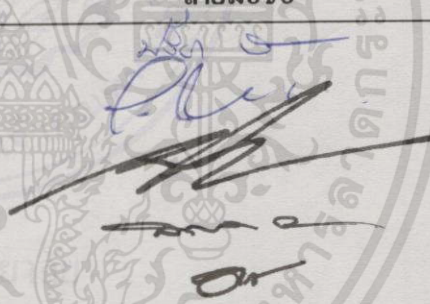
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์
THE DEVELOPMENT OF ALTERNATING GRADIENT
MAGNETOMETER

ชื่อนักศึกษา นายศิริมงคล สุทธิสาร
รหัสประจำตัว 39065001
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สุรพล รักวิชัย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี	
ผศ.วิชิต ศิริโชค	
รศ.สุรพล รักวิชัย	
รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 ธันวาคม 2542 เวลา 14.00 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ. ห้อง 424 ห้องประชุม-สัมมนา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่...24...เดือน...พฤษภาคม...พ.ศ. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบ

อัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์

นักศึกษา

นายศิริมงคล สุทธิสาร

รหัสประจำตัว

39065001

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2543

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.สุรพล รักวิจัย

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ เพื่อใช้ตรวจวัดคุณลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและสารแม่เหล็กเฟอร์รี โดยใช้หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กที่เกิดการสั่น เนื่องจากสนามเกรเดียนท์กระแสลับความถี่ต่ำที่วางซ้อนทับบนสนามแม่เหล็กกระแสตรง ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ เป็นผลทำให้สารแม่เหล็กเกิดการแมกนีโตและมีโมเมนต์แม่เหล็กไม่เป็นศูนย์และเกิดการสั่นขึ้นเนื่องจากแรงที่เกิดจากสนามเกรเดียนท์กระแสลับที่ความถี่ต่ำ โดยที่แอมพลิจูดการสั่นของสารแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงเนื่องจากสนามเกรเดียนท์ และเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็ก ดังนั้นสามารถหาโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กได้ในรูปของกราฟฮิสเตอร์ซิสและค่าตัวแปรที่สำคัญของกราฟฮิสเตอร์ซิสที่วัดได้ ได้แก่ แมกนีโตเซชันคงค้าง (M_r) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) และผลคูณของแมกนีโตเซชันคงค้างกับความหนา ($M_r t$) ของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพงและสารแม่เหล็กฟิล์มบางของฮาร์ดดิสก์ได้ สำหรับเครื่องมือวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสที่พัฒนาขึ้น มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm(0-5)\%$ และความไวโมเมนต์แม่เหล็กอยู่ในช่วง $(10^{-4} - 10)emu$

Thesis Title	The Development of Alternating Gradient Magnetometer
Student	Mr. Sirimongkol Sutthisarn
Student ID.	39065001
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Surapol Rukvichai
Thesis Co.Advisor	Assoc.Prof.Dr.Aree Wichainchai

ABSTRACT

The development of Alternating Gradient Magnetometer is presented. The instrument measured hysteresis curves for magnetic material such as ferri-ferromagnetics. The principle of instrument provides measurements of magnetic moment of a sample oscillating in small probing nonuniform AC magnetic field superimposed on slowly sweeping DC uniform magnetic field which magnetizes the specimen being measured. The specimen with nonzero magnetic moment is moved in field gradient due to the force. For amplitude oscillations in the region of constant gradient the specimen which is proportional to force, will be proportional to magnetic moment. So, we will obtain magnetic moment in curve hysteresis form and we can find the important parameter of hysteresis such as the remanent magnetization (M_r), the retentivity flux density (B_r), and the coercivity fields (H_c) and the remanent magnetization cross thickness ($M_r t$) of loudspeaker magnetic material and magnetic thin film of rigid disk respectively. For the instrument to measure hysteresis loops parameters with $\pm(0-5)\%$ percentage error and emu magnetic moment sensitivity for dynamic range $(10^{-4} - 10)emu$

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. สุรพล รักวิชัย และ รศ. ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากทั้งสองท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Dr.P.Nabokin ผู้เชี่ยวชาญทางด้านแม่เหล็ก ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้า ในการออกแบบเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก และให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการด้วยดีโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัท ชุมิมาจึเนะ(ประเทศไทย)จำกัด และบริษัทซีเกท(ประเทศไทย)จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กที่ใช้ในทดสอบของงานวิจัย และอำนวยความสะดวกด้วยดีโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัท แอดวานซ์ แมกเนติก แมททีเรียล(ประเทศไทย)จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือไวนาบริดจ์แมกนีโตมิเตอร์(VSM)ทดสอบสารตัวอย่าง และอำนวยความสะดวกด้วยดีโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ และยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลืองบประมาณสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้า และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คุณและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิริมงคล สุทธิสาร

สารบัญ

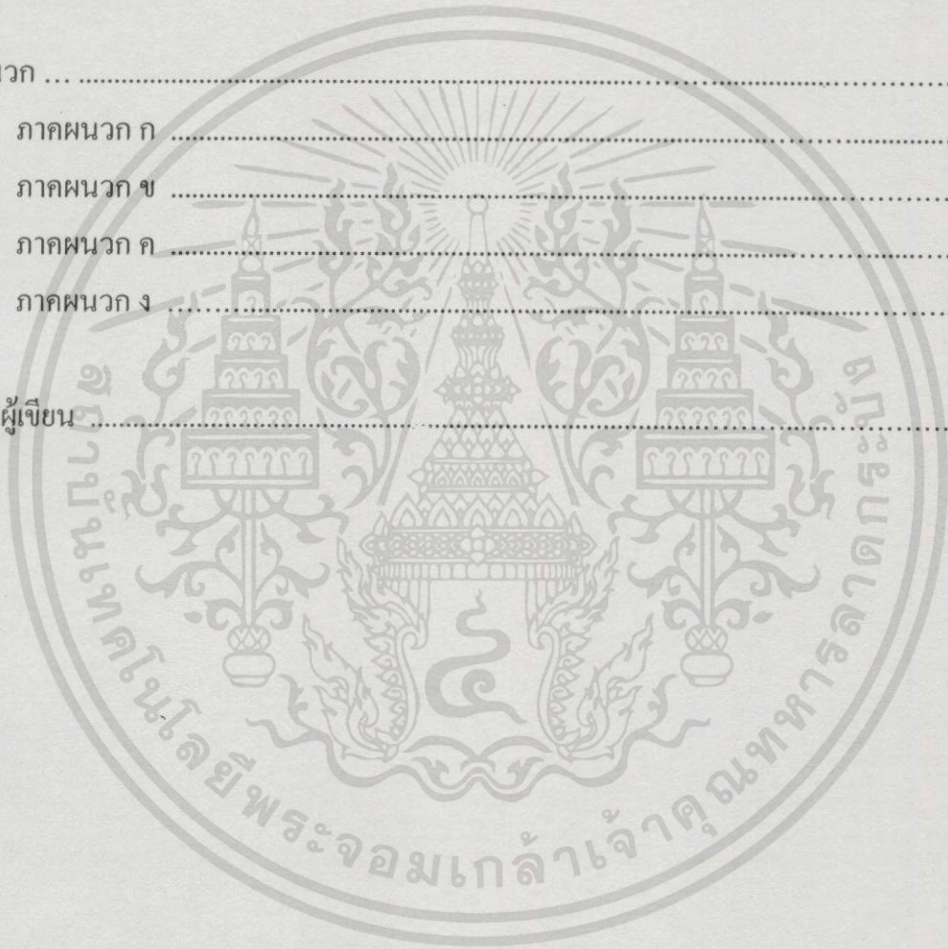
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	IX
รายการสัญลักษณ์	XVIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	8
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	9
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.5 แผนการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์	10
บทที่ 2 สมบัติทางฟิสิกส์ของสารแม่เหล็ก	11
2.1 โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน.....	11
2.2 การแมกนีโตเซชัน.....	13
2.3 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก.....	16
2.4 ซีสเซพติบิลิตี.....	16
2.5 เพอร์มีอะบิลิตี.....	17
2.6 กราฟฮีสเทอรีซิส.....	19
2.7 สารแม่เหล็ก.....	21
บทที่ 3 หลักการและเทคนิคของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์.....	25
3.1 หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์.....	27
3.2 การคำนวณหาโมเมนต์แม่เหล็ก.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสร้างเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์.....	31
4.1 ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	33
4.2 ขดลวดเคอร์เดียนท์	65
4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ	68
4.4 การวัดสัญญาณ X และ Y.....	71
4.5 ส่วนแสดงผลข้อมูล	73
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	75
5.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	78
5.2 ผลการทดลอง.....	78
5.2.1 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #001	79
5.2.2 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #002	80
5.2.3 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #003	82
5.2.4 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #004	83
5.2.5 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #005	85
5.2.6 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #006	86
5.2.7 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #007	88
5.2.8 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #008	89
5.2.9 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #009	91
5.2.10 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #010	92
5.2.11 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้า โฟง #011	94
5.2.12 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1.....	95
5.2.13 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2	97
5.2.14 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3	98
5.2.15 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4	100
5.2.16 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5.....	101

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	103
บรรณานุกรม	113
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก	115
ภาคผนวก ข	120
ภาคผนวก ค	125
ภาคผนวก ง	128
ประวัติผู้เขียน	137



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้ว 5.10 เซนติเมตร.....	40
4.2 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 และ 2 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	42
4.3 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 และ 4 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	44
4.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 และ 6 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	46
4.5 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 และ 8 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	48
4.6 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 และ 10 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	50
4.7 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 11 และ 12 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง.....	52
4.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 และ 2 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	55
4.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 และ 2 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	57
4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 และ 4 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	59
4.11 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 และ 6 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	61
4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 และ 8 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	63
4.13 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 และ 10 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก.....	65
4.14 ความเข้มสนามเกรเดียนท์เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า	67
5.1 ขนาด มวลและความหนาแน่นของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพงที่ใช้ในการทดสอบ	75
5.2 ขนาดและมวลของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	76
5.3 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001.....	79
5.4 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ล้าโพง #001.....	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.5 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #002.....	81
5.6 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #002.....	81
5.7 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #003.....	82
5.8 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #003.....	83
5.9 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #004	84
5.10 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #004.....	84
5.11 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #005	85
5.12 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #005.....	86
5.13 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #006	87
5.14 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #006.....	87
5.15 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #007.....	88
5.16 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #007.....	89
5.17 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #008.....	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #008.....	90
5.19 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #009.....	91
5.20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #007.....	92
5.21 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #010	93
5.22 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #010.....	93
5.23 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง #011.....	94
5.24 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็ก ลำโพง #011.....	95
5.25 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1.....	96
5.26 แมกนีไทเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1.....	96
5.27 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2.....	97
5.28 แมกนีไทเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซีวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2.....	98
5.29 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3.....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.30 แมกนีไตเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3.....	99
5.31 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4.....	100
5.32 แมกนีไตเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2.....	101
5.33 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5.....	102
5.34 แมกนีไตเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5.....	102
6.1 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300.....	104
6.2 แมกนีไตเซชันคงค้างคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM....	105

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	2
1.2	3
1.3	4
1.4	5
1.5	6
1.6	7
2.1	11
2.2	15
2.3	15
2.4	15
2.5 (A) กราฟของสารแม่เหล็กพาราและไดอะ หรือ แอนติเฟอร์โร (B) กราฟของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี	17
2.6 เส้นกราฟ B กับ H ของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและสารแม่เหล็กเฟอร์รี และการเปลี่ยนแปลงเฟอร์มีอับิลิตี μ กับสนาม H	18
2.7 กราฟการแมกนีไตเซชันกับสนามแม่เหล็ก	19
2.8 กราฟแสดงการทำลายอำนาจแม่เหล็กโดยการลดแอมพลิจูด	21
2.9 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กเฟอร์โร	23
2.10 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร	23
2.11 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กเฟอร์รี	24
3.1 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กในสนามสม่ำเสมอ	25
3.2 พฤติกรรมของแท่งแม่เหล็กในสนามเกรเดียนท์	26
3.3 หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กโดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์	27
3.4 สนามเกรเดียนท์ในทิศทางต่างๆ ระหว่างช่องว่างสนามแม่เหล็ก	28
4.1 โครงสร้างเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น	32
4.2 ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 หลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	34
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุทำแกนแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	36
4.5 ขนาดของโยคและแกนแม่เหล็ก.....	36
4.6 ขนาดของโยคที่ได้ออกแบบ (ก) มองด้านบน (ข) มองด้านข้าง.....	38
4.7 ขนาดของแกนแม่เหล็กที่ได้ออกแบบ.....	39
4.8 ขนาดขดลวดและเส้นลวดที่ได้ออกแบบ.....	40
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า ที่ระยะระหว่างขั้ว 5.1 เซนติเมตร.....	41
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 1 A.....	43
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 2 A.....	43
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 3 A.....	45
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 4 A.....	45
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 5 A.....	47
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 6 A.....	47
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 7 A.....	49
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 8 A.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 9 A	51
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 10 A	51
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 11 A	53
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาที ใน 1 ชั่วโมงที่กระแส 12 A	53
4.22 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	56
4.23 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 2 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	56
4.24 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	58
4.25 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 4 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	58
4.26 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	60
4.27 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 6 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	60
4.28 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	62
4.29 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 8 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	62
4.30 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	64

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 10 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ระหว่างจุดกึ่งกลางขั้ว.....	64
4.32 ขนาดขดลวดและเส้นลวดของขดลวดเกรเดียนท์.....	66
4.33 โครงสร้างของชุดขดลวดที่ใช้สร้างสนามเกรเดียนท์.....	66
4.34 ขดลวดจริงที่ใช้สร้างสนามเกรเดียนท์ที่สร้างขึ้น.....	67
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามเกรเดียนท์กับกระแสไฟฟ้า.....	68
4.36 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น PAD70-15L.....	69
4.37 ตัวกำเนิดสัญญาณและความถี่ รุ่น DS345.....	69
4.38 ตัวขยายสัญญาณ รุ่น GM-3900.....	70
4.39 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น PS280.....	70
4.40 ลักษณะของฮอลล์โพรบของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น 3251.....	71
4.41 เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยเกาส์มิเตอร์ รุ่น 3251.....	72
4.42 ลักษณะของฟิล์มปียโซโหมบที่ใช้ในการตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่น.....	72
4.43 ชุดขยายสัญญาณแบบล็อกอิน รุ่น SR 830 DSP.....	73
4.44 ตัวแสดงผลแบบ XY รุ่น 3025.....	73
4.45 เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์ แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ประกอบเข้าเป็นชุดวัด.....	74
5.1 ลักษณะของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพงที่ใช้ในการทดสอบ.....	76
5.2 โครงสร้างภาคตัดขวางของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์.....	77
5.3 ลักษณะของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	77
5.4 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001.....	79
5.5 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #002.....	80
5.6 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #003.....	82
5.7 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #004.....	83
5.8 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #005.....	85
5.9 กราฟฮิสเตอร์ีซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #006.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #007	88
5.11 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #008	89
5.12 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #009	91
5.13 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #010.....	92
5.14 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #011	94
5.15 กราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD #1.....	95
5.16 กราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD #2	97
5.17 กราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD #3.....	98
5.18 กราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD #4	100
5.19 กราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD #5.....	101
6.1 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือ VSM และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER.....	106
6.2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM	106
6.3 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER.....	107
6.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือ VSM และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER.....	107
6.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดได้จาก AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM	108
6.6 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กกล้าโพง ที่วัดได้จาก AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER.....	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7 ความสัมพันธ์ของผลคูณการแมกนีโตเซชันกับความหนา ($M_r t$) ของตัวอย่าง ฮาร์ดดิสก์ที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือ TRDM.....	109
6.8 ความสัมพันธ์ของผลคูณการแมกนีโตเซชันกับความหนา ($M_r t$) ของตัวอย่าง ฮาร์ดดิสก์ที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือ TRDM.....	109
6.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็ก ลำโพงที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเครื่องมือ TRDM และเครื่องมือ KERR.....	110
6.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็ก ลำโพงที่วัดได้จากเครื่องมือAGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ TRDM	110
6.10 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็ก ลำโพงที่วัดได้จากเครื่องมือAGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR.....	111
ผ.ก.1 ชุดเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์.....	116
ผ.ก.2 ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กและแท่นยึดจับชิ้นงาน.....	116
ผ.ก.3 ลักษณะของขั้วแม่เหล็กสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก.....	117
ผ.ก.4 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	117
ผ.ก.5 ตัวตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของสารตัวอย่าง.....	118
ผ.ก.6 ตำแหน่งการวางของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	118
ผ.ก.7 ตำแหน่งการวางของขดลวดเพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์.....	119
ผ.ก.8 ลักษณะ โครงสร้างของขดลวดเพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์.....	119
ผ.ข.1 เครื่องมือ Vibrating Sample Magnetometer(VSM) รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE.....	121
ผ.ข.2 เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI INDUSTRY CO.,LTD.....	122
ผ.ข.3 เครื่องมือ Turbo Rotating Disc Magnetometer(TRDM) ของบริษัทซีเทค(ประเทศไทย) จำกัด.....	123
ผ.ข.4 เครื่องมือวัดกราฟฮีสเทอรีซิสแบบ KERR ที่ทางคณะวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ได้จัดสร้างขึ้น...124	124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ผ.ค.1 หน่วยและการแปลงหน่วยทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ cgs และ mks.....126



รายการสัญลักษณ์

μ	โมเมนต์แม่เหล็ก , เฟอร์มีอะบิลิตี
$\mu_{(orbit)}$	โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส
$\mu_{(spin)}$	โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน
μ_B	บอห์ร์แมกนีตรอน
h	คงที่ของพลังค์
m	มวล, มวลอิเล็กตรอน
c	ความเร็วแสง
e	ประจุอิเล็กตรอน
M	แมกนีโตเซชัน
M_r	แมกนีโตเซชันคงค้ำ
M_s	แมกนีโตเซชันอิมิตัว
v	ปริมาตร, ความเร็ว
p	ความแรงของขั้วแม่เหล็ก
a	พื้นที่หน้าตัดแม่เหล็ก
σ	แมกนีโตเซชันจำเพาะ
B	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
B_r	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้ำ
B_s	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิมิตัว
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
H_c	สนาม โคเออร์ซิวิตี
κ	ซัลเซพทิบิลิตี
χ	Mass susceptibility
χ_A	Atomic susceptibility
χ_M	Molecular susceptibility
F	แรงเนื่องจากสนามเกรเดียนท์
i	กระแสไฟฟ้า
N	จำนวนรอบของขดลวด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

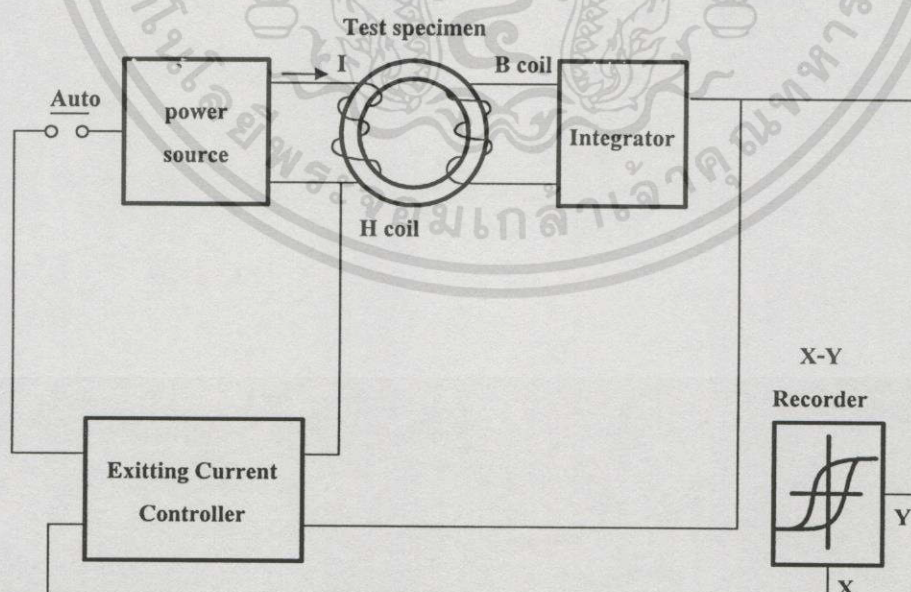
ในการศึกษาและวิจัยทางด้านคุณลักษณะสมบัติของสารแม่เหล็ก เครื่องมือวัดคุณลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กจึงเป็นองค์ประกอบหลักและมีความสำคัญ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาคุณลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของสารแม่เหล็ก และคุณลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กนั้นอาจพิจารณาได้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสารแม่เหล็กที่ต้องการวัด อาทิเช่น ถ้าเป็นสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) และสารแม่เหล็กพารา(paramagnetic) จะพิจารณาคูสมบัติทางแม่เหล็กในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน(Magnetization): M กับสนามแม่เหล็ก(Magnetic field): H ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ซัสเซพติบิลิตี(Susceptibility) และเครื่องมือวัดซัสเซพติบิลิตีของสารแม่เหล็กนั้น ทางห้องวิจัยวัสดุแม่เหล็กของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่เครื่องมือวัดซัสเซพติบิลิตีนั้นยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถนำมาใช้วัดคุณลักษณะสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โร(ferromagnetic) และสารแม่เหล็กเฟอร์ริ(ferrimagnetic)ได้ เพราะว่าแมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รินั้นจะเป็นฟังก์ชันกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็กเหมือนกับสารแม่เหล็กไดอะและพารา ดังนั้น จึงพิจารณาคูสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ ในลักษณะของกราฟแมกนีไทเซชันหรือกราฟฮีสเทอรีซิสของสารแม่เหล็ก ซึ่งสารแม่เหล็กที่ต่างชนิดกันก็จะมีค่าตัวแปรของกราฟฮีสเทอรีซิสที่แตกต่างกันไป โดยส่วนใหญ่แล้วสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริเป็นสารที่มีความสำคัญ และมีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้หาคุณลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กของกลุ่มดังกล่าวจึงมีความสำคัญ แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างและการพัฒนาเครื่องมือวัดกราฟฮีสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กนั้น ยังไม่แพร่หลายและมีราคาแพงจึงทำให้การพัฒนาทางวัสดุแม่เหล็กมีอุปสรรค ทางคณะผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือวัดกราฟฮีสเทอรีซิส จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ขึ้น เพื่อเป็นการวางรากฐานการฝึกทักษะงานด้านการสร้างและการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดลักษณะสมบัติของสารในด้านต่างๆต่อไป

โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีเทคนิคในการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสที่แตกต่างกัน และมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ในที่นี้ทางคณะผู้วิจัยขอยกตัวอย่างเครื่องมือหรืออุปกรณ์และเทคนิคต่างๆ ในการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสรวมไปถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์แต่ละชนิดพอสังเขป ดังต่อไปนี้

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบวงแหวน

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบวงแหวน(Ring test) เป็นการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎฟาราเดย์ แสดงดังรูปที่ 1 หลักการของเครื่องมือนี้จะเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาไปยังขดลวดปฐมภูมิที่พันอยู่กับสารแม่เหล็กรูปวงแหวน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก H ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทางด้านขดลวดปฐมภูมิ และเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) ; emf ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เองจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก(Magnetic flux density); B และนำไปแสดงผลทางด้านแกน Y ของตัวแสดงผล XY (X-Y recorder) และความเข้มสนามแม่เหล็ก H ที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ และนำไปแสดงผลทางด้านแกน X ของตัวแสดงผล XY

ข้อดีของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบวงแหวน คือ เป็นวิธีที่ง่าย และมีความแม่นยำ ข้อเสียสารแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบต้องมีลักษณะเป็นรูปวงแหวน ไม่สามารถวัดสารแม่เหล็กจำพวกแท่งแม่เหล็กหรือฮาร์ดดิสก์ได้และใช้เวลาค่อนข้างนานในการทดสอบแต่ละครั้ง



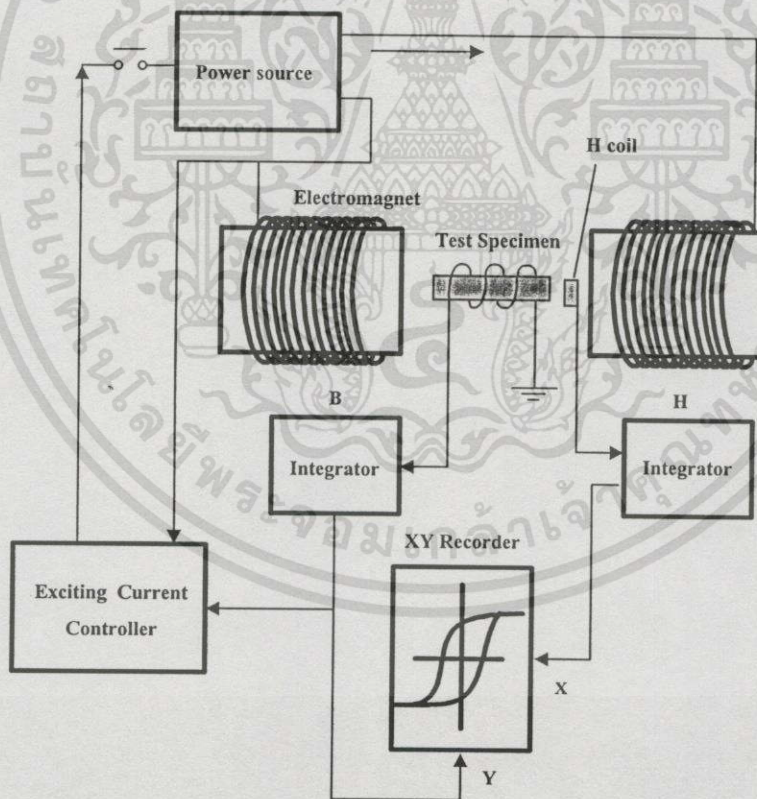
รูปที่ 1.1 ผังองค์ประกอบส่วนต่างๆของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบเพอร์มีอะมิเตอร์

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริที่มีลักษณะที่เป็นแท่งยาวเรียวยาวจัดเป็นผังของเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งลักษณะของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบเพอร์มีอะมิเตอร์ (Permeameter test) โดยปกติแล้วความเข้มสนามแม่เหล็ก H ไม่ได้วัดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดของโยค แต่ในกรณีนี้ความเข้มสนามแม่เหล็ก H วัดได้จากการเหนี่ยวนำในขดลวด (H -coil) หรือขดลวดโพรบที่วางอยู่ใกล้ๆ สารแม่เหล็กและผ่านตัว H Integrator และนำไปแสดงผลทางแกน X ของตัวแสดงผล XY ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการวัดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B โดยผ่าน B Integrator และนำไปแสดงผลทางแกน Y ของตัวแสดงผล XY

ข้อดีของเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบเพอร์มีอะมิเตอร์ คือ เป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก แต่ก็มีข้อเสียคือ สารแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบต้องมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งยาวและใช้เวลานานในการทดสอบแต่ละครั้ง

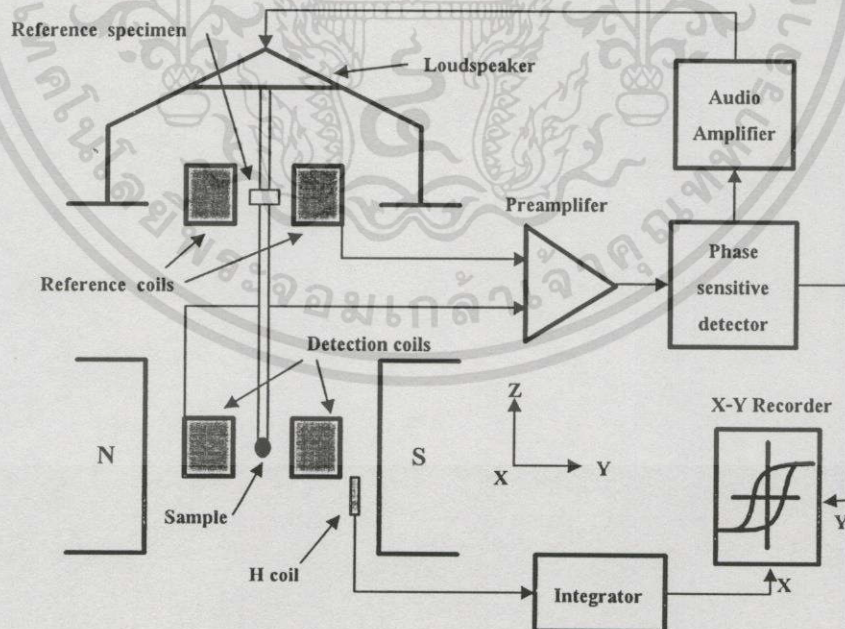


รูปที่ 1.2 ผังองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบเพอร์มีอะมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบไวเบรติงแซมเปิลแมกนีโตมิเตอร์(VSM)

วิธีนี้ได้พัฒนาโดย Foner (1959) โดยมีพื้นฐานมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวด เมื่อสารแม่เหล็กเกิดการสั่นไถ่ ๆ ขดลวดตรวจวัด(search coil) สารแม่เหล็กมีขนาดเล็กที่ยึดติดกับปลายของแท่งยึดจับชิ้นงาน และปลายอีกด้านหนึ่งจะยึดอยู่กับลำโพงแสดงดังรูปที่ 1.3 เมื่อให้กระแสสลับความถี่ต่ำผ่านลำโพงจะทำให้แท่งยึดจับชิ้นงานสั่นในทิศที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก H เพิ่มขึ้นและลดลงจะทำให้สารแม่เหล็กเกิดการแมกนีไตและการสั่น สารแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า $emf(AC)$ ในขดลวดตรวจวัด และการสั่นของแท่งยึดจับชิ้นงานก็จะเกิดขึ้นในรูปของแม่เหล็กถาวรน้อยๆบริเวณปลายด้านบนของแท่งจับชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดอ้างอิง(Reference coil) เช่นกัน โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากขดลวดทั้งสองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน และความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็จะแปรผันตรงกับ โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็ก และสัญญาณจะถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดที่ไวต่อเฟส(Phase Sensitive Detector)ของตัวขยายแบบล็อกอิน(Lock-in Amplifier) และนำไปแสดงผลทางด้านแกน Y ของตัวแสดงผล XY ความเข้มสนามแม่เหล็ก H จะวัดได้จากการเหนี่ยวนำในขดลวด ($H - coil$) หรือฮอลล์ โพรบที่วางอยู่ใกล้ๆสารแม่เหล็ก โดยผ่าน H Integrator และนำไปแสดงผลทางด้านแกน X ของตัวแสดงผล XY เป็นกราฟฮีสเตอร์ซิส



รูปที่ 1.3 ผังส่วนประกอบต่างๆ ของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสแบบไวเบรติงแซมเปิลแมกนีโตมิเตอร์

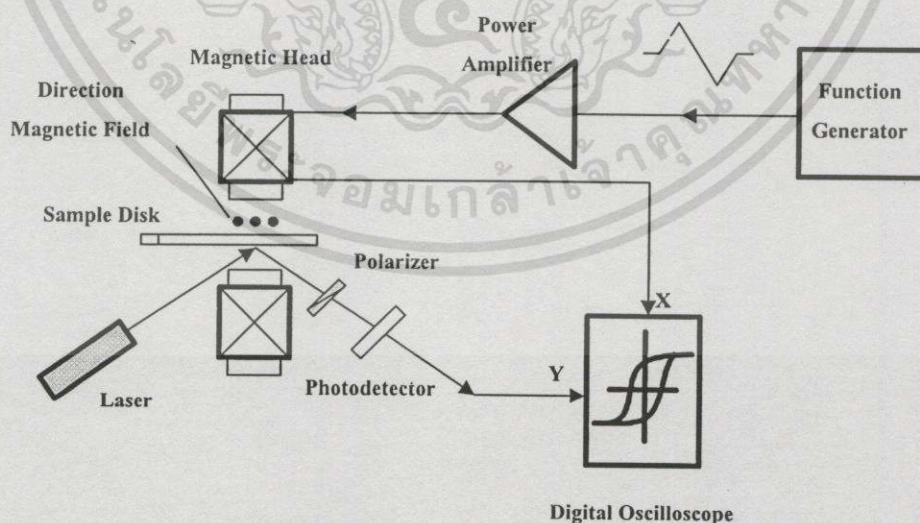
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของเครื่องมือ VSM คือ ความไวและความแม่นยำในการวัดสูง แต่ก็มีข้อเสีย คือ มีราคาแพง

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร(KERR)

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์รเป็นการใช้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างแสงโพลาไรซ์กับสารแม่เหล็กที่วางในสนามแม่เหล็ก อันตรกิริยาที่ไม่เกิดขึ้นโดยตรงสนามแม่เหล็กกับแสง แต่เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อสารแม่เหล็กในการปลดปล่อยหรือดูดกลืนแสง โดยเป็นการวัดอัตราความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็ก แสดงผ้งขององค์ประกอบส่วนต่างๆดังรูปที่ 1.4 ซึ่งจะประกอบด้วยแสงเลเซอร์ชนิดโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นตกกระทบบนตัวอย่างที่ถูกแมกนีไทซ์ที่วางระหว่างหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก แสงจะสะท้อนผ่านโพลาไรเซอร์ (Polarizer) และตรวจวัดความเข้มแสงโดยโฟโตดีเทคเตอร์(Photodetector) สัญญาณจากตัวโฟโตดีเทคเตอร์จะแปรผันตรงกับแมกนีไทเซชันของสารตัวอย่าง และแสดงผลทางด้านแกน Y ของตัวออสซิลโคป และความเข้มสนามแม่เหล็ก H ที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในหัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก และถูกนำไปแสดงผลทางด้านแกน X ของตัวออสซิลโคป

ข้อดีของวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร คือเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว ข้อเสีย คือ สารแม่เหล็กที่ใช้ทดสอบผิวต้องเรียบและสะท้อนแสงเท่านั้น เช่น วัสดุสารแม่เหล็กที่ใช้ทำฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.4 ผังองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยเครื่องมือเทอร์โบโรเตติงดิสก์แมกนีโตมิเตอร์(TRDM)

เครื่องมือเทอร์โบโรเตติงดิสก์แมกนีโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 1.5 โดยอาศัยหลักการสร้างและทำลายอำนาจแม่เหล็ก(Magnetized and Demagnetized) ลงทีละน้อยๆ บนแผ่นฮาร์ดดิสก์ การสร้าง Magnetized จากหัวเขียน(Write head) และความเป็นแม่เหล็กจะถูกตรวจวัดโดยหัวอ่าน(Read Head) และจะแสดงผลในรูปของผลคูณระหว่างแมกนีโตเซชันกับความหนา(M, t) ส่วนสนามแม่เหล็ก H ถูกตรวจวัดโดยใช้ Hall Sensor องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ TRDM มี 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่หนึ่ง คือ X Stage ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อให้สนามทำลายอำนาจแม่เหล็ก Hall sensor ใช้ในการวัดสนามโคเออร์ซิวิตี H_c และตัววัดระยะขจัด ส่วนที่สอง คือ Y Stage ประกอบด้วยหัวเขียน ส่วนที่สาม คือ Z Stage ประกอบด้วยหัวอ่าน และตัววัดระยะขจัด

ข้อดีของเครื่องมือ TRDM คือ สะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย คือ เป็นเครื่องมือที่ทำขึ้นมาเพื่อวัดสารแม่เหล็กฟิล์มบางบนฮาร์ดดิสโดยเฉพาะทำให้วัดสารแม่เหล็กที่แตกต่างจากฮาร์ดดิสก์ได้ลำบาก

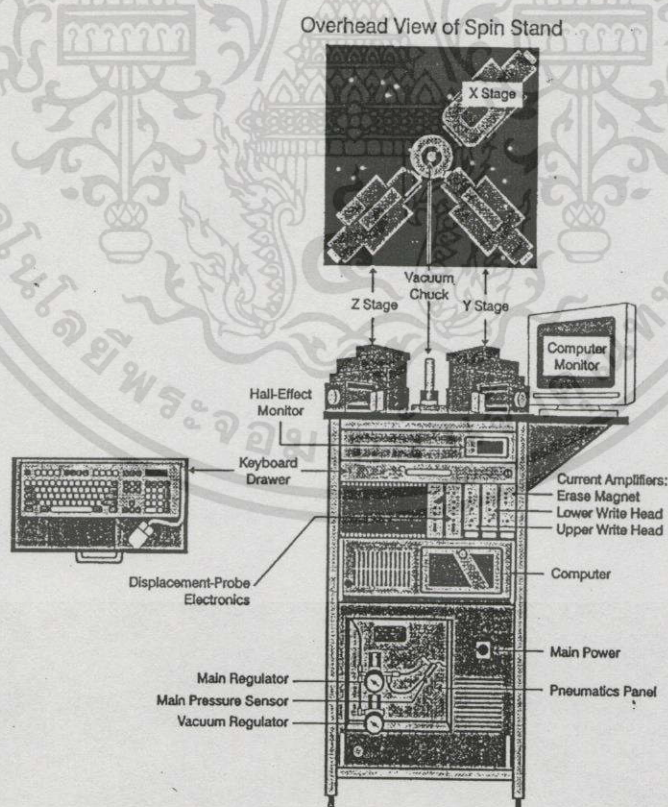


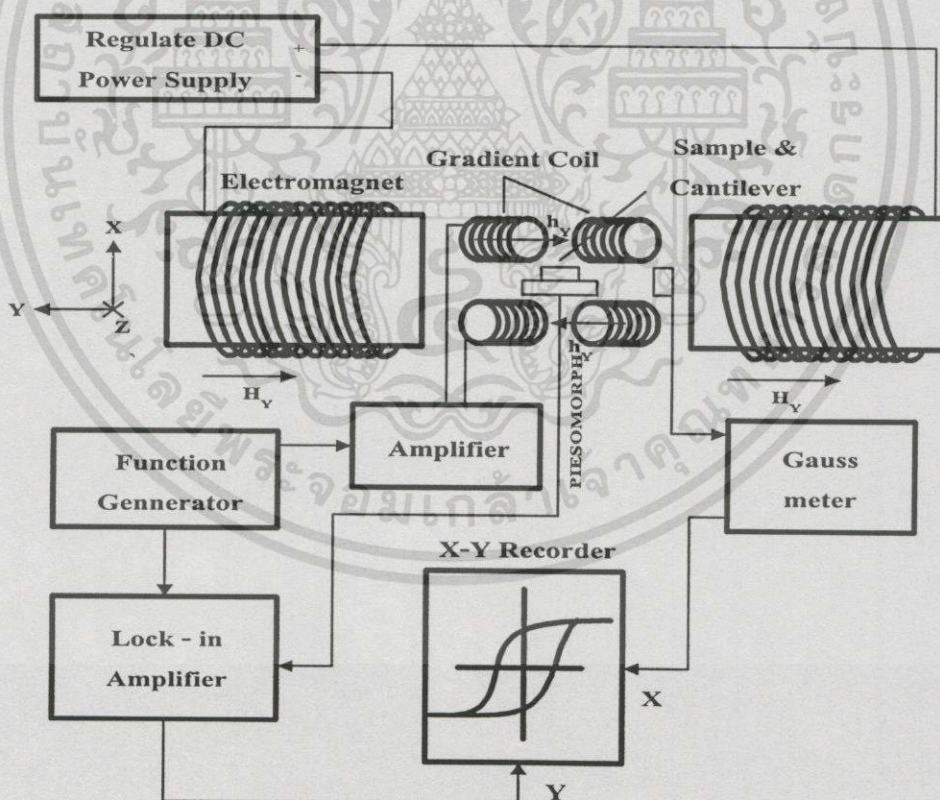
Figure 1-1. Front View of the TRDM'

รูปที่ 1.5 ฟังก์ชันประกอบส่วนต่างๆของเครื่องมือเทอร์โบโรเตติงแมกนีโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์

เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์เป็นเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้น โดยหลักการของเครื่องมือจะเป็นวัด โมเมนต์แม่เหล็ก โดยตรงในรูปของกราฟแมกนีโตเซชันหรือกราฟฮีสเตอร์ซิสที่มีความแม่นยำและมีความไวสูง สารแม่เหล็กที่วัดมีขนาดเล็ก สะดวกและวัดได้กับสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รีได้ทุกชนิด สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบสารแม่เหล็กในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตสารแม่เหล็กได้ และเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์นี้พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นวางรากฐานการฝึกทักษะงานด้านการสร้างและพัฒนาเครื่องวัดวัดลักษณะคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก รวมไปถึงเป็นการรองรับการพัฒนาประเทศที่มีการเจริญเติบโตในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุแม่เหล็กต่อไป ขณะผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญของเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสนี้ และได้พัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่มีความไวโมเมนต์แม่เหล็กอยู่ในช่วง $(10^{-4} - 10) \text{ emu}$ นี้ขึ้น



รูปที่ 1.6 ผังองค์ประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่ได้พัฒนาขึ้น แสดง ดังรูปที่ 1.6 โดยที่สารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กยึดติดบนปลายของแท่นยึดจับชิ้นงาน(Cantilever) วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กกระแสตรง และมีตัวกำเนิดไฟฟ้ากระแส สลับให้กับขดลวดเคอร์เดียนท์ เพื่อสร้างสนามเคอร์เดียนท์กระแสสลับความถี่ต่ำกระทำกับสารแม่ เหล็ก ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้า ๆ ทำให้ สารแม่เหล็กมีโมเมนต์แม่เหล็กไม่เป็นศูนย์เคลื่อนที่ในสนามเคอร์เดียนท์กระแสสลับ และเกิดการสั่น ด้วยความถี่ต่ำเช่นกันเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นจากสนามเคอร์เดียนท์ โดยที่แอมพลิจูดการสั่นของสารแม่ เหล็กจะแปรผันตรงกับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามเคอร์เดียนท์และโมเมนต์แม่เหล็ก และสามารถวัด แอมพลิจูดการสั่นของสารแม่เหล็กโดยใช้ฟิล์มปิโซโหมบ(Piezomorph film) ที่ประกบติดกับแท่น ยึดจับชิ้นงาน และสัญญาณที่วัดได้จะผ่านตัวตรวจวัดที่ไวต่อเฟสของตัวขยายแบบล็อกอิน และนำ ไปผลทางด้านแกน Y ของตัวแสดงผล XY และความเข้มสนามแม่เหล็กจะถูกวัดโดยเกาส์มิเตอร์ (Gauss meter) และนำไปแสดงผลทางด้านแกน X ของตัวบันทึก XY ทำให้ได้กราฟฮีสเตอร์ซิส ซึ่

ในการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กในแต่และวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็มี ข้อดีข้อเสียแตกต่างกันในลักษณะของการใช้งาน จะเห็นได้ว่าในอุตสาหกรรมก็มีเครื่องมือวัดกราฟ ฮีสเตอร์ซิสทุกแบบที่กล่าวมาข้างต้น แต่ในจำนวนเครื่องมือทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเครื่องมือแมก นีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ จะมีความแม่นยำและความไวสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรวัด กราฟฮีสเตอร์ซิสแบบอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญอยู่ 4 ประการ คือ

1. เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสาร โดยใช้หลักการของเทคนิคอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์
2. เพื่อสนับสนุนการวิจัยสาขาวัสดุศาสตร์ทางแม่เหล็ก
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กต่างๆ โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้น
4. เพื่อเป็นการฝึกทักษะงานด้านสร้างและพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดลักษณะสมบัติของ สารแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการประยุกต์ทางฟิสิกส์ของคณะผู้วิจัย

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

กราฟฮิสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กเป็นกราฟที่ใช้แสดงคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โร และเฟอร์ริ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่นำมาใช้งานกันมากในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยพัฒนาเครื่องมือวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสขึ้น โดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ขึ้น โดยอาศัยหลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็ก จากแรงปฏิกิริยาระหว่างสนามเกรเดียนท์กระแสสลับกระทำกับสารแม่เหล็กที่วางซ้อนทับอยู่ใน สนามแม่เหล็กที่มีการเพิ่มลดขึ้นลงอย่างช้าๆ โดยทำให้สารแม่เหล็กมีโมเมนต์แม่เหล็กไม่เป็นศูนย์ เคลื่อนที่เนื่องจากแรงของสนามเกรเดียนท์กระแสสลับและเกิดการสั่นที่ความถี่เดียวกัน โดยที่ แอมพลิจูดของการสั่นจะเป็นสัดส่วนกับแรงเนื่องจากสนามเกรเดียนท์และโมเมนต์แม่เหล็ก ดังนั้น จึงสามารถหาโมเมนต์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กได้ และแสดงผลในรูปของกราฟ ฮิสเตอร์ซิส

1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาในระดับเบื้องต้นในการวัดสร้างและพัฒนาเครื่อง กราฟฮิสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็ก โดยได้มีการออกแบบพัฒนาเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก สม่าเสมอที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก H สูงสุดประมาณ 7 kOe ในช่องระหว่างขั้วแม่เหล็กขนาด 5.1 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางขั้วแม่เหล็กขนาด 10.2 เซนติเมตร โดยให้กระแสประมาณ 12 แอมแปร์จากแหล่งกำเนิดกระแสตรงและออกแบบสนามเกรเดียนท์กระแสสลับให้เพียงพอต่อการ ใช้งานในการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็ก เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถ วัดกราฟฮิสเตอร์ซิสได้กับสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ โดยในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ ตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพงจากบริษัทซูมิมาจึเนะ(ประเทศไทย)จำกัด และชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ จากบริษัทซีเทค(ประเทศไทย)จำกัด และทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง เช่น โมเมนต์แม่เหล็ก แมกนีโตเซชัน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก และสนามโคเอซิวิตี เพื่อหาความ ความถูกต้อง ความแม่นยำในการวัดแล้วทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงแมกนีโตมิเตอร์ที่ดีกว่านี้จำเป็นต้องได้รับการ พัฒนาเพิ่มเติมต่อไป

1.5 วิธีดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์ แผนการดำเนินการแบ่งขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ศึกษาข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็ก โดยศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง หลักการออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและส่วนประกอบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2. ออกแบบและสร้าง เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วย โยค แกนแม่เหล็ก ขดลวด และอุปกรณ์อื่นๆ

ขั้นตอนที่ 3. ทำการตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนที่ 4. ติดตั้งระบบและทดสอบการใช้งาน ทำการติดตั้งระบบให้สมบูรณ์ และทดสอบการใช้งาน ดูว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่อย่างไร

ขั้นตอนที่ 5. ทำวัดทดลองวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กเทียบสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบที่ทราบอยู่แล้ว แล้วทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้จากการทดลองกับที่วัดได้จากเครื่องมือที่น่าเชื่อถือที่มีอยู่ในงานอุตสาหกรรม เพื่อดูว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นได้มาตรฐานและสามารถใช้งานได้

ขั้นตอนที่ 6. ปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่พบ

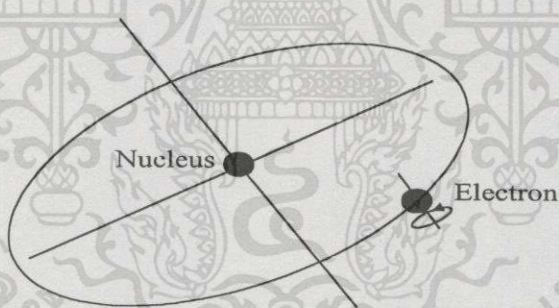
ขั้นตอนที่ 7. สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

สมบัติทางฟิสิกส์ของสารแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วในอะตอมหนึ่งของสารแต่ละชนิดจะประกอบด้วยนิวเคลียสเป็นจุดศูนย์กลางที่ถูกล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนโคจรเป็นวงกลมรีหลายๆวงโคจรรอบนิวเคลียส ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะมีการหมุนรอบตัวเองด้วย อิเล็กตรอนทั้งหลายแต่ละวงโคจรเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสก็คล้ายกับกระแสที่ไหลในวงจรรูปคั่นเอง เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำทิศทางของสนามแม่เหล็กอันเกิดจากอิเล็กตรอนใดๆที่โคจรตามวงโคจรของอิเล็กตรอนเกิดเคลื่อนย้ายตามกันไป ในแนวทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่อาจมีอยู่ทั่วไปในบริเวณนั้น ผลบวกทางพีชคณิตของสนามแม่เหล็กทั้งหมด ณ บริเวณนั้นขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรอบๆนิวเคลียสย่อมเกิดกำลังบิดและเกิดไดโพลโมเมนต์ของสนามแม่เหล็กหรือเรียกย่อๆว่า “ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก” หรือ “โมเมนต์แม่เหล็ก”

2.1 โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเองและการโคจรรอบนิวเคลียสของสาร

จากโครงสร้างของอะตอมที่ประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลางและมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในชั้นต่างๆล้อมรอบนิวเคลียส ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็ก(Magnetic moment) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีสองแบบด้วยกัน คือการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบนิวเคลียส(Orbital) และการหมุนรอบตัวเอง(Spin)แสดงดังรูปที่ 2.1 ในการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสนั้นก็เหมือนกับการไหลของกระแสในวงจรรูปคั่นของลวดที่ไม่มีความต้านทาน ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส อาจจะสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับสมการของการไหลกระแสในวงปิดของขดลวดได้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu = \frac{\pi R^2 i}{10} = \frac{A i}{10} \text{ ergs / Oe} \quad (2.1)$$

กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้า i ไหลผ่านตัวนำที่มีพื้นที่วงปิด A ในหนึ่งหน่วยตารางเซนติเมตร จะนิยามโมเมนต์แม่เหล็กเป็นผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่วงปิดในหน่วย emu

$$\mu = (\text{area.of.loop})(\text{current.in.emu}) \quad (2.2)$$

ดังนั้น สามารถหาโมเมนต์แม่เหล็กของการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสได้ คือ ต้องรู้ของขนาดรูปร่างของวงโคจรและความเร็วในโคจรของอิเล็กตรอนนั่นเอง และจากทฤษฎีของบอร์(Bohr Theory) ทำให้รู้ว่าอิเล็กตรอนในอะตอมเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v วงโคจรมีรัศมี r และถ้า e เป็นประจุของอิเล็กตรอนในหน่วย emu และ c เป็นความเร็วแสง ดังนั้น e/c เป็นประจุในหน่วย emu กระแสหรือประจุที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยเวลา คือ

$$i = \left(\frac{e}{c} \right) \left(\frac{v}{2\pi r} \right) \quad (2.3)$$

ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กของการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจะได้เป็น

$$\mu_{(orbit)} = \pi r^2 \left(\frac{ev}{2\pi rc} \right) = \frac{evr}{2c} \quad (2.4)$$

และจากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม เป็นที่ยอมรับกันว่า โมเมนต์เชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสมีขนาดเป็นเท่ากับจำนวนเท่าของ $h/2\pi$ โดยที่ h เป็นค่าคงที่ของพลังค์(Planck's constant) ดังนั้น

$$mvr = nh/2\pi \quad (2.5)$$

จากสมการที่(2.4)จะได้ว่า

$$\mu_{(orbit)} = \frac{eh}{4\pi mc} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นโมเมนต์แม่เหล็ก เนื่องจากการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนที่วงโคจรแรกของบอร์ ($n = 1$)

การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนเป็นคุณสมบัติที่เกิดกับอิเล็กตรอนได้ทุกๆสถานะและทุกๆอุณหภูมิของสาร กล่าวคืออิเล็กตรอนจะหมุนรอบตัวเองไปพร้อมๆ กับโคจรรอบนิวเคลียส และจากทฤษฎีและการทดลองพบว่าโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน มีเท่ากับ

$$\begin{aligned}\mu_{(spin)} &= \frac{eh}{4\pi mc} & (2.7) \\ &= \frac{(4.80 \times 10^{-10} \text{ esu})(6.62 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{sec})}{4\pi(9.11 \times 10^{-28} \text{ g})(3.00 \times 10^{10} \text{ cm/sec})} \\ &= 0.927 \times 10^{-20} \text{ erg/Oe}\end{aligned}$$

ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน $\mu_{(spin)}$ และโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนในวงโคจรแรกของบอร์ $\mu_{(obital)}$ เป็นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้กำหนดเป็นพื้นฐานของโมเมนต์แม่เหล็กไว้ในรูปของ μ_B เรียกว่า บอร์แมกนีตรอน(Bohr magnetron)

$$\mu_B = \text{Bohr magnetron} = \frac{eh}{4\pi mc} = 0.927 \times 10^{-20} \text{ erg/Oe} \quad (2.8)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีเท่ากับ $4.80 \times 10^{-10} \text{ esu}$

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีเท่ากับ $6.62 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{sec}$

m คือ มวลอิเล็กตรอน มีเท่ากับ $9.11 \times 10^{-28} \text{ g}$

c คือ ความเร็วแสง มีเท่ากับ $3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$

2.2 การแมกนีไทเซชัน

เมื่อพิจารณาปริมาตรของสารแม่เหล็กที่ประกอบด้วยอะตอมหลายล้านอะตอม ในอะตอมหนึ่งๆจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากที่มีการสปินรอบแกน และการเคลื่อนที่ที่เป็นวงโคจร โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แต่ละแบบจะเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกับแกนสปินและตั้งฉากกับระนาบของวงโคจรตามลำดับ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมก็คือผลรวมแบบเวกเตอร์ทั้งหมดของโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากประจุไฟฟ้าทั้งหมด และสิ่งที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ ถ้าโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนทั้งหมดในกรณีที่มีการวางตัวของโมเมนต์เกิดการหักล้างกันหมดซึ่งจะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กจากอิเล็กตรอนเหลืออยู่ ซึ่งเป็นเงื่อนไขของสารแม่เหล็กไดอะแมกเนติก ถ้าการหักล้างกันของโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากประจุเกิดขึ้นบางส่วนทำให้อะตอมมีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ เนื่องจากสารประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากที่มีสมบัติอย่างนี้ ซึ่งแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กพารา , แอนติเฟอร์โร , เฟอร์โรและเฟอร์ริ และคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ ก็คือ การเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้สารแม่เหล็กแสดงความเป็นแม่เหล็ก ในเทอมของแมกนีไทเซชันหรือโมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร

$$M = \frac{\mu}{v} \text{ emu/cm}^3 \quad (2.9)$$

โดยที่ v เป็นปริมาตร และ μ เป็นโมเมนต์แม่เหล็ก และอาจเขียนได้ในรูป

$$M = \frac{pl}{v} = \frac{p}{v/l} = \frac{p}{a} \text{ emu/cm}^3 \quad (2.10)$$

โดยที่ a คือ พื้นที่หน้าตัดของสารแม่เหล็ก อีกนัยหนึ่งอาจนิยาม แมกนีไทเซชัน M คือ ความแรงของขั้วต่อ 1 หน่วยพื้นที่ และหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็ก μ คือ ergs/Oe และหน่วยของแมกนีไทเซชัน M คือ ergs/Oe-cm^3 อย่างไรก็ตาม นิยมเขียนในรูปอย่างง่าย คือ emu/cm^3 โดยที่ emu ย่อมาจาก *electromagnetic unit* หมายถึง หนึ่งหน่วยแม่เหล็กไฟฟ้าของโมเมนต์แม่เหล็ก

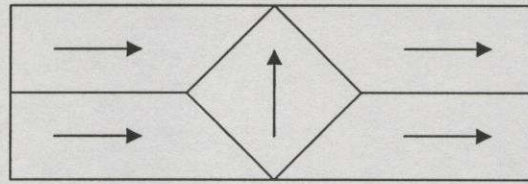
และในบางครั้งจะพิจารณาโมเมนต์แม่เหล็กต่อมวลแทนด้วยการบอกในรูปโมเมนต์แม่เหล็กต่อปริมาตรและจะเรียกว่า แมกนีไทเซชันจำเพาะ (specific magnetization); σ คือ

$$\sigma = \frac{\mu}{m} = \frac{\mu}{v\rho} = \frac{M}{\rho} \text{ emu/g} \quad (2.11)$$

โดยที่ m คือมวล และ ρ คือความหนาแน่น

โดยปกติแล้วสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริจะประกอบด้วยบริเวณที่รวมการแมกนีไทเซชันโดยตามธรรมชาติอยู่แล้วเรียกว่า โดเมน (Domain) แต่ละโดเมนประกอบด้วยโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอม แต่ละโดเมนก็เปรียบเสมือนแม่เหล็กเล็ก ๆ ในสถานะที่สารแม่เหล็กไม่มีการแมกนีไทเซชัน

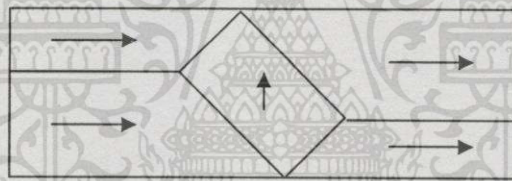
จะประกอบด้วยโดเมนที่หมุนไปตามทิศทางต่างๆดังรูปที่ 2.2 ผลลัพธ์ของการแมกนีไตต์ทั้งหมดจะมีค่าเป็นศูนย์



$$H = 0$$

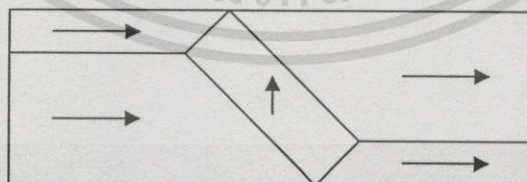
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงของโดเมนสารแม่เหล็กเมื่อไม่มีการแมกนีไตต์

การแมกนีไตต์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H} กับสารแม่เหล็กจะทำให้เกิดการขยายของโดเมนให้หมุนไปในทิศทางของสนาม \vec{H} ซึ่งทำให้ขยายไปทับโดเมนส่วนอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.3 และเมื่อมีการให้สนามภายนอกเพิ่มขึ้นการขยายตัวของโดเมนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กและมีทิศทางการแมกนีไตต์มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.4



$$H$$

รูปที่ 2.3 การจัดเรียงของโดเมนสารแม่เหล็กเมื่อมีการแมกนีไตต์



$$H$$

รูปที่ 2.4 การจัดเรียงของโดเมนสารแม่เหล็กเมื่อมีแมกนีไตต์มากขึ้น

2.3 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

เมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก H และแมกนีโตเซชัน M ของสารแม่เหล็กอาจแสดงความเป็นแม่เหล็กของสารได้ ในเทอมของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก(Magnetic flux density) ; B ได้ คือ

$$B = H + 4\pi M(\text{Gauss}) \quad (2.13)$$

โดยที่ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกมีหน่วยเป็นเอสเตทส์(Oe)และแมกนีโตเซชัน M คือ โมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารแม่เหล็กมีหน่วยเป็น(emu / cm^3)

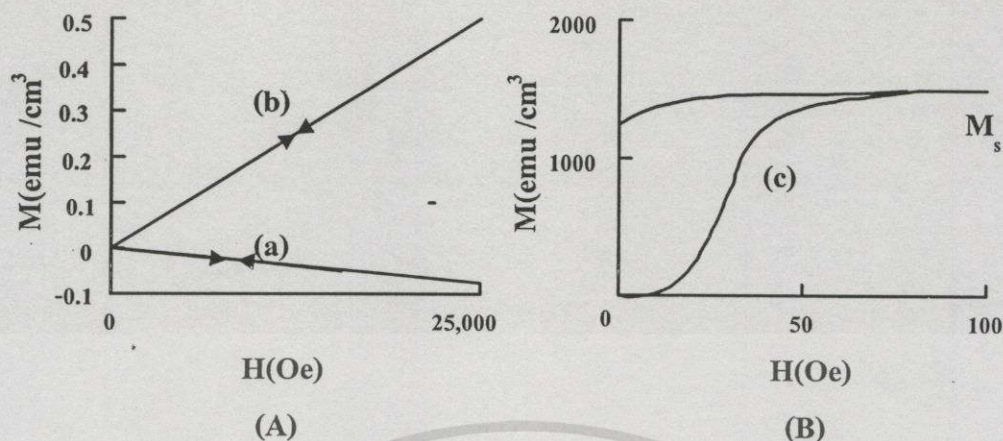
2.4 ซัสเซพติบิลิตี

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กนั้นไม่เพียงแต่จะบอกด้วยขนาดและเครื่องหมาย M เท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการบอกด้วยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ M กับ H โดยอัตราส่วนของสองปริมาณนี้เรียกว่า ซัสเซพติบิลิตี (Susceptibility) κ :

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad \text{emu} / (\text{cm}^3 \cdot \text{Oe}) \quad (2.14)$$

เนื่องจาก M คือ โมเมนต์แม่เหล็กต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น κ หมายถึงหน่วยที่เป็นปริมาตร และในบางครั้งจะเรียกว่า *Volume..susceptibility* และในการคำนวณหาซัสเซพติบิลิตีจะนิยามดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \chi &= \kappa / \rho && \text{Mass..susceptibility}(\text{emu} / \text{g.Oe}) \text{ โดยที่ } \rho \text{ คือ ความหนาแน่น} \\ \chi_A &= \chi^A && \text{Atomic..susceptibility}(\text{emu} / \text{g.atom.Oe}) \text{ โดยที่ } A \text{ คือ น้ำหนักอะตอม} \\ \chi_M &= \chi^M && \text{Molecular..susceptibility}(\text{emu} / \text{g.mol.Oe}) \text{ โดยที่ } M \text{ คือ น้ำหนักโมเลกุล} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.5 (A) กราฟของสารแม่เหล็กพาราและไดอา หรือ แอนติเฟอร์โร

(B) กราฟของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ

จากรูปที่ 2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแมกเนไทเซชัน M และสนาม H จะเรียกว่า กราฟแมกเนไทเซชันของสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ โดยกราฟตามเส้น (a) และ (b) เป็นกราฟของสารแม่เหล็กที่มี Volume susceptibility ระหว่าง -2×10^{-6} และ $+2 \times 10^{-6}$ ตามลำดับ โดยที่สารแม่เหล็กจำพวกนี้มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอาและพาราหรือแอนติเฟอร์โร ซึ่งมีลักษณะเส้นกราฟ M, H เป็นเชิงเส้นภายใต้สภาวะปกติ กล่าวคือ จะไม่มีความเป็นแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ส่วนเส้นกราฟ (c) เป็นของสารแม่เหล็กเฟอร์โรหรือเฟอร์ริ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันมากเพราะเป็นเส้นกราฟที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่ง κ จะแปรตามสนาม H และเมื่อผ่านไปยังสูงสุดประมาณ 40 Oe จากรูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์ 2 อย่างเกิดขึ้นคือ

1. การอิ่มตัว (Saturation) จะต้องมีสนาม H มากเพียงพอ และแมกเนไทเซชัน M มีคงที่หนึ่ง (มีเท่ากับ M_s)
2. ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) หลังจากสภาวะอิ่มตัวและลดสนาม H จนมีลดลงเป็นศูนย์แล้ว ไม่ได้ทำให้ M ลดลงเป็นศูนย์ด้วย ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดกับสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ ซึ่งสารแม่เหล็กเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นแม่เหล็กถาวรได้

2.5 เฟอร์มีอะบิลิตี

ในความสัมพันธ์ระหว่างการแมกเนไทเซชัน M กับสนาม H ทำให้สามารถหาซัสเซพติบิลิตีได้โดยตรง และซัสเซพติบิลิตีเป็นที่ใช้แบ่งแยกชนิดของสารได้ และอีกหนึ่งที่น่าสนใจโดย

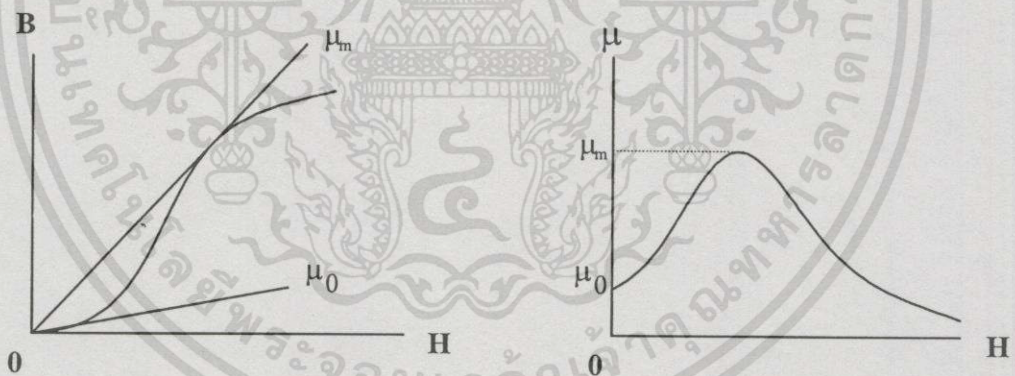
เฉพาะสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี ก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B กับสนาม H ซึ่งจะเรียกอัตราส่วนของ B กับ H ว่า เพอร์มีเอบิลิตี (Permeability) μ : นั่นคือ

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.15)$$

เนื่องจาก $B = H + 4\pi M$ จะได้

$$\begin{aligned} B/H &= 1 + 4\pi(M/H) \\ \mu &= 1 + 4\pi\kappa \end{aligned} \quad (2.16)$$

นั่นคือเพอร์มีเอบิลิตี μ ไม่ใช่ความชัน dB/dH ของกราฟ $B-H$ แต่จะเป็นความชันของเส้นเริ่มต้นไปยังจุดสำคัญบนกราฟ 2 คือ เพอร์เมียบิลิตีตอนเริ่มต้นคือ μ_0 และเพอร์เมียบิลิตีสูงสุดคือ μ_m แสดงตามรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง μ กับ H ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟ B กับ H ของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รีและการเปลี่ยนแปลงเพอร์มีเอบิลิตี μ กับกับสนาม H

ดังนั้นในการพิจารณาคูณลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กของสารและลักษณะพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารแต่ละชนิด สามารถพิจารณาได้จาก κ และ μ กล่าวคือ

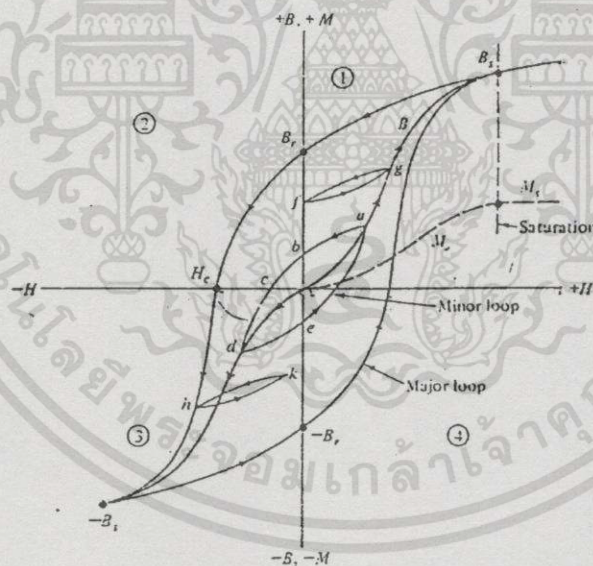
1. ในอากาศ $\kappa = 0$ เนื่องจากไม่มีสารที่ถูกแมกนีไทเซชัน และ $\mu = 1$
2. ในสารแม่เหล็กไดอะ κ จะมีน้อยและเป็นลบ และ μ มีน้อยกว่า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในสารแม่เหล็กพารา และ แอนติเฟอร์ κ มีน้อยและเป็นบวกและ μ มีมากกว่า 1 เล็กน้อย
4. ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ κ และ μ จะมีมากและทั้งสองจะเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.6 กราฟฮีสเทอรีซิส

กราฟฮีสเทอรีซิสรูปเป็นปรากฏการณ์ซึ่งสภาวะของระบบที่ไม่มีการย้อนกลับทางเดิม เกิดขึ้นเนื่องมาจากตัวแปรจากภายนอก และการตอบสนองของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม ในเทอมของกราฟฮีสเทอรีซิส อาจจะแสดงพฤติกรรมของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B คล้ายกับแมกนีโตเซชัน M ที่เป็นฟังก์ชันกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก H ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริ



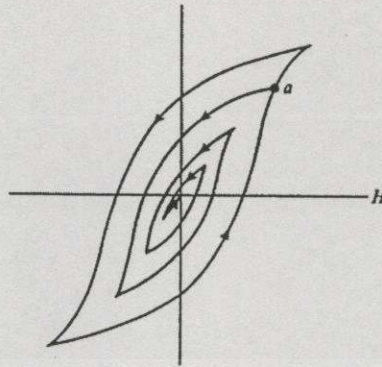
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการแมกนีโตเซชันกับสนามแม่เหล็ก

กราฟแมกนีโตเซชันหรือกราฟฮีสเทอรีซิสจะมีตัวแปรที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือ ถ้าพิจารณากราฟฮีสเทอรีซิสในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B กับสนามแม่เหล็ก H ค่าตัวแปรที่สำคัญของกราฟนี้ คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว

(Saturation magnetic flux density); B_s คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์ของสารแม่เหล็ก โดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก H ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (Retentivity magnetic flux density); B_r คือ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กยังคงค้างอยู่ในสารเมื่อสนามแม่เหล็ก H เป็นศูนย์ และ โคเออร์ซิวิตี (Coercivity); H_c คือ ค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B เป็นศูนย์ และถ้าพิจารณากราฟฮิสเตอร์ีซิสในเทอมของแมกนีไทเซชัน M กับสนาม H ตัวแปรที่สำคัญคือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization); M_s คือ ค่าแมกนีไทเซชันสูงสุดของสารแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก H แมกนีไทเซชันคงค้าง (Remanent Magnetization); M_r คือ ค่าแมกนีไทเซชันที่ยังคงค้างเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ และ อินทรินซิกโคเออร์ซิวิตี (Intrinsic coercivity); H_{ci} คือ ค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไทเซชันเป็นศูนย์

จากกราฟจะเห็นว่าถ้าลดสนามแม่เหล็ก H ลดลงเป็นศูนย์ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะลดลงจากสภาวะ B_s ไปสู่ B_r และถ้าให้สนามแม่เหล็ก H ในทิศทางตรงกันข้ามกันโดยการกลับทิศกระแสของขดลวด B จะค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์ เมื่อสนามมี H_c เป็นสนามแม่เหล็กบังคับให้สารมี B เท่ากับศูนย์ (ที่จุดนี้เอง M ยังไม่เป็นศูนย์ ยังมีเป็นบวกอยู่และมีเท่ากับ $H_c/4\pi$ ดังนั้นสนามที่ทำให้ M เป็นศูนย์ H_{ci} ดังที่กล่าวมาข้างต้น) ถ้าให้สนามกลับทิศมีขนาดเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่งมี $-B_s$ ถ้าลดสนามแม่เหล็กกลับทิศเรื่อยๆ จนมีเป็นศูนย์ จากนั้นก็ให้สนามเพิ่มขึ้นในทิศทางเดิม B ก็จะไปตามเส้น $-B_s - B_r + B_s$ ซึ่งเส้นทางนี้เรียกว่า ฮิสเตอร์ีซิสหลัก (Major hysteresis loop) และในเส้นทางนี้เองจะสมมาตรรอบจุดกำเนิด กล่าวคือ ถ้าหมุนเส้นทางด้านขวา 180 องศา รอบแกนสนามแม่เหล็ก H ก็จะเป็นเหมือนกระจกดูเส้นทางซ้ายของเส้นกราฟนั่นเอง

ถ้าในการแมกนีไทเซชันเกิดมีการขัดจังหวะที่จุดใดจุดหนึ่งโดยทันที ยกตัวอย่างเช่น ที่จุด a โดยการให้สนามแม่เหล็กย้อนกลับและให้สนามใหม่อีกครั้ง เส้นทางของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะเป็นกราฟฮิสเตอร์ีซิสย่อย (Minor hysteresis loop) "abcdea" และในรูปที่ 2.7 มีจำนวนของกราฟฮิสเตอร์ีซิสย่อยอยู่หลายรูปในกราฟฮิสเตอร์ีซิสหลัก และมีหลายรูปมีลักษณะรูปไม่สมมาตร ยกตัวอย่างเช่น แสดงตามรูปคือ "fg" และ "hk" ดังนั้นจึงที่มาของสภาวะการทำลายอำนาจแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก กล่าวคือ สามารถทำได้โดยทำให้ไซเกลแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก H ค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์และในแต่ละไซเกลก็ที่จะทำให้ B มีลดลงจนกระทั่งถึงจุดกำเนิด แสดงตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการทำลายอำนาจแม่เหล็กโดยการลดแอมพลิจูด

2.7 สารแม่เหล็ก

ในโมเลกุลของสารทุกชนิดจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่รอบนิวเคลียส ในขณะที่เดียวกัน อิเล็กตรอนและนิวเคลียสก็จะมีการหมุนแบบลูกข่างด้วย การเคลื่อนที่และการเคลื่อนไหวของประจุ ในอนุภาคดังกล่าวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนรอบพื้นที่ขนาดเล็กภายในโมเลกุล ให้ชื่อกระแสนี้ว่า กระแสผูกพัน (bound current) ดังนั้น โมเลกุลของสารจึงมีคุณสมบัติไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก และ คุณสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างกันออกไปตามขนาดของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น และ จำนวนอิเล็กตรอนในสารใดๆ ย่อมเป็นตัวชี้ว่าให้รู้ว่าสารนั้นๆ สามารถเป็นแม่เหล็กได้ดีหรือไม่ เพียงใด สารสามารถแยกประเภทสารแม่เหล็กออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

สารแม่เหล็กไดอะ

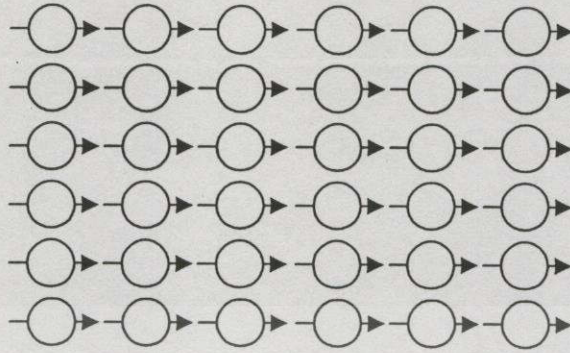
สารแม่เหล็กชนิดนี้ไม่มีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรเลย เมื่อมีสนามภายนอกมากระทำผลที่ได้จะ ปรากฏความเข้มของสนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารจำพวกนี้ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กภายนอก ทั้งนี้เพราะไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กในเนื้อสารสร้างสนามหักล้างกับสนามภายนอก ทำให้สนามแม่เหล็กรวมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแต่ละวง โคจรมีเกือบเป็นศูนย์ นอกจากนี้ โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็มีน้อยมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นสารจำพวกนี้จึงเป็นแม่เหล็กได้ยาก ตัวอย่าง สารแม่เหล็กไดอะ ได้แก่ บิสมาท ไฮโดรเจน ฮีเลียม พวกก๊าซเฉื่อยเช่น นีออน อาร์กอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารอื่นๆ เช่น ทองแดง เงิน เจอร์เมเนียม ซีลีคอน เป็นต้น

สารแม่เหล็กพารา

สารแม่เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรอย่างอ่อน แต่จะไม่แสดงตัวเป็นแม่เหล็ก ถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กในเนื้อสารนี้จะให้สนามเสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอกเล็กน้อย ทำให้ขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กผลรวมของสนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารสูงกว่าสนามภายนอกไม่มากนัก กล่าวคือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมมีมากกว่าศูนย์ไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกผ่านเข้ามาก็อาจทำให้เกิดค่าลึงบิด เกิดสนามแม่เหล็กรวมมากขึ้นนั่นคือมีโมเมนต์แม่เหล็กตั้งนั้นจึงสามารถเป็นแม่เหล็กได้ สารแม่เหล็กพารา ได้แก่ โปรตัสเซียม ทังสเตน แมงกานีส โครเมียม นอกจากนี้ยังมีสารที่หายาก เช่น เออร์เบียม-คลอไรด์ นีโอดีเนียม-ออกไซด์ ฯลฯ เป็นต้น

สารแม่เหล็กเฟอร์โร

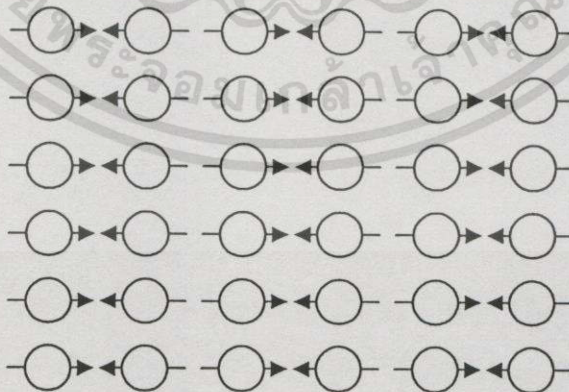
ในสารแม่เหล็กจำพวกนี้โมเลกุลมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวรอยู่แล้ว เมื่อมีสนามภายนอกมากระทำ สนามแม่เหล็กเนื่องจากไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กภายในเนื้อสารจะเสริมกับสนามภายนอกทำให้สนามผลรวมภายในมีขนาดความเข้มสูงกว่าสนามภายนอกหลายเท่า และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกยกออกไปแล้ว สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารยังมีความเข้มค้างเหลืออยู่บ้าง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสารแม่เหล็กเฟอร์โรเป็นสารที่มีจำนวนอะตอมหนาแน่น แต่ละอะตอมทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กสูง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กอันเกิดจากอะตอมของมันก็มีทิศล้อยตามกันไปส่วนใหญ่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาจึงช่วยเสริมให้สนามแม่เหล็กทั้งหลายไปในทางทิศเดียวกันมากขึ้น ถึงแม้จะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว ส่วนใหญ่ยังมีสนามแม่เหล็กที่ไปทางเดียวกันหลงเหลืออยู่ จึงทำให้สารพวกนี้เป็นแม่เหล็กถาวรได้ สารแม่เหล็กเฟอร์โร ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล พวกโลหะผสม เช่น อัลนิโก เป็นส่วนผสมของอลูมิเนียม+นิกเกิล+โคบอลต์+ทองแดงเล็กน้อย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารที่หายากซึ่งสามารถเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรที่อุณหภูมิต่ำ เช่น กาโดลิเนียม(gadolinium) และการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กแสดงคังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กเฟอร์โร

สารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร

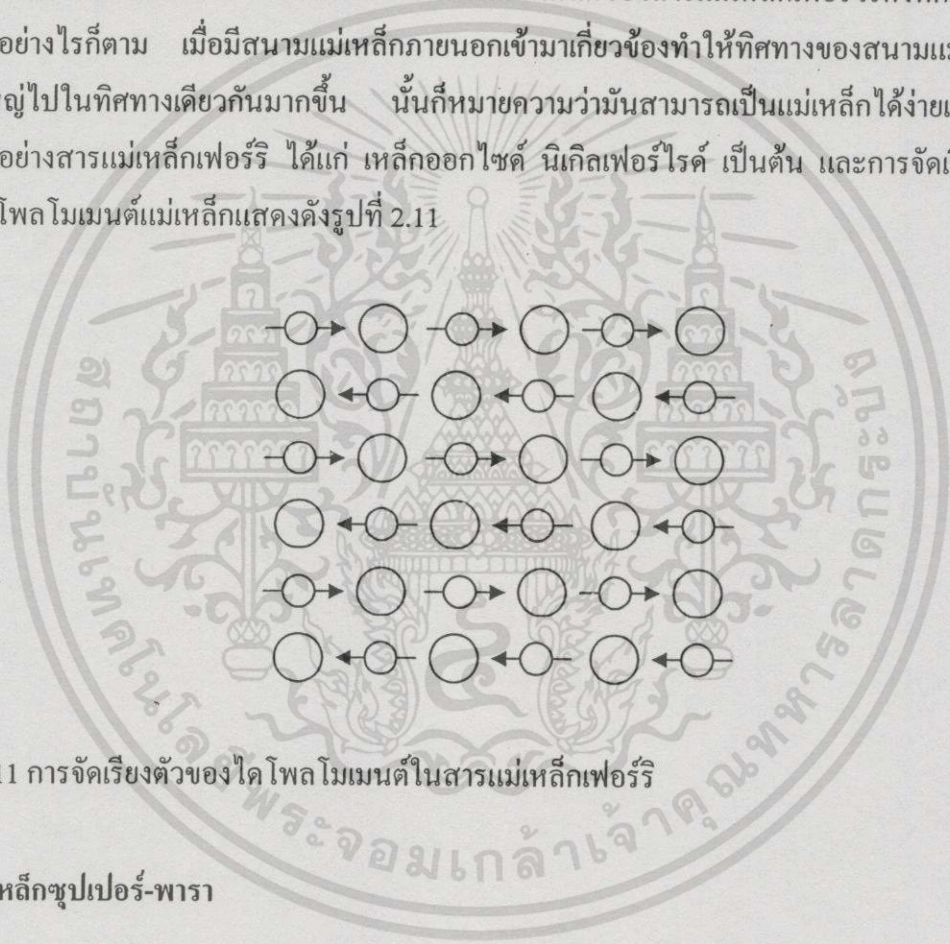
โมเลกุลที่อยู่ใกล้ชิดกัน ในสารแม่เหล็กชนิดนี้ มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กหักล้างกันเป็นศูนย์ เนื่องจากแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่งไปหักล้างแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่ง ทำให้อิเล็กตรอนตรอนทั้งหลายถูกหักล้างกันเป็นศูนย์ ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กจึงเป็นศูนย์ไปด้วย ถึงแม้จะมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามากระทำก็ยากที่จะบังคับให้สนามแม่เหล็กของอะตอมเหล่านั้นไปทางเดียวกันได้ ทำให้สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารมีขนาดความเข้มไม่สูงกว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมากนัก สารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ได้แก่ สารพวกออกไซด์ต่างๆ เช่น นิกเกิล-ออกไซด์ พวกซัลไฟด์ เช่น เฟอร์รัสซัลไฟด์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกคลอไรด์บางชนิด เช่น โคบอลต์-คลอไรด์ และการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร

สารแม่เหล็กเฟอร์รี

โมเลกุลที่อยู่ใกล้ชิดกันของสารแม่เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่หักล้างกันไม่หมดเสียเลยทีเดียว เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ สนามแม่เหล็กภายในเนื้อสารจะมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่าสนามภายนอก แต่สูงกว่าไม่มากเท่าในสารแม่เหล็กเฟอร์โร กล่าวคือ สารแม่เหล็กชนิดนี้เป็นสารที่มีจำนวนอะตอมความหนาแน่นแต่ไดโพล โมเมนต์ที่เกิดจากอะตอมทั้งหลายมีทิศทางไม่ไปในทางเดียวกันหมด และผลรวมของน โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของแต่ละอะตอมที่เคลื่อนไหวยังต่ำกว่าสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์โรดังที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่ไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น นั่นก็หมายความว่ามันสามารถเป็นแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนกัน ตัวอย่างสารแม่เหล็กเฟอร์รี ได้แก่ เหล็กออกไซด์ นิกเกิลเฟอร์ไรด์ เป็นต้น และการจัดเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์ในสารแม่เหล็กเฟอร์รี

สารแม่เหล็กซูเปอร์-พารา

สารแม่เหล็กชนิดนี้ประกอบด้วยอนุภาคของสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งฝังอยู่ในเนื้อสารที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กเฟอร์โร อนุภาคของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะทำให้จะทำให้สารแม่เหล็กซูเปอร์พารามีคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรได้ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้อำนาจของสนามแม่เหล็กภายนอก กล่าวคือ เป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่วางอยู่หรืออาจติดแน่นอยู่บนผิวของสารแม่เหล็กนอน-เฟอร์โรแมกเนติก เช่น พลาสติก เป็นต้น สารแม่เหล็กซูเปอร์พารา ได้แก่ แมกเนติกเทปต่างๆ

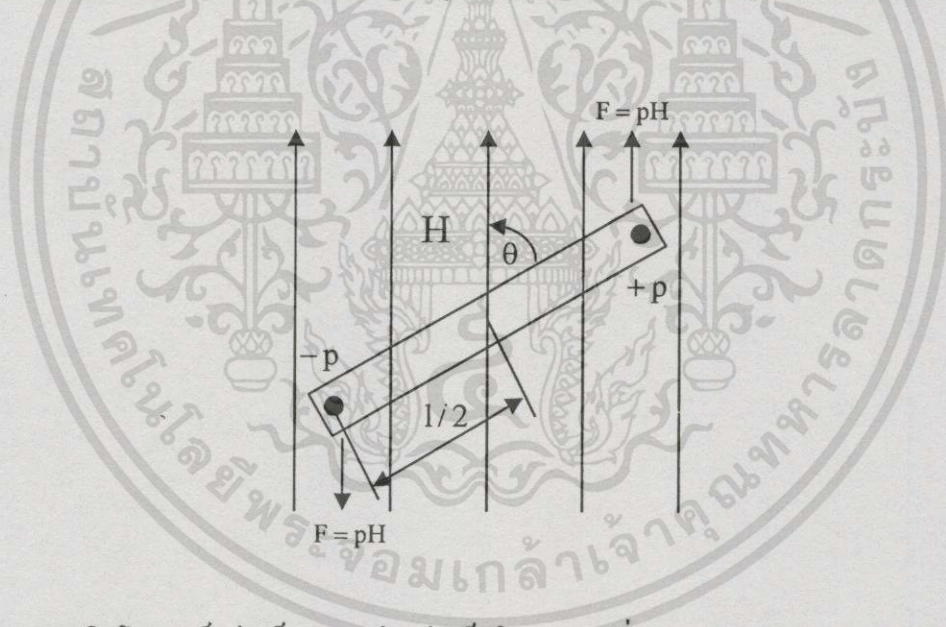
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการและเทคนิคของเครื่องมือ แมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์

ในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงสมบัติพื้นฐานของสารแม่เหล็กมาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวพฤติกรรมของสารแม่เหล็ก เพื่อที่จะนำไปสู่การวัดกราฟฟีสเตอร์ซิสด้วยเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี กล่าวคือ การวัดโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กได้ ก็ต่อเมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับสารแม่เหล็กนั่นเอง

เมื่อนำสารแม่เหล็กไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สารเกิดการแมกนีไตเซชันและทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้น 2 ขั้วในสารแม่เหล็กนั้น และสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดความแรงบนขั้วทำให้สารแม่เหล็กมีพฤติกรรมเป็นแม่เหล็กและจะนำไปสู่การวัดโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กได้



รูปที่ 3.1 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กในสนามสม่ำเสมอ

พิจารณารูปที่ 3.1 เมื่อนำแท่งแม่เหล็กที่มีความแรงของขั้วเป็น p อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง l โดยสมมติให้แท่งแม่เหล็กวางในแนวทำมุม θ กับสนามที่สม่ำเสมอ H จะทำให้เกิดแรงคู่ควบกระทำบนสารแม่เหล็กในทิศทางที่จะหมุนให้ขนานกับสนาม และ โมเมนต์แรงคู่ควบมีดังนี้

$$(pH \sin \theta)(l/2) + (pH \sin \theta)(l/2) = pHl \sin \theta \quad (3.1)$$

เมื่อสนาม $H = 10e$ และ $\theta = 90^\circ$ โมเมนต์แม่เหล็กจะมีค่าตามสมการ

$$\mu = pl \quad (3.2)$$

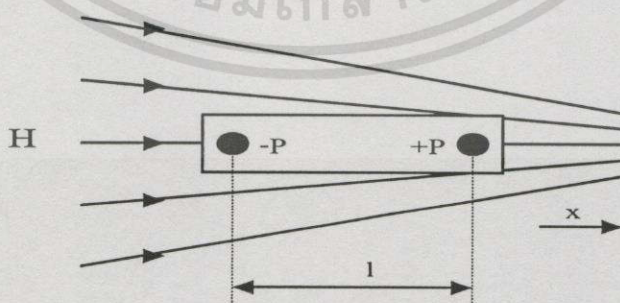
โดยที่ μ เป็น โมเมนต์แม่เหล็ก

ในทางตรงกันข้ามถ้าแท่งแม่เหล็กที่มีความแรงของขั้วเป็น p อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง l โดยให้แท่งแม่เหล็กวางในสนามเกรเดียนท์ หรือสนามที่ไม่สม่ำเสมอที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง แท่งแม่เหล็กก็จะหมุนจนกระทั่งแกนตามยาวขนานกับสนามภายนอก และแต่ละด้านของแท่งแม่เหล็กจะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มไม่เท่ากัน และถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา แสดงดังรูปที่ 3.2 ความแรงของขั้วจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กภายนอกเพราะว่าสนามแม่เหล็กที่ขั้วเหนือแรงกว่าขั้วใต้ ดังนั้นแรงสุทธิที่กระทำในทางขวามือจะมี

$$F_x = -pH + p \left(H + l \frac{dH}{dx} \right) \quad (3.3)$$

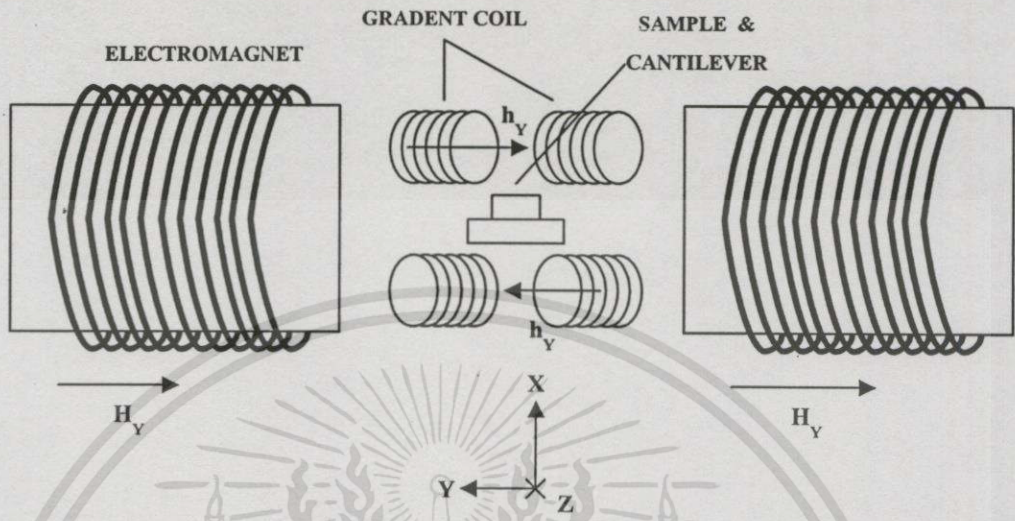
$$F_x = pl \frac{dH}{dx} = \mu \frac{dH}{dx} \quad (3.4)$$

ดังนั้นแท่งแม่เหล็กจะเคลื่อนจากทางซ้ายมือไปขวามือ นั่นคือแท่งแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีสนามแรงมากกว่า แสดงว่าแท่งจะเลื่อนไปในทิศทางที่จะเพิ่มจำนวนเส้นแรงที่ผ่านตัวมัน



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมของแท่งแม่เหล็กในสนามเกรเดียนท์

3.1 หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กโดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์



รูปที่ 3.3 หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กโดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์

หลักการวัดโมเมนต์แม่เหล็กโดยใช้เทคนิคอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยการวัดแรงกระแสดลัดที่กระทำต่อสารแม่เหล็กที่เกิดการสั่น เนื่องจากสนามเกรเดียนท์กระแสดลัดที่ความถี่ต่ำ ที่วางซ้อนทับบนสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ โดยที่แอมพลิจูดการสั่นของสารแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำกับสารแม่เหล็กและเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็ก โดยการพยายามทำให้สนามเกรเดียนท์กระทำกับสารแม่เหล็กมีทิศทางในทางแกน y เพียงทิศทางเดียวความเข้ม h_y โดยที่สนามในทิศทาง x และ z เป็นศูนย์ $h_x = h_z = 0$ และทำให้สนามเกรเดียนท์ในแนวแกน x มีมากกว่าสนามเกรเดียนท์ในทิศทางอื่นๆ กล่าวคือ $\frac{\partial h_y}{\partial y} \ll \frac{\partial h_y}{\partial x}$ และ $\frac{\partial h_y}{\partial z} \ll \frac{\partial h_y}{\partial x}$ ดังนั้น เมื่อวางตัวอย่างสารแม่เหล็กระหว่างสนามเกรเดียนท์ h_y ทำให้เกิดแรงกระทำกับสารแม่เหล็กขึ้น

$$\vec{F} = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{h}) \quad (3.5)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.6)$$

$$F = \hat{i} \left(\vec{\mu} \frac{\partial \vec{h}}{\partial x} \right) + \hat{j} \left(\vec{\mu} \frac{\partial \vec{h}}{\partial y} \right) + \hat{k} \left(\vec{\mu} \frac{\partial \vec{h}}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

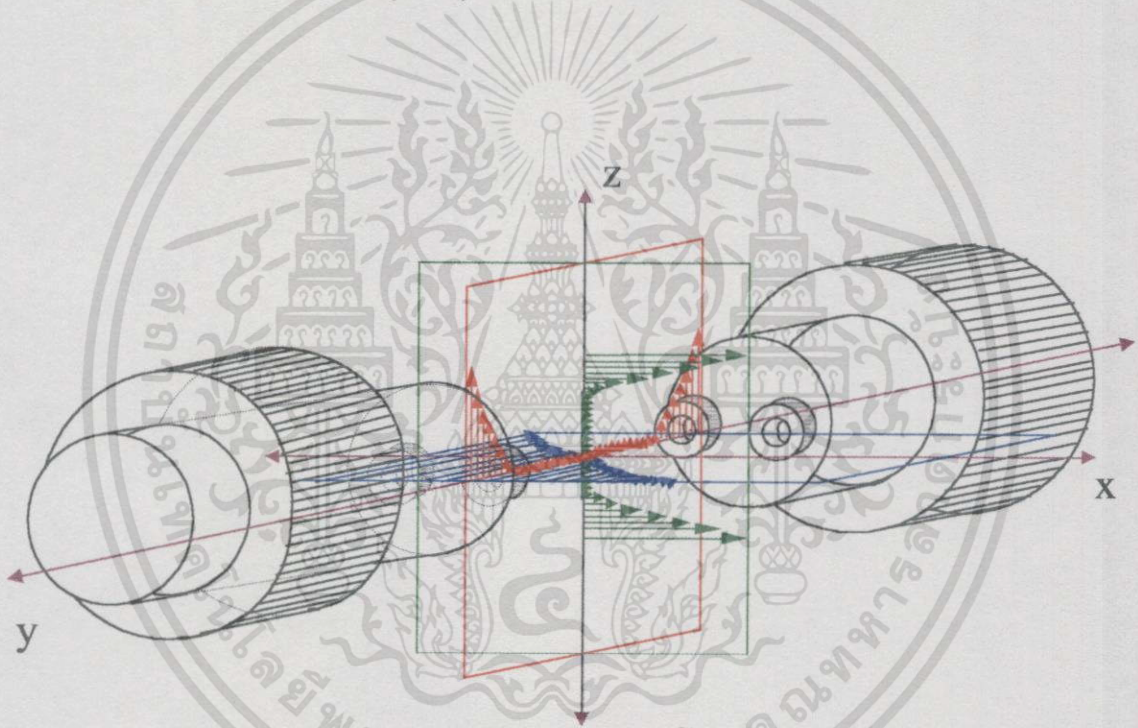
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถแยกพิจารณาแต่ละองค์ประกอบได้ว่า

$$F_x = \left(\bar{\mu} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \right) = \mu_x \frac{\partial h_x}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial h_y}{\partial x} + \mu_z \frac{\partial h_z}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$F_y = \left(\bar{\mu} \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \right) = \mu_x \frac{\partial h_x}{\partial y} + \mu_y \frac{\partial h_y}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial h_z}{\partial y} \quad (3.9)$$

$$F_z = \left(\bar{\mu} \frac{\partial \bar{h}}{\partial z} \right) = \mu_x \frac{\partial h_x}{\partial z} + \mu_y \frac{\partial h_y}{\partial z} + \mu_z \frac{\partial h_z}{\partial z} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.4 สนามเกรเดียนต์ในทิศทางต่างๆ ระหว่างช่องว่างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.4 จะพบว่าสนามเกรเดียนต์มีทิศทางในแนวแกน y มี h_y โดยที่พิจารณาให้องค์ประกอบทางด้าน h_x และ h_z มีเท่ากับศูนย์ทำให้ $\frac{\partial h_x}{\partial x} \approx \frac{\partial h_z}{\partial z} \approx 0$

$$\text{และ } \frac{\partial h_y}{\partial y} \ll \frac{\partial h_y}{\partial x}, \frac{\partial h_y}{\partial z} \ll \frac{\partial h_y}{\partial x} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่เกิดจากเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะองค์ประกอบทางด้านแกน x เท่านั้น ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กสามารถหาได้จากแรงที่กระทำกับสารแม่เหล็กตามสมการ

$$F_x = \mu_y \frac{\partial h_y}{\partial x} \quad (3.12)$$

3.2 การคำนวณหาโมเมนต์แม่เหล็ก

ของแรงในสมการที่ (3.12) เป็นของแรงอันตรกิริยาระหว่างสารแม่เหล็กกับสนามเกรเดียนท์ซึ่งแปรผันตรงกับโมเมนต์แม่เหล็ก จะได้ว่า

$$\mu_y = \frac{F_x}{\frac{\partial h_y}{\partial x}} \quad (3.13)$$

โดยที่ แอมพลิจูดของการสั่นของสารแม่เหล็กแปรผันตรงกับแรงจะได้

$$a = kF_x \quad (3.14)$$

ดังนั้นจะได้

$$F_x = \frac{k}{a} \quad (3.15)$$

และแรงดันที่ตรวจวัดได้ แปรผันตรงกับแอมพลิจูดของการสั่นของสารแม่เหล็กจะได้

$$V_{psd} = pa \quad (3.16)$$

ดังนั้นจะได้

$$a = \frac{V_{psd}}{p} \quad (3.17)$$

- โดยที่ F_x คือ แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็ก
 μ_y คือ โมเมนต์แม่เหล็ก
 k คือ สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับคุณสมบัติการยึดหยุ่นของแท่นยึดจับชิ้นงาน
 a คือ แอมพลิจูดของการสั่นของสารแม่เหล็ก
 p คือ สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับความไวของฟิล์มบีซีโซโอมบ
 V_{psd} คือ แรงดันที่ตรวจวัดได้

โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องรู้ F_x , k , p ที่แน่นอนก็ได้ สามารถหาโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กที่วัดได้ โดยใช้สารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กมาตรฐานที่รู้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่แน่นอนในการหาโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กได้จาก

$$V_{standard} = q\mu_{standard} \quad (3.16)$$

และ

$$V_{sample} = q\mu_{measure.sample} \quad (3.17)$$

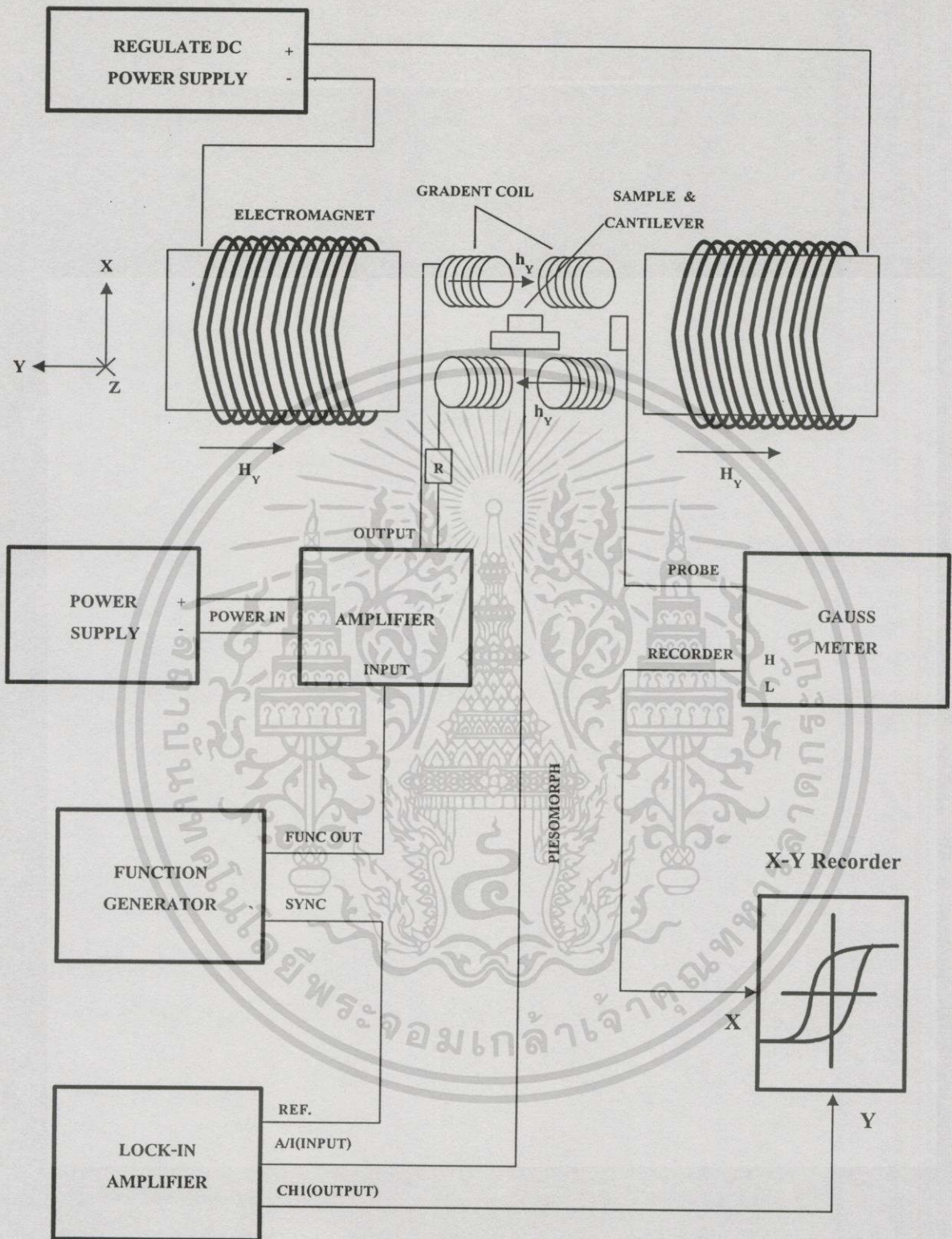
จากสมการที่(12) และสมการที่ (13) จะได้ว่า

$$\mu_{measure.sample} = \mu_{standard} \frac{V_{sample}}{V_{standard}} \quad (3.18)$$

- โดยที่ $V_{standard}$ คือ แรงดันที่ตรวจวัดได้จากสารแม่เหล็กมาตรฐาน
 V_{sample} คือ แรงดันที่ตรวจวัดได้จากสารแม่เหล็ก
 $\mu_{standard}$ คือ โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กมาตรฐาน
 $\mu_{measure.sample}$ คือ โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็ก
 q คือ ค่าคงที่(เป็นค่าเดียวกัน)

การสร้างเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์

ดังที่กล่าวมาแล้ว การวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์เป็นการวัดโมเมนต์แม่เหล็ก ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ และแสดงในรูปของกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยที่โมเมนต์แม่เหล็กวัดได้จากแรงที่กระทำต่อสารแม่เหล็กเนื่องจากสนามเกรเดียนท์กระแสที่มีความถี่ต่ำที่วางซ้อนทับบนสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งจะทำให้สารแม่เหล็กที่อยู่ในบริเวณระหว่างขดลวดเกรเดียนท์เกิดการสั่นด้วยความถี่ต่ำ และแอมพลิจูดการสั่นของสารแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแรงที่กระทำกับสารแม่เหล็กและเป็นสัดส่วนกับ โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กนั้น โดยที่แอมพลิจูดของการสั่นของสารแม่เหล็กที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ของสนามเกรเดียนท์ที่ผ่านให้กับตัวอย่างสารแม่เหล็ก และสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ฟิล์มบีบอัดโซโหมบที่ประกบติดกับที่ยึดจับชิ้นงาน โดยจะแปลงการสั่นของสารแม่เหล็กให้เป็นรูปของแรงดันกระแสสลับ และสัญญาณแรงดันกระแสสลับจะถูกขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัดที่ไวต่อเฟสของตัวขยายแบบล็อกอิน เพื่อทำการตรวจวัดและขยายสัญญาณเฉพาะความถี่ที่กำหนดเท่านั้น และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจะนำไปแสดงผลทางด้านแกน Y ของตัวบันทึกแบบ XY ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเข้มสนามแม่เหล็ก H อย่างช้าๆ สัญญาณของความเข้มสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจวัดโดยฮอลล์โพรบซึ่งต่อกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเกาส์มิเตอร์ (Gauss Meter) และแสดงผลทางด้านแกน X ของตัวบันทึกผล XY ทั้งสองแกนจะประกบกันขึ้นเป็นรูปกราฟฮีสเตอร์ซิสบนเครื่องบันทึกผล XY การบันทึกกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กกับแท่นจับชิ้นงาน ควรตรวจวัดที่ความถี่รีโซแนนซ์เพื่อเป็นการเพิ่มผลตอบสนองของสัญญาณให้มากที่สุด และในการวัดโมเมนต์แม่เหล็กที่แน่นอนและการเปรียบเทียบทั้งหมดจะต้องใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่รู้โมเมนต์แม่เหล็กแน่นอนในการตรวจวัดมาเปรียบเทียบ โดยโครงสร้างของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบส่วนหลัก 5 ส่วนด้วยกัน คือ 1. ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก 2. ขดลวดเกรเดียนท์ 3. แหล่งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ 4. การวัดสัญญาณ X และ Y และ 5. ส่วนแสดงผลข้อมูล โดยในส่วนที่ได้สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยก็คือ ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก และส่วนของขดลวดเกรเดียนท์ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบของทั้งสองส่วนรวมทั้งส่วนประกอบหลักในส่วนอื่นๆ มีดังนี้

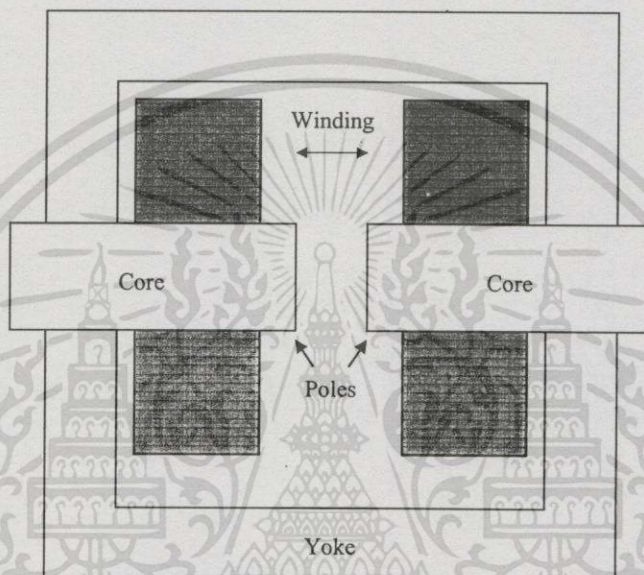


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดวงปิดของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านแกนแม่เหล็กและไหลเข้าสู่โยคของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การใช้งานของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กนี้ ได้ออกแบบให้มีระยะระหว่างขั้วประมาณ 5.10 เซนติเมตร โดยลักษณะของโยคจะเป็นแบบคู่หรือแบบตัวซีประกบ ทั้งนี้ก็เพื่อการส่งผ่านของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นไปอย่างสมบูรณ์ และในการสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กในกายวิชัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะใช้วัสดุที่หาซื้อได้ง่าย มีราคาไม่แพงมากนัก และเป็นวัสดุที่ผลิตภายในประเทศจึงทำให้เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีข้อจำกัดพอสมควรได้แก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนแม่เหล็กมีขนาด 10.2 เซนติเมตรซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กเหนียวที่หาซื้อได้ อีกประการหนึ่งคือข้อจำกัดของเหล็กที่ทำโยค เนื่องจากความหนาของเหล็กแผ่นที่หาซื้อได้มีความหนา 15 เซนติเมตร เท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอจึงขึ้นอยู่กับทฤษฎีและวัสดุประสงค์ของการใช้งาน และส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีสี่ส่วนที่สำคัญ คือ โยค แกนแม่เหล็ก ขดลวด ความเข้มสนามแม่เหล็ก

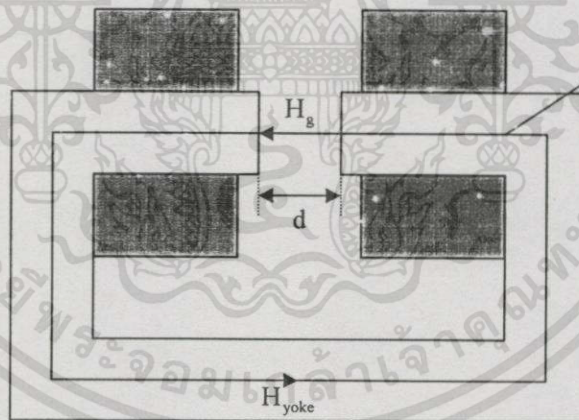
หลักในการออกแบบแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอาศัยหลักของสมการแมกเวลล์ อยู่ 2 สมการด้วยกันคือ

$$\text{div}B = 0$$

$$\text{Curl}H = 0.4\pi NI$$

โดยที่ B เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและ H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเอสเตท(Oe) และ N คือจำนวนวงปิดของกระแสต่อหน่วยตารางเซนติเมตร และ I เป็นกระแสที่ไหลในวงปิดมีหน่วยเป็นแอมแปร์(A) สมการแรกของแมกเวลล์นั้นบอกว่าฟลักซ์ที่เข้าสู่ปริมาตรใดๆเท่ากับฟลักซ์ที่พุ่งออกปริมาตรนั้นหรือกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง ส่วนสมการที่สองบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magnetomotive force ; $m.m.f$) สามารถเขียนได้เป็น

$$\oint H \cdot dl = 0.4\pi NI \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.3 หลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ดังนั้น $\oint Hdl$ เรียกว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กและจากรูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนของแกนแม่เหล็กและช่องว่าง สมการที่(4.1) เขียนได้ว่า

$$\int_{L_{yoke}} H_{yoke} dl + H_g d = \int_L Hdl \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{yoke}l + H_g d = 0.4\pi NI \quad (4.3)$$

- เมื่อ H_{yoke} คือ ความเข้มสนามภายในแกนแม่เหล็กกับโยค
 H_g คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็ก
 l คือ ความยาวของแกนแม่เหล็กและโยค
 d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก

จากความสัมพันธ์ $B = H + 4\pi M$ เมื่อ M คือ แมกนีโตเซชัน แทน H_{yoke} ในสมการที่ (4.3) ด้วย $B - 4\pi M$ จะได้ว่า

$$(B - 4\pi M)l + H_g d = 0.4\pi NI$$

หรือ

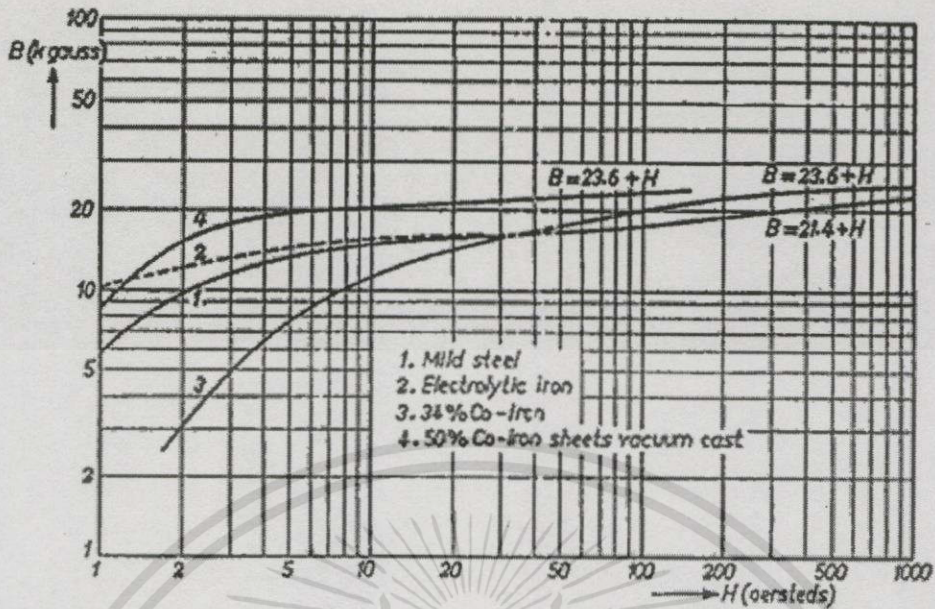
$$H_g d = 0.4\pi NI - Bl + 4\pi Ml \quad (4.4)$$

จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างระหว่างขั้วคือ

$$H_g = \frac{0.4\pi NI}{d} - \frac{Bl}{d} + \frac{4\pi Ml}{d} \quad (4.5)$$

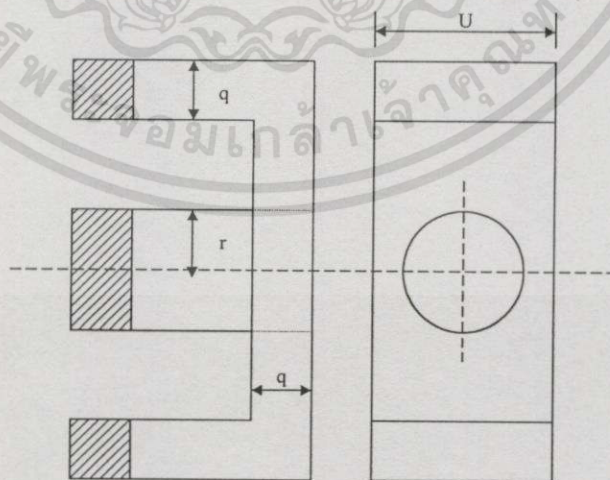
เมื่อพิจารณาวงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) ดังรูปที่ 4.3 แรงเคลื่อนเคลื่อนแม่เหล็ก m.m.f ก็คือ ผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แกนแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ โดยปกติแล้วแกนแม่เหล็กจะเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรซึ่งไม่มีความต้านทานแม่เหล็ก กล่าวคือ H_{yoke} มีค่าเข้าสู่ศูนย์ (เพอมีอิมิตอร์มีค่าเข้าสู่อนันต์ ($\mu \rightarrow \infty$)) หรือ $4\pi M \approx B$ จากสมการที่ (4.5) อาจกล่าวได้ว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก $0.4\pi NI$ ที่ส่งฟลักซ์แม่เหล็กเข้าสู่แกนและผ่านช่องว่างกว้าง d ถ้าแกนแม่เหล็กไม่มีความต้านทานแม่เหล็ก ($B_r = 0$) แล้วจะพิจารณาได้ว่า $H_g = 0.4\pi NI / d$ ใช้นี้ประมาณต่างๆ ได้

จากสมการที่ (4.5) ทำให้พิจารณาได้ว่าควรเลือกวัสดุมาทำแกนแม่เหล็กจะต้องหา $4\pi M_s$ มากและ B_r จะต้องน้อย เพื่อให้จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วสูง $4\pi M_s$ จะขึ้นกับชนิดของเหล็กซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ $4\pi M_s$ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟฮิสเตอร์ีซิสของวัสดุต่างๆ ที่แสดง ($4\pi M_s$) และ (B_r) สนามแม่เหล็กคงค้าง และแรงที่ใช้ในการลบล้างสนามแม่เหล็กคงค้าง รวมทั้งสภาพความซาบซึมได้ของวัสดุ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุทำแกนแม่เหล็กชนิดต่างๆ

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก โยคเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมและการส่งผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก คุณภาพความแรงของสนามแม่เหล็กจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับการเลือกวัสดุที่ทำเป็น โยคและการออกแบบให้เหมาะสม ดังนั้น โยคจึงเป็นองค์ประกอบหลักของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ต้องพิจารณาถึง คือ ถ้าพิจารณาว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่มีการสูญหายฟลักซ์แม่เหล็กจากแกนแม่เหล็กที่ผ่านเข้าสู่โยคจะถูกจำกัดโดยโยค ทำให้เกิดความต้านทานการรวบรวมเส้นแรงแม่เหล็ก (reluctance)



รูปที่ 4.5 ขนาดของโยคและแกนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 ถ้า B_e เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านแกนแม่เหล็ก และ B_y เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านโยค และ m เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านแกนแม่เหล็กกับโยค คือ

$$m = \frac{B_e}{B_y} \quad (4.6)$$

ในทางปฏิบัติฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนอาจสูญหายไป กล่าวคือ แกนแม่เหล็กทรงกระบอกที่สภาวะอิ่มตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B_e ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ผ่านโยค B_y ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ($0 < m \leq 2$)

ถ้าพื้นที่หน้าตัดของโยคและแกนแม่เหล็กมี S_y และ S_c ตามลำดับจะได้ว่า

$$S_y = 2Uq \quad \text{และ} \quad S_c = \pi r^2$$

ดังนั้น

$$m = \frac{2Uq}{\pi r^2} \quad (4.7)$$

ถ้า q_0 เป็นความหนาแน่นค่าสุดและ U_0 เป็นความกว้างที่มากที่สุด เมื่อพิจารณาฟลักซ์ที่ผ่านแกนแม่เหล็กคือ

$$\phi = B_e \pi r^2 \quad (4.8)$$

ฟลักซ์ที่ผ่านแกนและเข้าสู่โยคได้ความหนาแน่นฟลักซ์ B_y หากเส้นแรงแม่เหล็กไม่มีการสูญหายแล้วจะได้ว่า

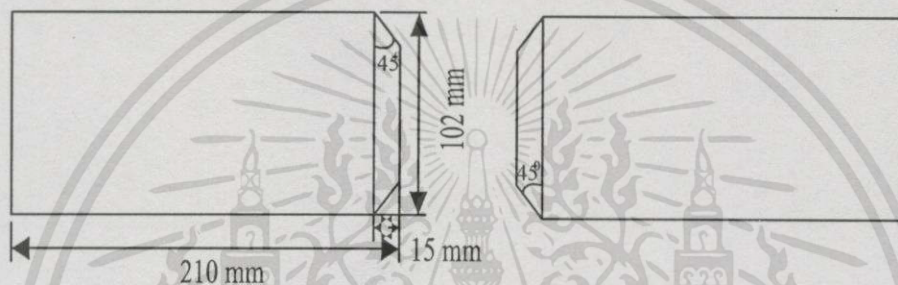
$$\phi = B_y 2\pi r q_0 \quad (4.9)$$

เมื่อเทอมของ $2\pi r q_0$ เป็นพื้นที่แกนแม่เหล็กที่สัมผัสกับโยค จากสมการที่(4.8)และ(4.9) พิจารณาเป็นกรณีที่ ฟลักซ์แม่เหล็กไม่มีการสูญหายจะได้ว่า

$$B_e \pi r^2 = B_y 2\pi r q_0 \quad (4.10)$$

แกนแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเช่นกัน เพราะว่าแกนแม่เหล็กจะมีผลโดยตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เหล็กอ่อนที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำ ได้แก่เหล็กประเภทเพลลาขาวหรือแกนที่หล่อโดยควบคุมปริมาณธาตุคาร์บอน จากการพิจารณาการนำเอาสนามแม่เหล็กที่กำเนิดไปใช้งานจะพบว่าต้องการสนามสถิตย์มากกว่าสนามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงสามารถเลือกเหล็กที่ไม่มีข้อจำกัดมากนักในด้านสนามคก้างในแกนแม่เหล็ก ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกเหล็กเพลลาขาวหรือเหล็กอ่อน แต่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดเพราะในตลาดไม่มีขนาดตามที่ต้องการ จึงเลือกและออกแบบขนาดของเหล็กตามที่หาได้แสดงดังรูปที่

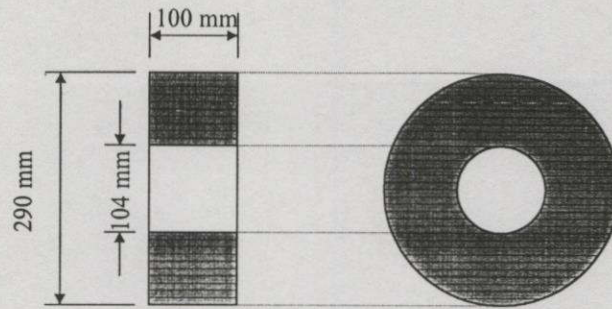
4.7



รูปที่ 4.7 ขนาดของแกนแม่เหล็กที่ได้ออกแบบ

เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก คือ ขนาดแกนแม่เหล็กมีรัศมี 5.10 เซนติเมตร ดังนั้น จึงได้เลือกรัศมีภายในของขดลวดมี 5.20 เซนติเมตร ทั้งนี้ได้พิจารณาถึงความเหมาะสมความสะดวกในการใช้งาน การลดพลังงานที่สูญเสียทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดงที่ใช้ แต่การเพิ่มพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดจะทำให้จำนวนรอบของขดลวดของขดลวดลดลง เมื่อกำหนดให้ขนาดของขดลวดคงที่ การพิจารณาในประเด็นนี้ได้พิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการ ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก และเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่ในการพันขดลวดได้พิจารณาปัจจัยทั้งสามนี้ และได้เลือกขดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.60 มิลลิเมตร และได้ความต้านทานภายในขดลวดมีประมาณ 2.6 โอห์ม ขนาดของขดลวดที่พันขึ้น แสดงดังรูปที่

4.8



Diameter of copper wire : 2.6 mm

Turns : 1300

Resistance : 2.6 ohms

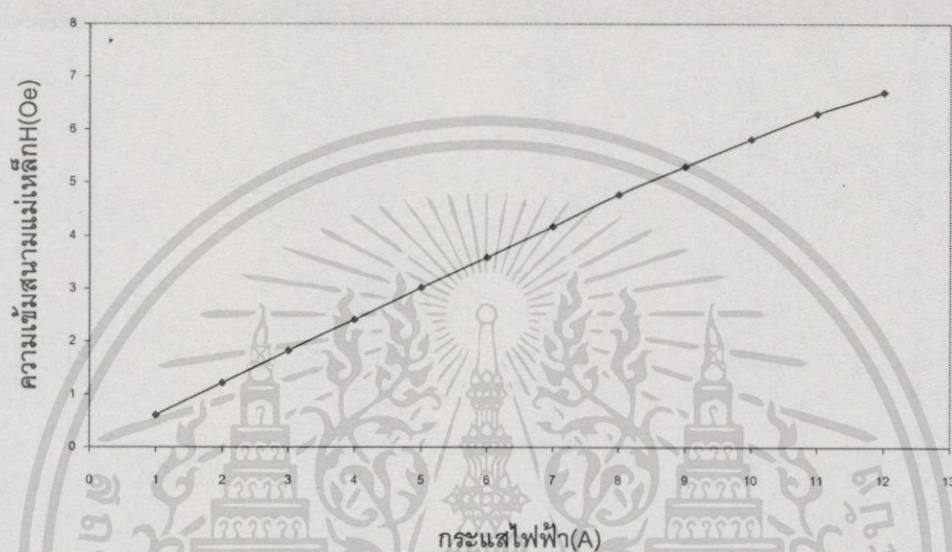
รูปที่ 4.8 ขนาดขดลวดและเส้นลวดที่ได้ออกแบบ

ตารางที่ 4.1 ความความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้ว 5.10 เซนติเมตร

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวด (A)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก ระยะระหว่างขั้ว 5.10 เซนติเมตร (kOe)
1	0.613
2	1.221
3	1.826
4	2.411
5	3.014
6	3.593
7	4.172
8	4.770
9	5.296
10	5.813
11	6.305
12	6.705

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจำเป็นต้องทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้ว 5.10 เซนติเมตรตามที่ออกแบบวัดเทียบกับกระแสไฟฟ้า 1 - 12 แอมแปร์ที่จ่ายให้ขดลวด เพื่อความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น จึงต้องทำการทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กได้จากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น และได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้แสดงตามตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9

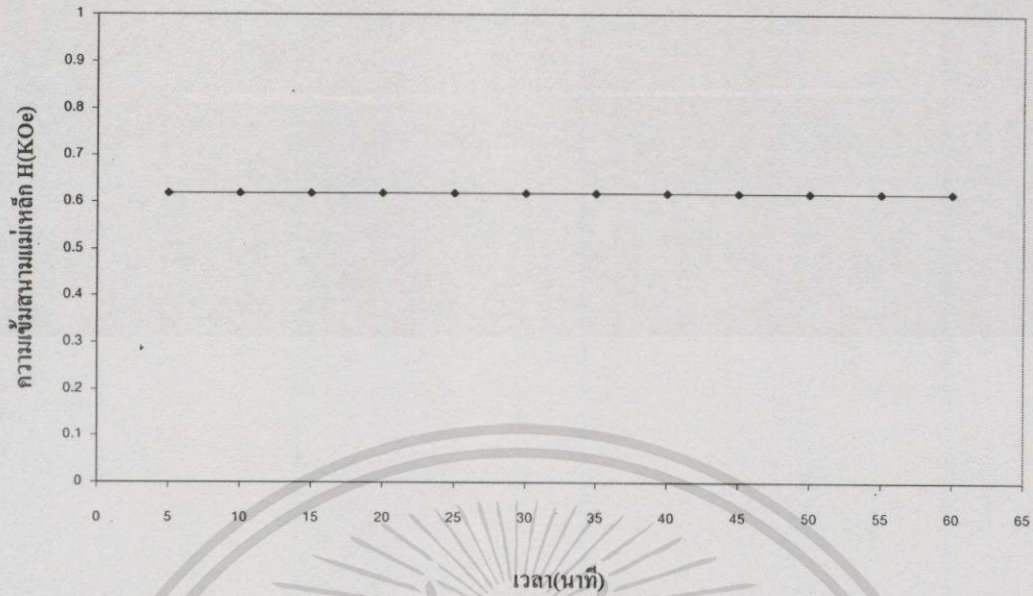


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ระยะระหว่างขั้ว 5.1 เซนติเมตร

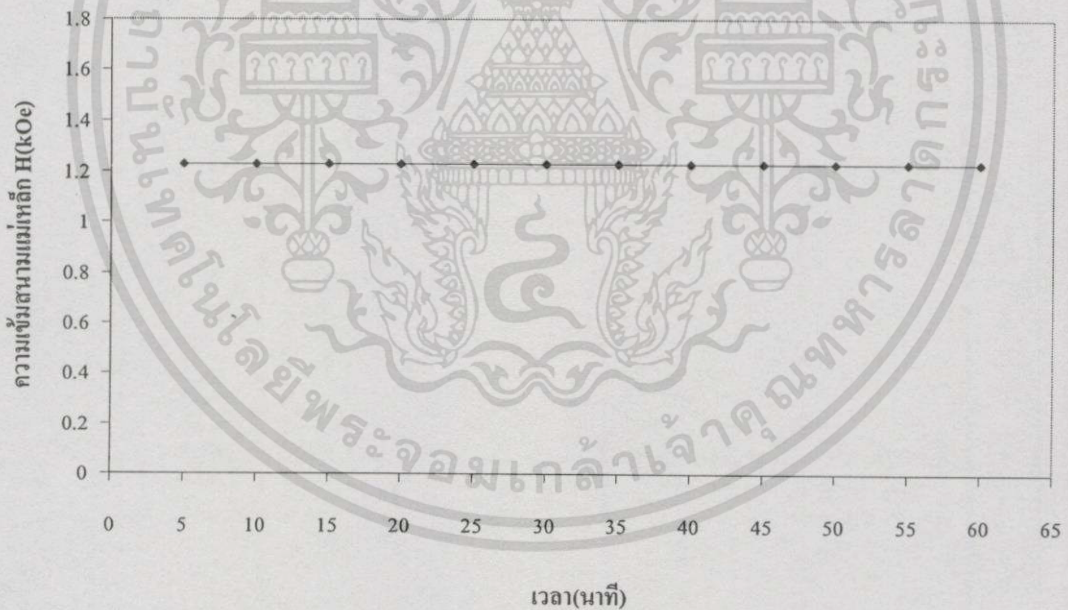
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9 พบว่าเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กตามที่ออกแบบที่ระยะระหว่างขั้ว 5.1 เซนติเมตรจะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดประมาณ 7 kOe ที่กระแส 12 แอมแปร์ ซึ่งเป็นที่สอดคล้องกับสมการที่ (4.5) กล่าวคือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดมากขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ในกรณีที่จำนวนรอบ N และระยะระหว่างขั้วมีคงที่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กได้โดยการเพิ่มกระแสให้กับขดลวดนั่นเอง กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดที่ค่าต่ำๆ จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสสูงขึ้นความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เป็นผลเนื่องจากการแมกนีโตเซชันของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็กเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว และผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเข้มสนามแม่เหล็กที่ กระแสไฟฟ้าต่างๆ จาก 1-12 แอมแปร์เทียบกับเวลา เพื่อทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กสนามที่วัดได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2 ถึง ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.2 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 และ 2 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า 1 A		กระแสไฟฟ้า 2 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	0.618	22.7	1.220	23.2
5	0.618	22.7	1.220	23.2
10	0.618	22.7	1.220	23.3
15	0.618	22.7	1.220	23.4
20	0.618	22.8	1.220	23.5
25	0.618	22.8	1.230	23.7
30	0.618	22.8	1.230	24.0
35	0.618	22.9	1.230	24.4
40	0.618	23.0	1.230	24.4
45	0.618	22.9	1.230	24.6
50	0.618	23.0	1.230	24.8
55	0.618	23.1	1.230	27.9
60	0.618	23.1	1.230	25.9



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 1 A



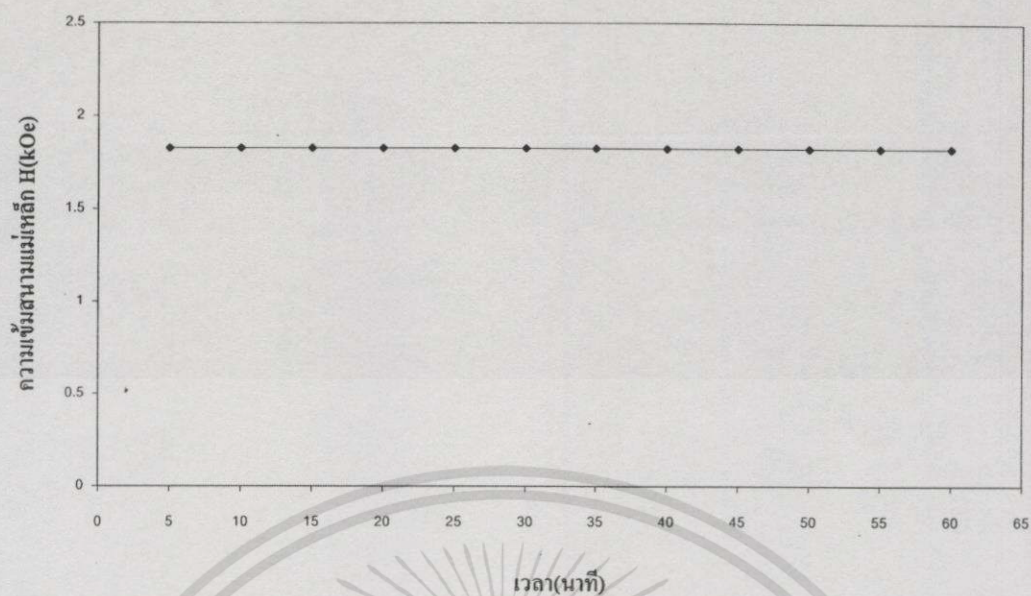
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 2 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

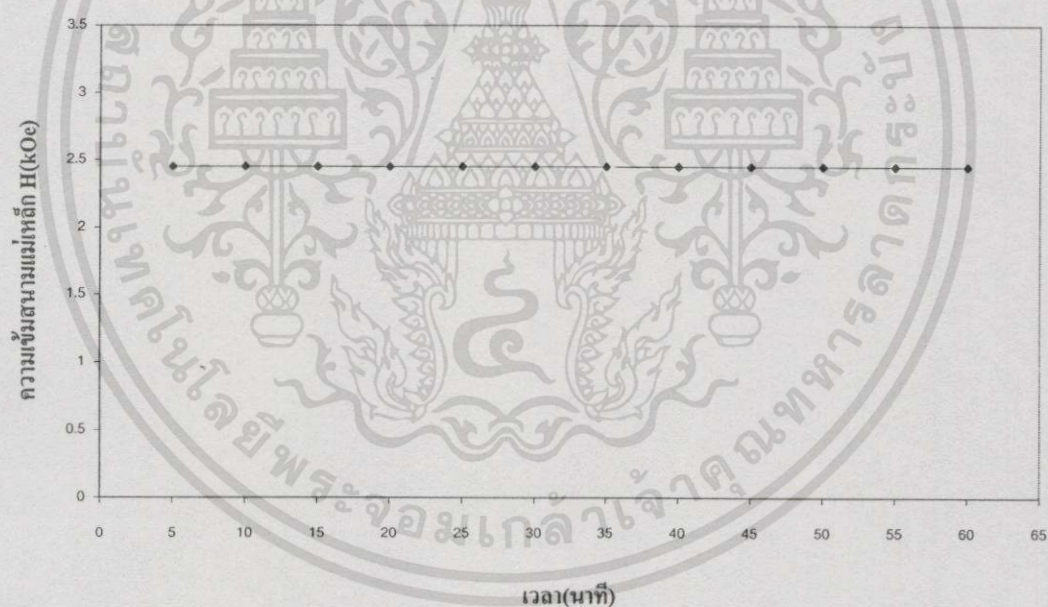
ตารางที่ 4.3 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 และ 4 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า 3 A		กระแสไฟฟ้า 4 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	1.830	25.4	2.450	24.8
5	1.830	25.4	2.450	24.8
10	1.830	25.7	2.450	25.3
15	1.830	26.0	2.450	25.8
20	1.830	26.2	2.530	26.1
25	1.830	26.4	2.430	26.4
30	1.830	26.6	2.430	26.9
35	1.830	26.8	2.430	27.1
40	1.830	27.1	2.430	27.5
45	1.830	27.2	2.430	28.0
50	1.830	27.4	2.430	28.4
55	1.830	27.7	2.430	28.8
60	1.830	27.9	2.430	29.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 3 A



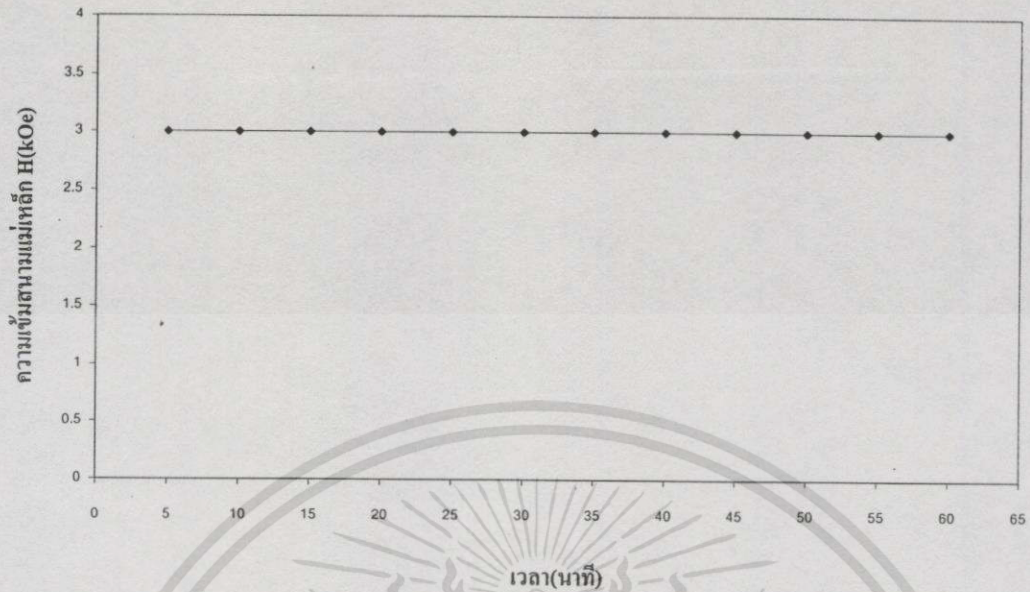
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 4 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 และ 6 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาท)	กระแสไฟฟ้า 5 A		กระแสไฟฟ้า 6 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	3.000	25.1	3.700	25.8
5	3.000	25.5	3.700	26.3
10	3.000	26.4	3.700	27.3
15	3.000	27.2	3.700	28.5
20	3.000	27.6	3.700	29.6
25	3.000	28.2	3.700	30.7
30	3.000	28.7	3.700	31.5
35	3.000	29.3	3.700	32.4
40	3.000	29.8	3.700	33.0
45	3.000	30.5	3.700	33.8
50	3.000	30.8	3.700	34.5
55	3.000	31.2	3.700	35.1
60	3.000	31.3	3.700	35.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 5 A

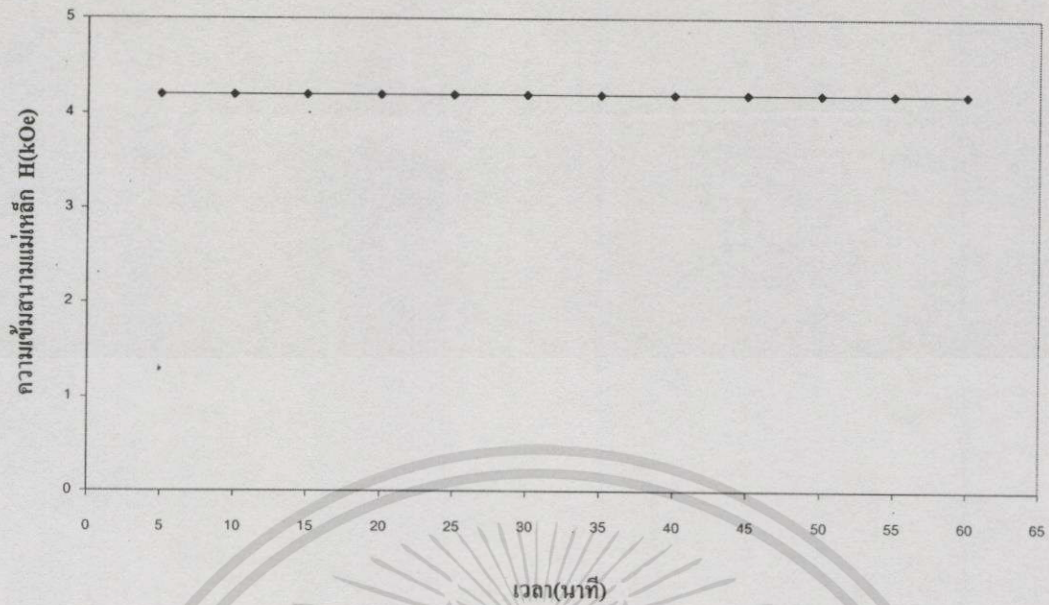


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง ที่กระแส 6 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 และ 8 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า 7 A		กระแสไฟฟ้า 8 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	4.200	26.0	4.700	26.5
5	4.200	26.3	4.700	27.1
10	4.200	27.8	4.700	28.9
15	4.200	28.8	4.700	30.9
20	4.200	29.8	4.700	32.1
25	4.200	30.8	4.700	33.3
30	4.200	31.6	4.700	34.8
35	4.200	32.6	4.700	36.2
40	4.200	33.3	4.700	37.6
45	4.200	34.3	4.700	38.6
50	4.200	35.1	4.700	39.8
55	4.200	35.7	4.700	40.6
60	4.200	36.5	4.700	41.6



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 7 A



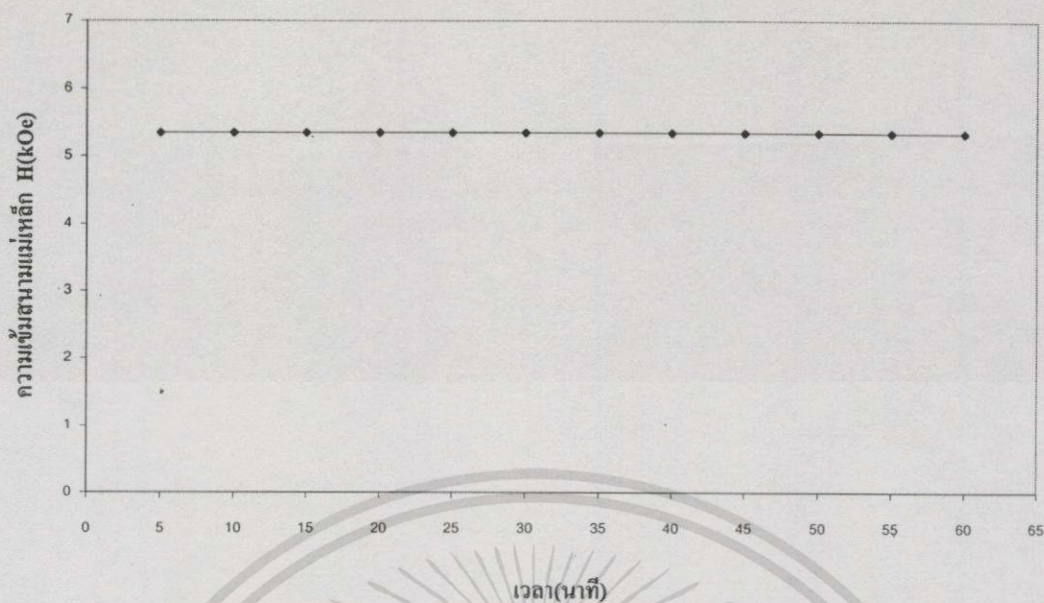
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 8 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

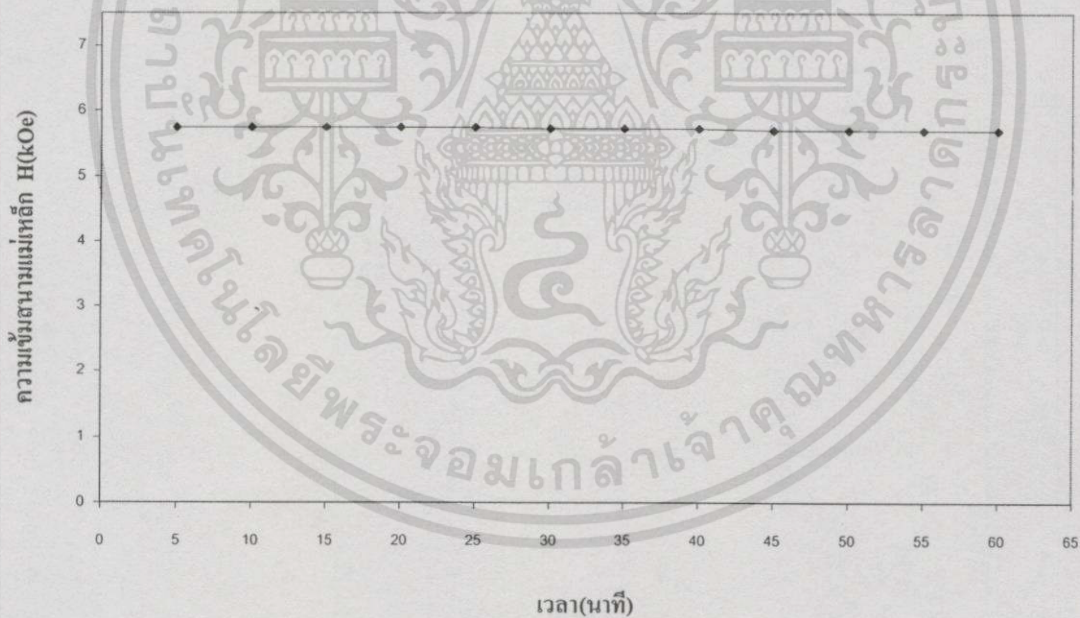
ตารางที่ 4.6 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 และ 10 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า 9 A		กระแสไฟฟ้า 10 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	5.350	24.3	5.750	26.9
5	5.350	25.3	5.750	28.3
10	5.350	27.4	5.750	30.9
15	5.350	29.6	5.750	33.1
20	5.350	31.3	5.750	35.8
25	5.350	33.3	5.750	37.6
30	5.350	35.1	5.750	39.7
35	5.350	37.1	5.730	41.8
40	5.350	38.6	5.730	44.0
45	5.350	40.6	5.700	45.5
50	5.350	41.8	5.700	47.7
55	5.350	43.1	5.700	48.9
60	5.350	45.0	5.700	50.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 9 A



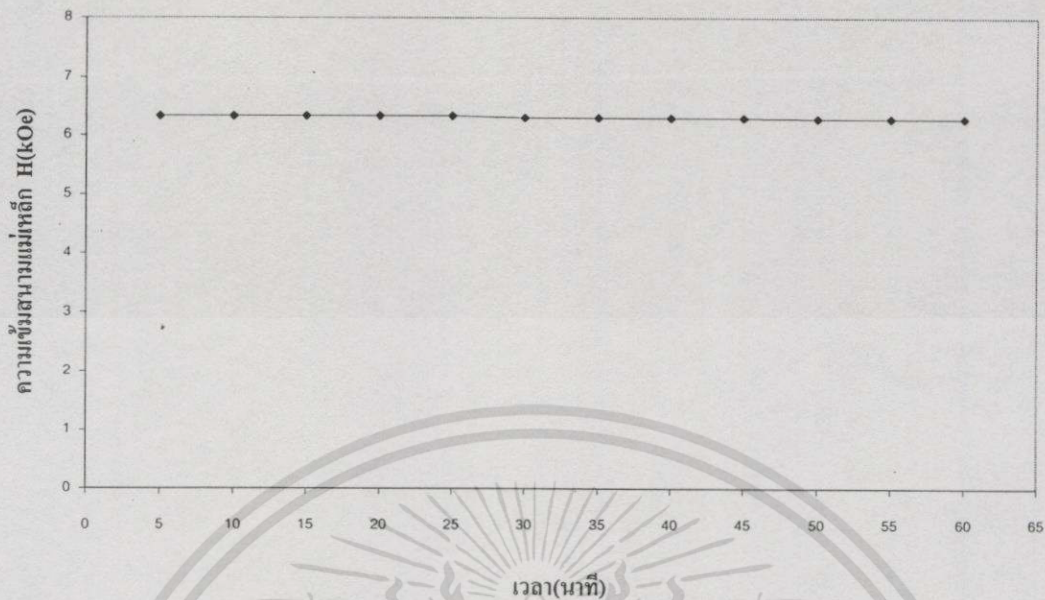
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 10 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 11 และ 12 แอมแปร์วัดเทียบกับเวลา 1 ชั่วโมง

เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า 11 A		กระแสไฟฟ้า 12 A	
	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$	ความเข้มสนาม แม่เหล็ก H (kOe)	อุณหภูมิขดลวด $T(^{\circ}C)$
0	6.330	24.2	6.750	24.8
5	6.330	25.5	6.750	26.0
10	6.330	28.6	6.750	30.3
15	6.330	31.8	6.740	34.4
20	6.330	34.2	6.730	38.8
25	6.330	36.7	6.730	41.3
30	6.300	39.4	6.720	44.1
35	6.300	41.9	6.650	47.1
40	6.300	44.0	6.550	49.8
45	6.300	46.2	6.470	52.3
50	6.290	48.3	6.400	54.0
55	6.290	50.7	6.350	56.0
60	6.290	52.5	6.250	57.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 11 A



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมง กระแส 12 A

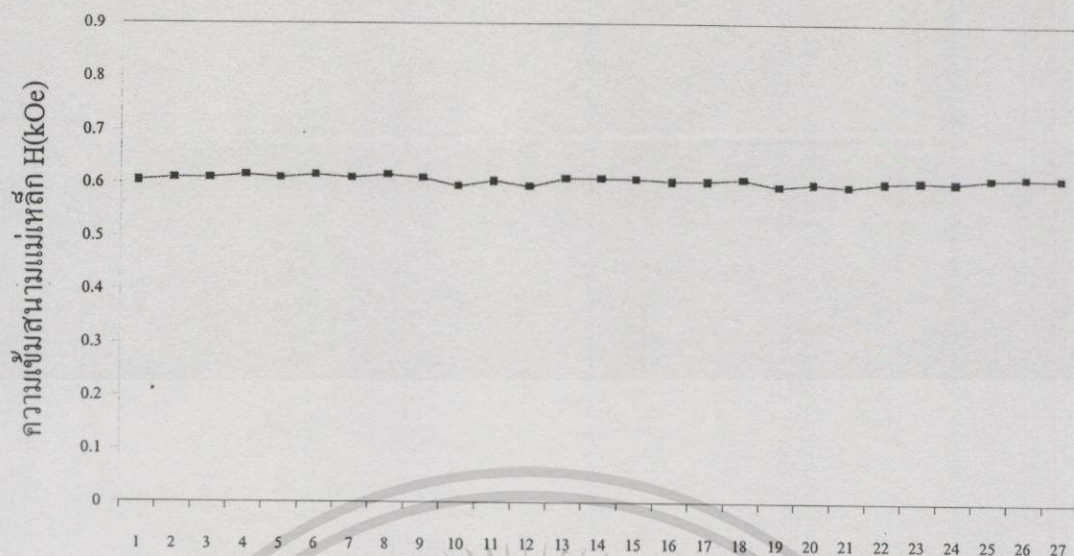
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นแม่เหล็กกับเวลาทุกๆ 5 นาทีใน 1 ชั่วโมงวัดเทียบกับกระแส 1-12 แอมแปร์พบว่าที่ กระแส 1-9 แอมแปร์ความเข้มข้นแม่เหล็กที่วัดได้มีค่าที่เมื่อเทียบกับเวลา ส่วนที่กระแส 10-12 แอมแปร์ความเข้มข้นแม่เหล็กจะค่อยๆลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า(power supply) ที่ใช้เป็นแบบ DC Voltage Source ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่าย ให้ขดลวดของโวลท์ที่ค่ามากๆ ไม่คงที่ และมีลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการความเข้มข้น แม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอ ควรจะใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ DC Current Source เพราะ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ โวลท์มีค่ามากกว่าแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ DC Voltage Source และ ในการทดสอบความเข้มข้นแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก 5.1 เซนติเมตร ความเข้มข้น แม่เหล็ก ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กเพียงจุดเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่า เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องวัดสนามแม่เหล็กใน บริเวณที่ต้องการใช้งานจริง เพื่อความมั่นใจว่าสนามแม่เหล็กบริเวณที่ใช้งานตามที่ออกแบบมีความ สมบูรณ์ จำเป็นต้องทดสอบสนามแม่เหล็กจากบริเวณจุดศูนย์กลางขั้วแม่เหล็ก ไปในทิศทางแกน X แกน Y และแกน Z เพื่อดูว่าปริมาตรบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรตรงจุดกึ่งกลางระหว่าง ขั้วแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอจริง ในความเป็นจริงแล้วบริเวณที่ใช้งานจริงๆอยู่ในช่วงประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรเท่านั้น แต่เพื่อความน่าเชื่อถือของเครื่องมือจึงจำเป็นต้องทดสอบที่บริเวณโตกว่า บริเวณที่ใช้งานจริง และสนามแม่เหล็กที่วัดได้เทียบกับกระแสไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.22 ถึงรูป ที่ 4.31

ตารางที่ 4.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 และ 2 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก

จำนวนจุดในพื้นที่ ที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก	ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 1A (kOe)		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 A (kOe)	
	จุดที่ 1 และจุดที่ 2	0.605	0.610	1.215	1.220
จุดที่ 3 และจุดที่ 4	0.610	0.615	1.215	1.220
จุดที่ 5 และจุดที่ 6	0.610	0.615	1.220	1.220
จุดที่ 7 และจุดที่ 8	0.610	0.615	1.215	1.220
จุดที่ 9 และจุดที่ 10	0.610	0.595	1.215	1.190
จุดที่ 11 และจุดที่ 12	0.605	0.595	1.200	1.190
จุดที่ 13 และจุดที่ 14	0.610	0.610	1.215	1.220
จุดที่ 15 และจุดที่ 16	0.608	0.605	1.215	1.220
จุดที่ 17 และจุดที่ 18	0.605	0.608	1.215	1.210
จุดที่ 19 และจุดที่ 20	0.595	0.600	1.200	1.210
จุดที่ 21 และจุดที่ 22	0.595	0.603	1.200	1.215
จุดที่ 23 และจุดที่ 24	0.605	0.603	1.215	1.215
จุดที่ 25 และจุดที่ 26	0.610	0.612	1.215	1.220
จุดที่ 27	0.610		1.220	
เฉลี่ย	0.606		1.212	
ความคลาดเคลื่อน	± 0.002		± 0.003	
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.388%		± 0.258%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 1 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว



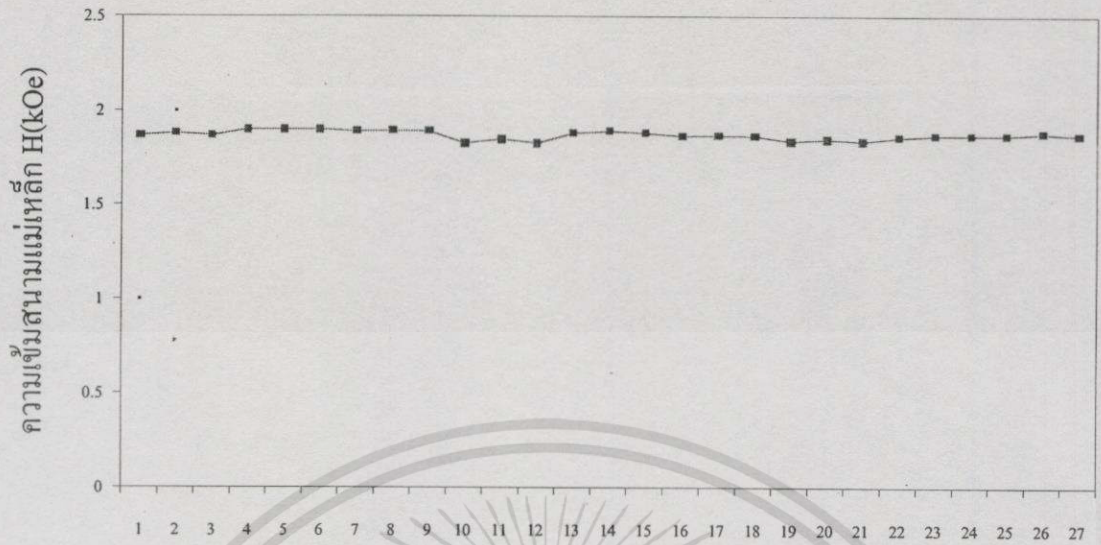
รูปที่ 4.23 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 2 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 และ 4 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก

จำนวนจุดในพื้นที่ ที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก	ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 3 A (kOe)		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 4 A (kOe)	
	จุดที่ 1 และจุดที่ 2	1.870	1.880	2.390	2.400
จุดที่ 3 และจุดที่ 4	1.870	1.900	2.390	2.410
จุดที่ 5 และจุดที่ 6	1.900	1.900	2.420	2.410
จุดที่ 7 และจุดที่ 8	1.890	1.895	2.410	2.410
จุดที่ 9 และจุดที่ 10	1.890	1.830	2.410	2.370
จุดที่ 11 และจุดที่ 12	1.850	1.830	2.380	2370
จุดที่ 13 และจุดที่ 14	1.880	1.890	2.410	2.410
จุดที่ 15 และจุดที่ 16	1.880	1.865	2.410	2.400
จุดที่ 17 และจุดที่ 18	1.870	1.865	2.400	2.400
จุดที่ 19 และจุดที่ 20	1.840	1.850	2.380	2.390
จุดที่ 21 และจุดที่ 22	1.840	1.860	2.380	2.410
จุดที่ 23 และจุดที่ 24	1.870	1.870	2.420	2.410
จุดที่ 25 และจุดที่ 26	1.870	1.880	2.410	2.420
จุดที่ 27	1.870		2.410	
เฉลี่ย	1.871		2.401	
ความคลาดเคลื่อน	± 0.008		± 0.006	
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.420%		± 0.236%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
รูปที่ 4.24 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 3 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

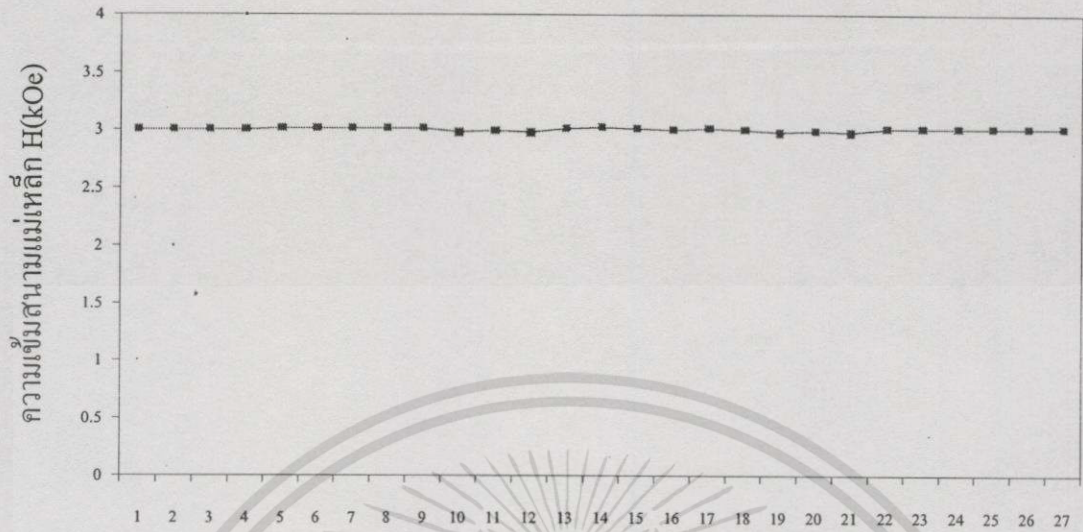


จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
รูปที่ 4.25 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 4 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

ตารางที่ 4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 และ 6 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก

จำนวนวัดในพื้นที่ ที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก	ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 5 A (kOe)		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 6 A (kOe)	
	จุดที่ 1 และจุดที่ 2	3.000	3.000	3.560	3.580
จุดที่ 3 และจุดที่ 4	3.000	3.010	3.560	3.610
จุดที่ 5 และจุดที่ 6	3.010	3.010	3.620	3.610
จุดที่ 7 และจุดที่ 8	3.010	3.010	3.600	3.610
จุดที่ 9 และจุดที่ 10	3.010	2.980	3.600	3.510
จุดที่ 11 และจุดที่ 12	2.990	2.980	3.530	3.510
จุดที่ 13 และจุดที่ 14	3.010	3.020	3.600	3.610
จุดที่ 15 และจุดที่ 16	3.010	3.000	3.600	3.570
จุดที่ 17 และจุดที่ 18	3.010	3.000	3.580	3.570
จุดที่ 19 และจุดที่ 20	2.980	2.990	3.530	3.550
จุดที่ 21 และจุดที่ 22	2.980	3.010	3.530	3.580
จุดที่ 23 และจุดที่ 24	3.010	3.010	3.600	3.580
จุดที่ 25 และจุดที่ 26	3.010	3.010	3.600	3.610
จุดที่ 27	3.010		3.600	
เฉลี่ย	3.003		3.586	
ความคลาดเคลื่อน	± 0.004		± 0.019	
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.149%		± 0.530%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 4.26 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 5 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว



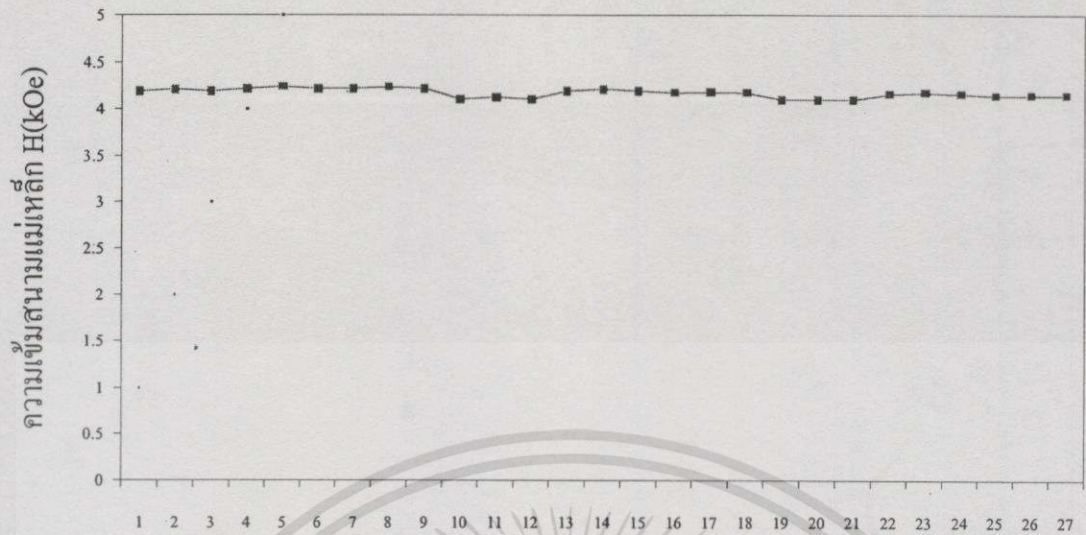
จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 4.27 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 6 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

ตารางที่ 4.11 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 และ 8 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์
เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก

จำนวนจุดในพื้นที่ ที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก	ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 7 A (kOe)		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 8 A (kOe)	
	จุดที่ 1 และจุดที่ 2	4.190	4.210	4.770	4.790
จุดที่ 3 และจุดที่ 4	4.190	4.220	4.770	4.820
จุดที่ 5 และจุดที่ 6	4.240	4.220	4.830	4.820
จุดที่ 7 และจุดที่ 8	4.220	4.230	4.820	4.830
จุดที่ 9 และจุดที่ 10	4.220	4.110	4.820	4.720
จุดที่ 11 และจุดที่ 12	4.130	4.110	4.740	4.720
จุดที่ 13 และจุดที่ 14	4.190	4.210	4.830	4.850
จุดที่ 15 และจุดที่ 16	4.190	4.170	4.830	4.800
จุดที่ 17 และจุดที่ 18	4.180	4.170	4.810	4.800
จุดที่ 19 และจุดที่ 20	4.100	4.110	4.720	4.740
จุดที่ 21 และจุดที่ 22	4.100	4.160	4.720	4.720
จุดที่ 23 และจุดที่ 24	4.170	4.160	4.820	4.800
จุดที่ 25 และจุดที่ 26	4.140	4.150	4.810	4.820
จุดที่ 27	4.150		4.800	
เฉลี่ย	4.172		4.793	
ความคลาดเคลื่อน	± 16.436		± 15.499	
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.394%		± 0.323%	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
รูปที่ 4.28 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 7 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว



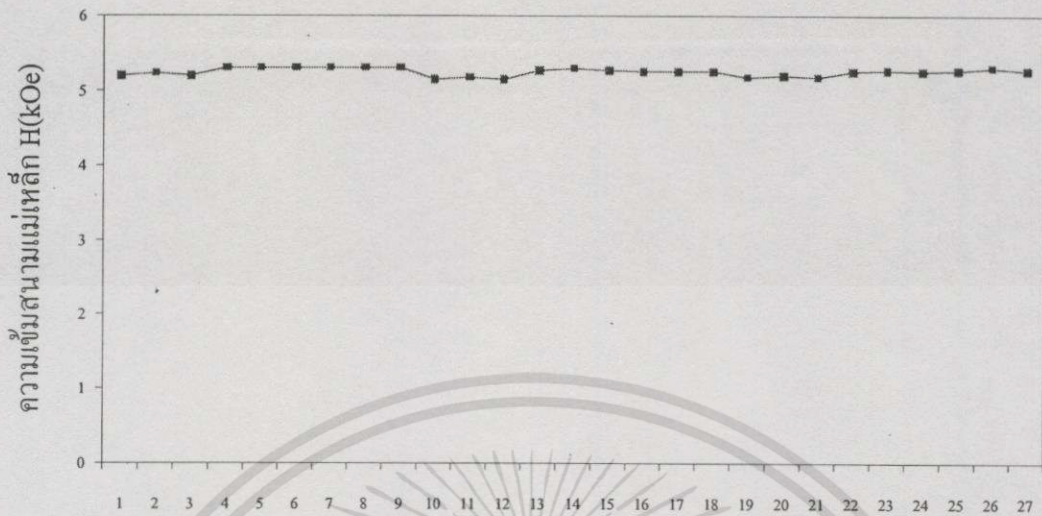
รูปที่ 4.29 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 8 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 และ 10 แอมแปร์ในบริเวณพื้นที่ 8 ลูกบาศก์
เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก

จำนวนจุดในพื้นที่ ที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก	ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 9 A (kOe)		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 10 A (kOe)	
	จุดที่ 1 และจุดที่ 2	5.200	5.230	5.750	5.770
จุดที่ 3 และจุดที่ 4	5.200	5.300	5.750	5.830
จุดที่ 5 และจุดที่ 6	5.300	5.300	5.850	5.830
จุดที่ 7 และจุดที่ 8	5.300	5.300	5.800	5.830
จุดที่ 9 และจุดที่ 10	5.300	5.150	5.800	5.650
จุดที่ 11 และจุดที่ 12	5.170	5.150	5.670	5.650
จุดที่ 13 และจุดที่ 14	5.270	5.290	5.770	5.800
จุดที่ 15 และจุดที่ 16	5.270	5.250	5.770	5.750
จุดที่ 17 และจุดที่ 18	5.250	5.250	5.770	5.750
จุดที่ 19 และจุดที่ 20	5.170	5.200	5.670	5.700
จุดที่ 21 และจุดที่ 22	5.170	5.250	5.670	5.750
จุดที่ 23 และจุดที่ 24	5.270	5.250	5.770	5.750
จุดที่ 25 และจุดที่ 26	5.270	5.300	5.770	5.800
จุดที่ 27	5.270		5.770	
เฉลี่ย	5.246		5.757	
ความคลาดเคลื่อน	± 0.019		± 21.664	
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.375%		± 0.376	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
รูปที่ 4.30 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 9 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว



จำนวนจุดในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
รูปที่ 4.31 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระแส 10 A ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร
บริเวณจุดกึ่งกลางขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 ถึง ตารางที่ 12 และรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.31 ที่แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้นวัดเทียบกับกระแสไฟฟ้า 1 – 10 แอมแปร์ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กพบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้มีความสม่ำเสมอ และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ (0 – 5)%

4.2 ขดลวดเกรเดียนท์

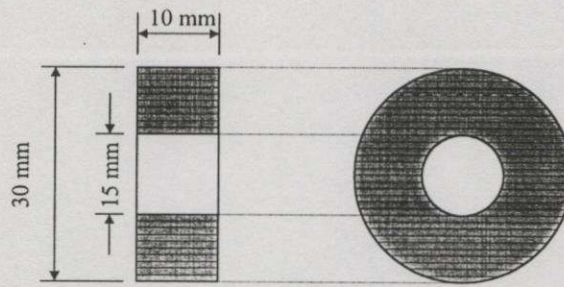
ในส่วนของขดลวดเกรเดียนท์ เป็นตัวกำเนิดสนามเกรเดียนท์หรือสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอแปรตามระยะทางซึ่งเป็นหัวใจสำคัญ ในการวัด โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของขดลวดโซลินอยด์เป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก กล่าวคือเมื่อมีกระแสในลวดตัวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามจะเป็นวงกลมล้อมรอบเส้นลวดตัวนำในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของเส้นลวด สนามภายนอกลวดตัวนำที่ระยะ r ใดๆ ในหน่วยเซนติเมตรที่ห่างจากเส้นลวดตัวนำจะมีดังสมการ

$$\vec{H} = \frac{2i}{10r} Oe \quad (4.13)$$

โดยที่ i เป็นกระแสในหน่วยแอมแปร์ และสนามมีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวาซึ่งจะหมุนเปลี่ยนไปตามทิศของกระแสไฟฟ้า และถ้านำลวดตัวนำมีกระแสไหลม้วนเป็นวงกลมให้รัศมี R เซนติเมตร สนามแม่เหล็กตรงศูนย์กลางของลูปของขดลวดจะได้เป็น

$$\vec{H} = \frac{2\pi i}{10R} Oe \quad (4.14)$$

สมการที่(4.14) แสดงสนามที่เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดโซลินอยด์จำนวนหนึ่งรอบ แต่ในการออกแบบขดลวดเกรเดียนท์จะพิจารณาจำนวน N รอบ นั่นคือ สนามที่ได้จะมีจำนวน N เท่าของจำนวนหนึ่งรอบ โดยลักษณะขดลวดเกรเดียนท์ที่ได้ออกแบบแสดงจะมีทั้งหมด 2 คู่จำนวน 4 ขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.32 สนามเกรเดียนท์เกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้กระแสไฟฟ้ากับขดลวดทั้งสองคู่ โดยแต่ละคู่จะให้กระแสในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ของขดลวดมีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ตรงกันข้ามกัน และเมื่อทำการวัดสนามเทียบกับระยะทางของขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงกับระยะทางทำให้เกิดสนามเกรเดียนท์ขึ้น และสนามเกรเดียนท์จะมากหรือน้อยก็ขึ้นกับกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเกรเดียนท์ทั้งคู่ แสดงดังรูปที่ 4.33

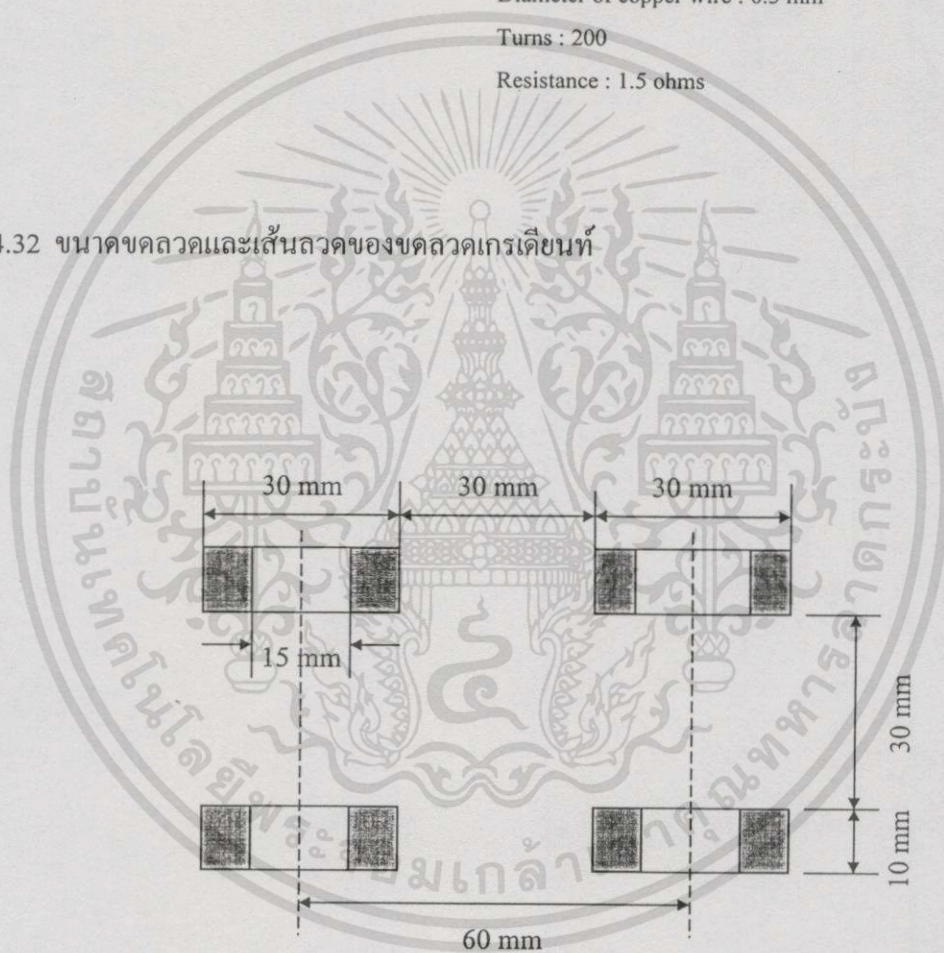


Diameter of copper wire : 0.5 mm

Turns : 200

Resistance : 1.5 ohms

รูปที่ 4.32 ขนาดขดลวดและเส้นลวดของขดลวดเกรเดียนท์



รูปที่ 4.33 โครงสร้างของชุดขดลวดสร้างสนามเกรเดียนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



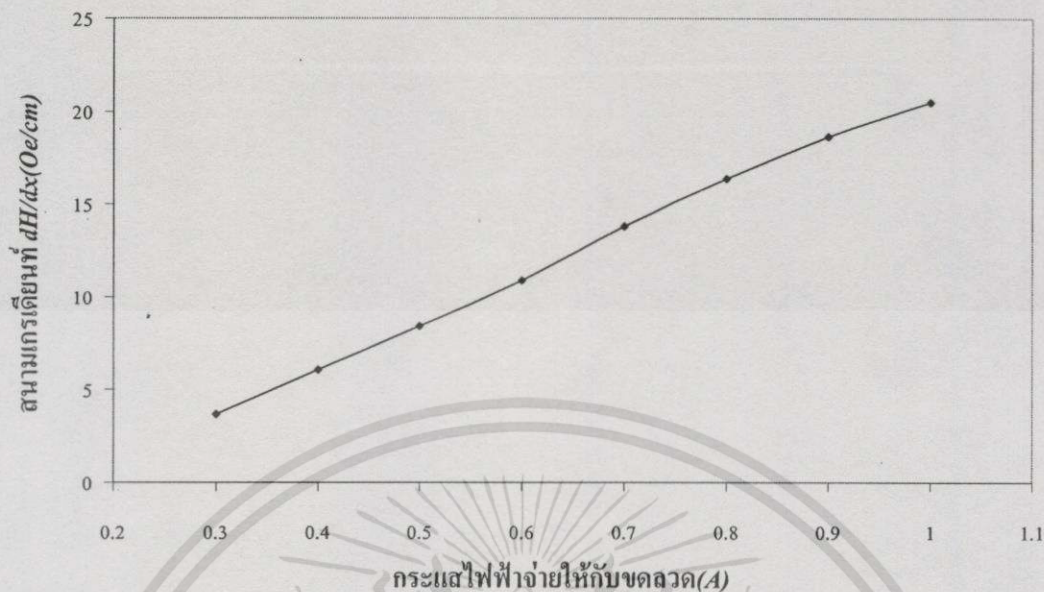
รูปที่ 4.34 ขดลวดจริงที่สร้างสนามเกรเดียนท์ที่สร้างขึ้น

จากโครงสร้างของขดลวดเกรเดียนท์ที่ออกแบบของเครื่องมือแมกนีโมเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ตามรูปที่ 4.33 วัดสนามเกรเดียนท์ที่วัดได้เทียบกับสัญญาณกระแสสลับที่ป้อนให้กับขดลวดเกรเดียนท์แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.35

ตารางที่ 4.13 ความเข้มสนามเกรเดียนท์เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับ ขดลวดเกรเดียนท์ (A)	สนามเกรเดียนท์ $\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) \frac{Oe}{cm}$
0.3 A	3.667
0.4 A	6.083
0.5 A	8.417
0.6 A	10.917
0.7 A	13.833
0.8 A	16.417
0.9 A	18.667
1.0 A	20.500

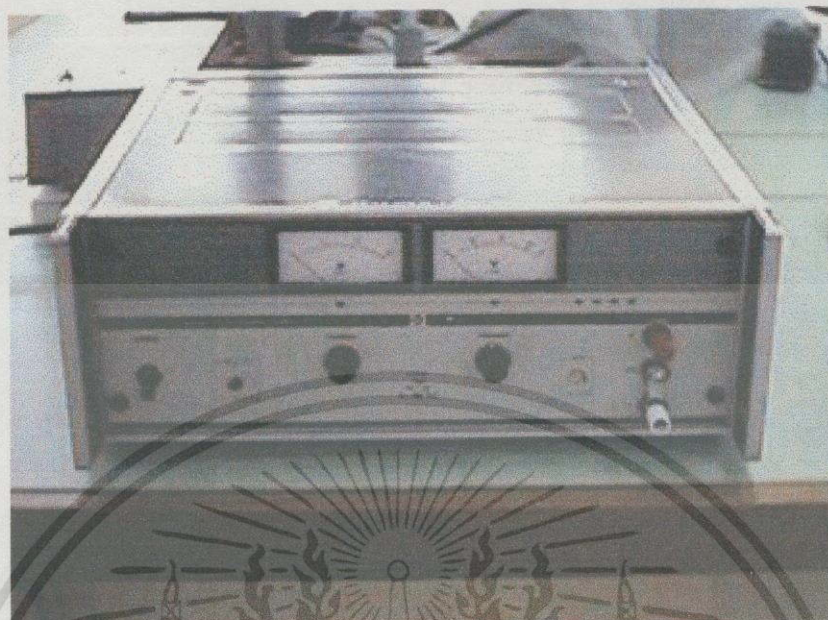
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



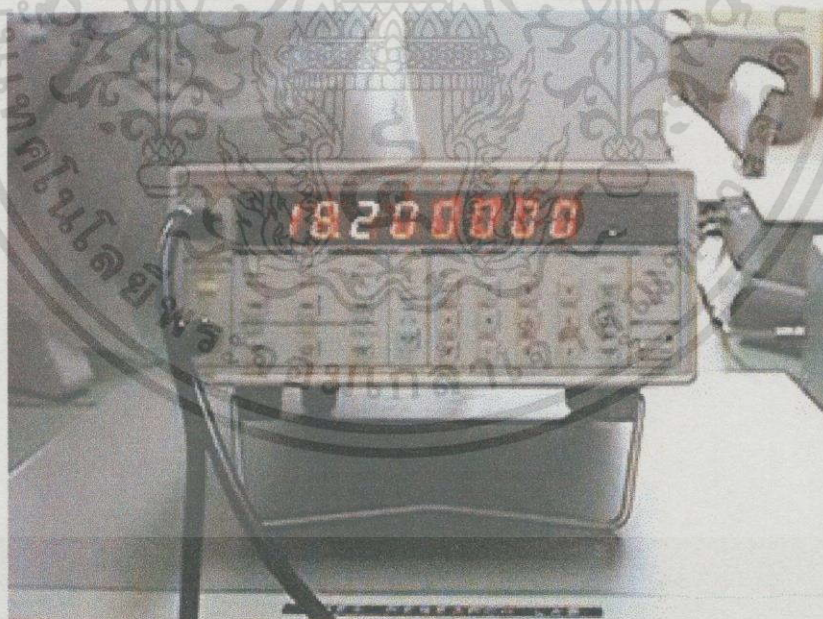
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามเกรเดียนท์กับกระแสไฟฟ้า

4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอีกชิ้นหนึ่งของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ เพราะว่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้ขึ้นขึ้นกับการให้กระแสกับขดลวด และในกรณีที่ต้องการสนามแม่เหล็กแม่เหล็กที่มีสูงๆ จำเป็นต้องอย่างยั้งที่ต้องทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีมากๆ ด้วย และ ในส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็กของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตโดยบริษัท KIKUSUI ELECTRONICS CORPORATION รุ่น PAD70-15L แสดงดังรูปที่ 4.36 ในส่วนที่สองจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสสลับที่ป้อนให้ขดลวดเกรเดียนท์เพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์ ประกอบด้วยสามส่วนที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) และแหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) ซึ่งทั้งสามส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญในการสร้างสนามเกรเดียนท์ ในส่วนของตัวกำเนิดสัญญาณจะใช้เครื่องมือที่ผลิตโดย บริษัท STANFORD RESEARCH SYSTEM รุ่น DS345 (SYNTHESIZED FUNCTION GENERATOR) แสดงดังรูปที่ 4.37 และส่วนของตัวขยายสัญญาณจะใช้ของบริษัท NIPPON AMERICA รุ่น GM-3900 (HIGH POWER AMPLIFIER) ดังรูปที่ 4.38 และแหล่งจ่ายจะใช้ของบริษัท TEKTRONIX รุ่น PS (DC POWER SUPPLY) แสดงดังรูปที่ 4.39

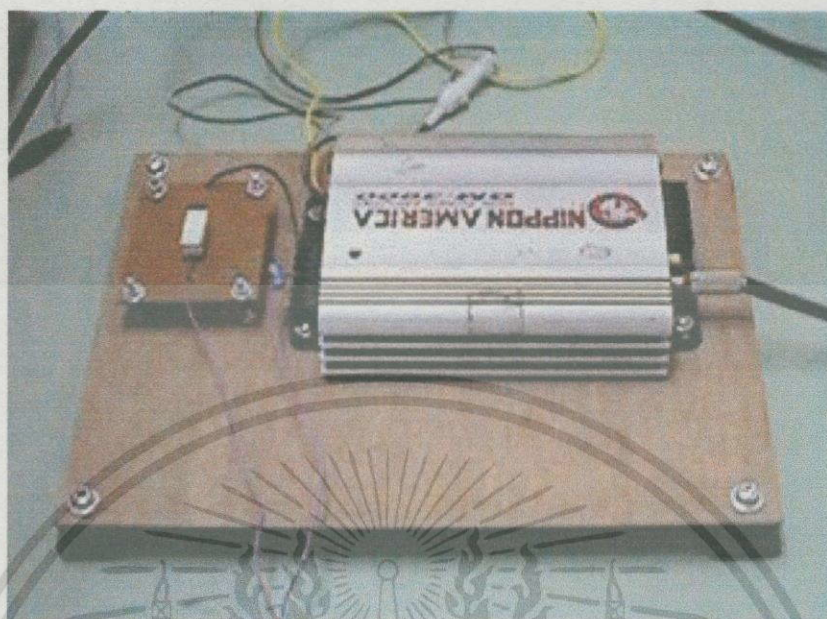


รูปที่ 4.36 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น PAD70 - 15 L



รูปที่ 4.37 ตัวกำเนิดสัญญาณและความถี่ รุ่น DS345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ตัวขยายสัญญาณ รุ่น GM-3900



รูปที่ 4.39 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น PS280

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวัดสัญญาณ X และ Y

เนื่องจากเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เคียนท์เป็นการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์รี ดังนั้น สัญญาณที่ต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงเพื่อที่จะนำแสดงผลในด้านแกน X ของกราฟฮีสเตอร์ซิสซึ่งในส่วนนี้จะได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก(Gauss meter) ของบริษัท YOKOGAWA รุ่น 3251 โดยใช้ฮอลล์โพรบในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 สัญญาณส่วนที่สองที่ต้องการวัดคือโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งจะวัดได้จากแอมพลิฟิเคชันของสารแม่เหล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ฟิล์มบีซีโซโหมบทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดการสั่นของตัวอย่างสารแม่เหล็ก โดยคุณสมบัติการโค้งงอของฟิล์มบีซีโซโหมบจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันเกิดขึ้น และในงานวิจัยนี้จะใช้ฟิล์มบีซีโซโหมบประกบติดกับแท่นยึดจับชิ้นงาน ทำให้สามารถตรวจวัดแอมพลิฟิเคชันได้แสดงดังรูปที่ 4.42 แต่จำเป็นต้องตรวจวัดสัญญาณแอมพลิฟิเคชันของการสั่นเฉพาะความถี่เดียวกันกับความถี่ที่ป้อนให้สารแม่เหล็กเกิดการสั่นเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวขยายแบบล็อกอินซึ่งมีคุณสมบัติวัดสัญญาณที่ความถี่ที่กำหนดได้เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องขยายแบบล็อกอินของบริษัท STANFORD RESEARCH SYSTEM รุ่น SR380 DSP แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.40 ลักษณะของฮอลล์โพรบของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น 3251

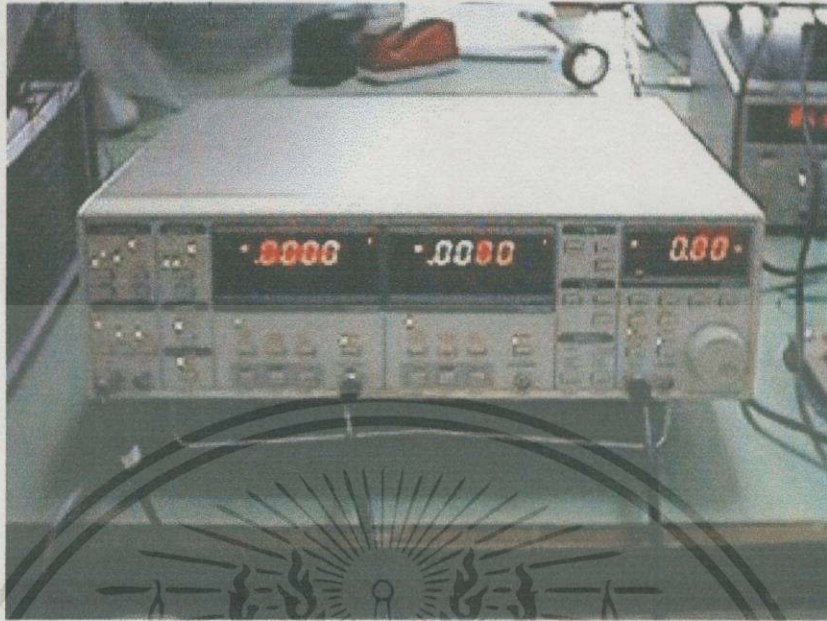


รูปที่ 4.41 เครื่องวัดความเข้มข้นแม่เหล็กด้วยเกาส์มิเตอร์ รุ่น 3251



รูปที่ 4.42 ลักษณะของฟิล์มปิโซโหมบที่ใช้ในการตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



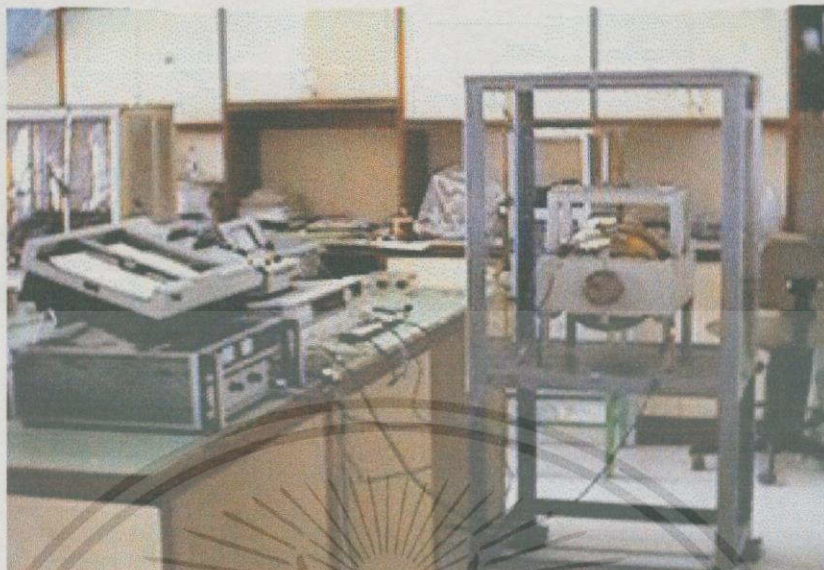
รูปที่ 4.43 ชุดขยายสัญญาณแบบล็อกอิน รุ่น SR 830 DSP

4.5 ส่วนแสดงผลข้อมูล



รูปที่ 4.44 ตัวแสดงผลแบบ X-Y รุ่น 3025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ประกอบเข้าเป็นชุดวัด

จากโครงสร้างของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ ส่วนที่ใช้แสดงผล คือ ส่วนที่แสดงเป็นกราฟรูปฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็ก จะใช้เครื่องมือแสดงผลแบบ XY ของบริษัท YOKOGAWA รุ่น 3025(X-Y RECORDER) แสดงดังรูปที่ 4.44 โดยสัญญาณที่แสดงผลทางด้านแกน Y ได้จากเอาต์พุทของเครื่องขยายแบบล็อก รุ่น SR 830 DSP และสัญญาณที่แสดงผลทางด้านแกน X ได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น 3251 เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก ขดลวดเคอร์เดียนท์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ การวัดสัญญาณ X และ Y และส่วนแสดงผลของข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.45

บทที่ 5

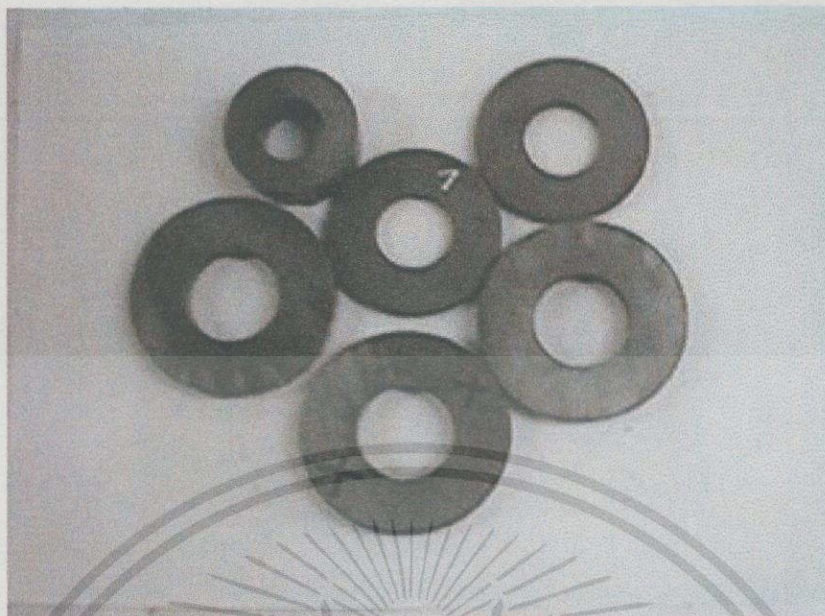
การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้กล่าวถึงหลักการทํางานและส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือแมกนีโทมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์มาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง ในการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้เครื่องมือแมกนีโทมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์กับสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็ก โดยในการทดลองจะวางสารตัวอย่างระหว่างสนามเกรเดียนท์กระแสลัดที่วางซ้อนทับบนสนามแม่เหล็กกระแสตรงที่มีระยะระหว่างขั้ว 5.1 เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก และเครื่องมือแมกนีโทมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดสอบกับสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กที่ใช้ในการผลิตลำโพงซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทซูมิมางิเนะ(ประเทศไทย)จำกัด และสารตัวอย่างที่เป็นฮาร์ดดิสก์จากบริษัทซีเกท(ประเทศไทย)จำกัด สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 มวลและความหนาแน่นของสารแม่เหล็กลำโพงที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างสารแม่เหล็กลำโพง ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Sr}$)	มวล(g)	ความหนาแน่น(g/cm^3)
1.#001	0.0648	4.967
2.#002	0.0626	4.987
3.#003	0.0640	4.969
4.#004	0.0643	4.989
5.#005	0.0611	5.021
6.#006	0.0625	4.958
7.#007	0.0612	4.910
8.#008	0.0628	4.973
9.#009	0.0641	4.923
10.#010	0.0634	4.947
11.#011	0.0637	4.974

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



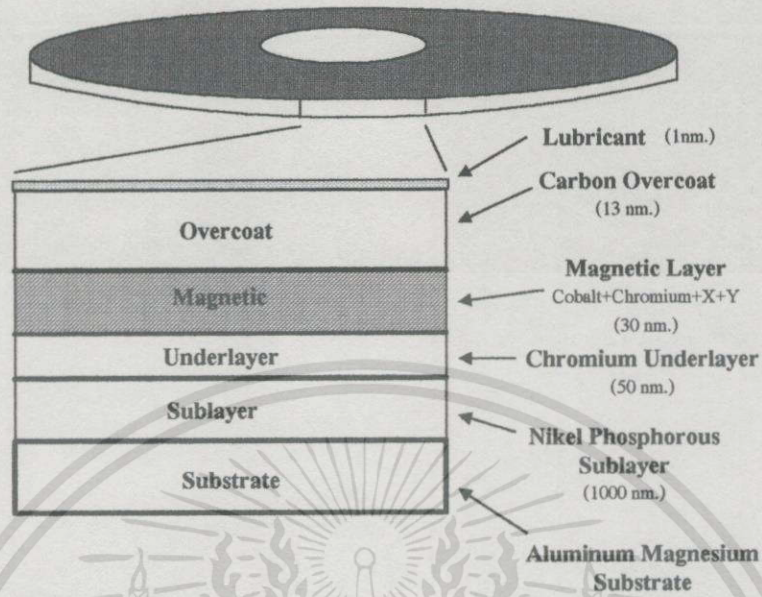
รูปที่ 5.1 ลักษณะของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพงที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 ขนาด และมวลของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบ

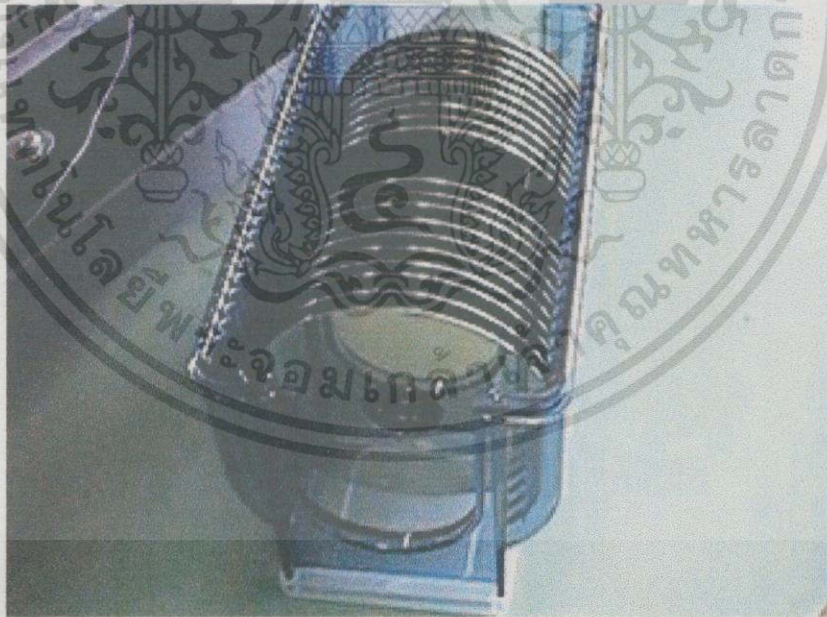
ตัวอย่าง	ความหนา (mm)	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	มวล (g)	ลักษณะรูปร่าง
1. RD#1	0.75	6.65	4.40	0.0653	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. RD#2	0.75	6.30	4.40	0.0612	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. RD#3	0.75	6.80	4.30	0.0634	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
4. RD#4	0.75	6.50	4.15	0.0625	สี่เหลี่ยมผืนผ้า
5. RD#5	0.75	6.25	4.30	0.0636	สี่เหลี่ยมผืนผ้า

ลักษณะของสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กฟิล์มบางที่อยู่ในรูปของฮาร์ดดิสก์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 เซนติเมตร ความหนา 0.750 เซนติเมตร ลักษณะผิวเรียบ มัน วาว ลื่น ผิวด้านบนสุดเป็นสารเคลือบเพื่อความลื่น และเรียบหนา 1 นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ชั้นถัดไปเคลือบคาร์บอนหนา 13 นาโนเมตร เพื่อป้องกันชั้นฟิล์มบาง ต่อด้วยชั้นของฟิล์มแม่เหล็กหนาประมาณ 30 นาโนเมตร ประกอบด้วยสารโคบอลต์-โครเมียม-และองค์ประกอบอีก 2 ชนิด ต่อด้วยชั้นของโครเมียมหนา 50 นาโนเมตร และนิเกิลฟอสฟอรัสหนา 1000 นาโนเมตร บนสารตั้งต้นเพื่อความแข็งแรงด้วยอะลูมิเนียมแมกนีเซียม ส่วนประกอบที่สำคัญและลักษณะของฮาร์ดดิสก์แสดงดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวอย่างฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 5.3 ลักษณะของตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ขั้นตอนการทดลอง

ในการวัดกราฟฮีสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กโดยเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์อัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่พัฒนาขึ้นมีขั้นตอนการวัดดังต่อไปนี้

5.1.1 คิดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.1 แล้วนำสารตัวอย่างที่ต้องการวัดกราฟฮีสเตอร์ิซิสมาหาปริมาตรโดยการชั่งน้ำหนักและหาความหนาแน่นแล้วนำไปยัดติดกับบริเวณปลายที่จับชิ้นงานโดยใช้กาวหรือเทปกาว แล้ววางระหว่างสนามเคอร์เดียนท์กระแสสลับที่วางซ้อนทับอยู่บนสนามแม่เหล็กกระแสตรง

5.1.2 เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยกำหนดให้มีความถี่ 13.2 Hz แอมพลิจูด $0.10 V_{pp}$ สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กกล้าโพง และความถี่ 20.2 Hz แอมพลิจูด $3.03 V_{pp}$ สำหรับสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์

5.1.3 เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องขยายสัญญาณเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าตามสัญญาณที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามเคอร์เดียนท์

5.1.4 เปิดเครื่องขยายสัญญาณแบบลือกอิน เครื่องบันทึกผลแบบ XY และเครื่องกำเนิดกระแสตรง

5.1.5 ทำการการเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นอย่างช้าๆ โดยการเพิ่มกระแสให้แก่เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้สารตัวอย่างเกิดการแมกนีไต จนกระทั่งสารตัวอย่างเกิดการอิ่มตัว แล้วลดสนามแม่เหล็กลงอย่างช้าๆ โดยการลดกระแสที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจนเป็นศูนย์ จากนั้นก็ทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามขึ้นอย่างช้าๆ โดยการกลับทิศทางของการแสดท์ให้กับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจนกระทั่งสารตัวอย่างเกิดการอิ่มตัวในทิศทางตรงข้าม จากนั้นให้ลดสนามแม่เหล็กกลับทิศอย่างช้าๆ โดยการลดกระแสกลับทิศที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจนเป็นศูนย์ ก็จะได้เป็นกราฟฮีสเตอร์ิซิส

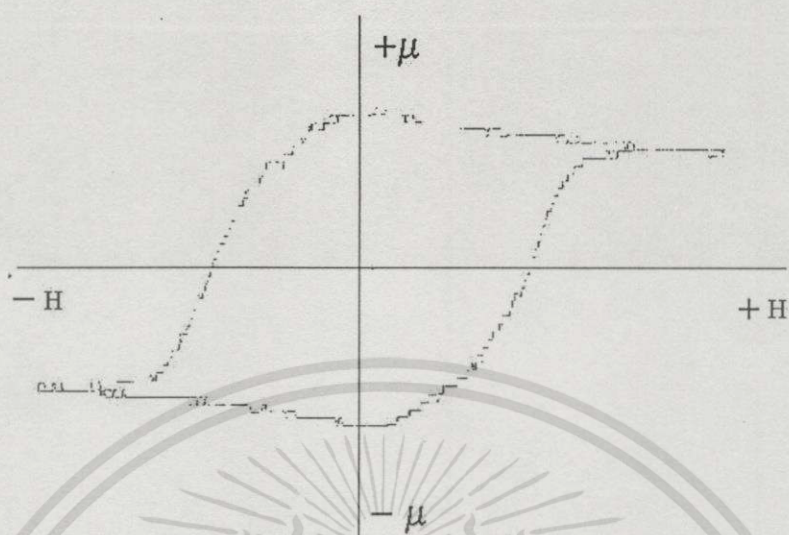
5.1.6 ทำการวัดแรงดันที่จุดตัดแกน X และจุดตัดแกน Y เพื่อนำไปคำนวณหาโมเมนต์แม่เหล็ก แมกนีไตเซชัน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก และสนามโคเออร์ซีวิต

5.2 ผลทดลอง

การทดลองวัดกราฟฮีสเตอร์ิซิสของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบควรมีขนาดและปริมาณใกล้เคียงกับสารตัวอย่างมาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนในการวัดให้น้อยที่สุดและทำการวัดที่เงื่อนไขเดียวกัน กล่าวคือ ที่ความถี่และสนามเคอร์เดียนท์เดียวกัน ผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001



รูปที่ 5.4 กราฟฮิสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.431	341	4.283	3.053
2	4.382	337	4.236	3.086
3	4.382	337	4.236	3.053
4	4.382	337	4.236	3.086
5	4.382	337	4.236	3.020
6	4.431	341	4.283	3.053
เฉลี่ย	4.398	338	4.252	3.059
ความคลาดเคลื่อน	± 0.021	± 1.713	± 0.020	± 0.020
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.470\%$	$\pm 0.507\%$	$\pm 0.466\%$	$\pm 0.663\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือ เครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.4 ดังต่อไปนี้

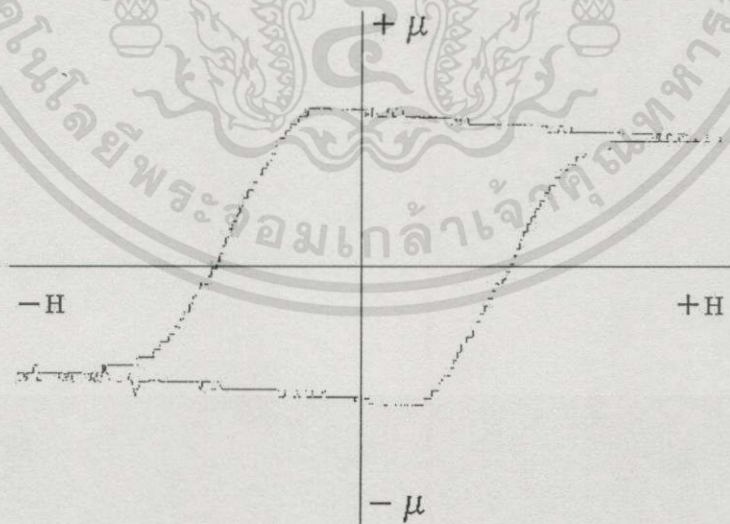
ตารางที่ 5.4 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่

ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และ

เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #001

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	4.252 ± 0.020	4.200	4.190
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)	3.059 ± 0.020	2.940	3.090

5.2.2 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #002



รูปที่ 5.5 กราฟฮิสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างแม่เหล็กกล้าโพง #002

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(\text{emu})$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(\text{emu}/\text{cm}^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(\text{KG})$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$
1	4.382	337	4.236	2.823
2	4.382	337	4.236	2.862
3	4.382	337	4.236	2.823
4	4.334	333	4.189	2.856
5	4.236	325	4.095	2.856
6	4.188	322	4.048	2.889
เฉลี่ย	4.317	332	4.173	2.852
ความคลาดเคลื่อน	± 0.069	± 5.477	± 0.067	± 0.020
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.609\%$	$\pm 1.650\%$	$\pm 1.610\%$	$\pm 0.722\%$

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือ เครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.6 ดังต่อไปนี้

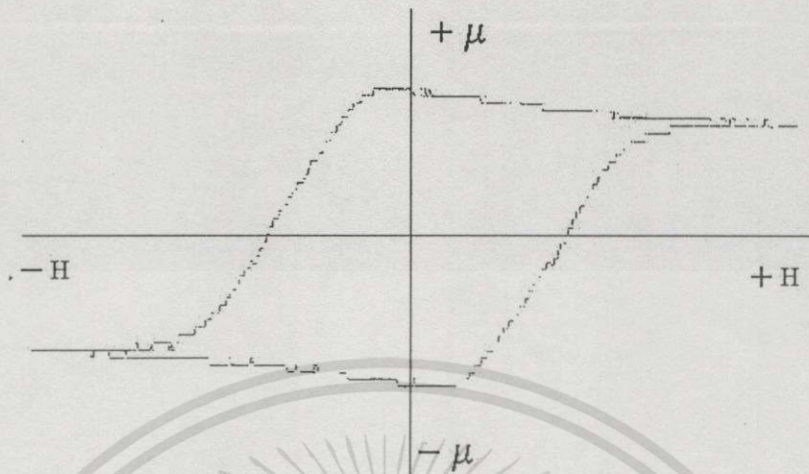
ตารางที่ 5.6 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่

ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #002

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(\text{KG})$	4.173 ± 0.067	3.960	4.320
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$	2.852 ± 0.020	2.770	2.790

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #003



รูปที่ 5.6 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #003

ตารางที่ 5.7 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #003

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก μ (emu)	แมกนีโตเซชันคงค้าง M_r (emu/cm ³)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	สนามโคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)
1	4.055	312	3.920	2.725
2	4.105	315	3.968	2.692
3	4.055	312	3.920	2.692
4	4.055	312	3.920	2.725
5	4.055	312	3.920	2.725
6	4.105	315	3.968	2.725
เฉลี่ย	4.072	313	3.936	2.714
ความคลาดเคลื่อน	± 0.021	± 1.265	± 0.020	± 0.014
%ความคลาดเคลื่อน	± 0.518%	± 0.404%	± 0.514%	± 0.513%

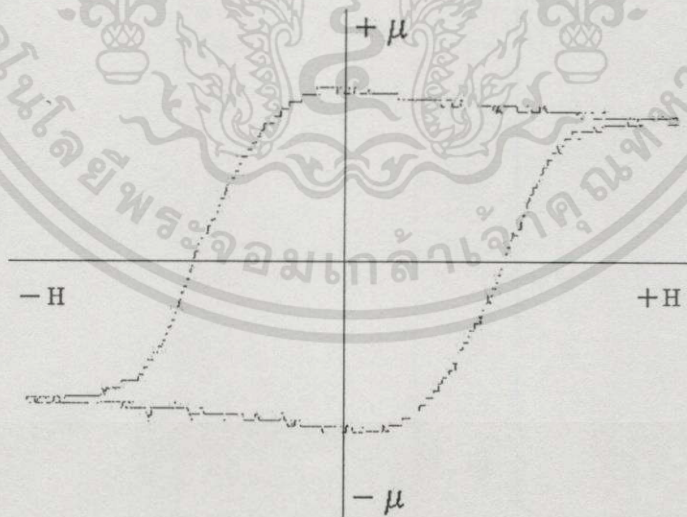
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ิซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #003

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	3.936 ± 0.020	3.810	4.260
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)	2.714 ± 0.014	2.790	2.730

5.2.4 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #004



รูปที่ 5.7 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #004

ตารางที่ 5.9 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #004

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(\text{emu})$	แมกนีไทเซชันคงค้าง $M_r(\text{emu/cm}^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(\text{KG})$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$
1	4.261	328	4.118	3.217
2	4.261	328	4.118	3.185
3	4.220	325	4.079	3.217
4	4.179	321	4.040	3.217
5	4.139	318	4.001	3.185
6	4.139	318	4.001	3.217
เฉลี่ย	4.200	323	4.060	3.206
ความคลาดเคลื่อน	± 0.046	± 3.795	± 0.044	± 0.013
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.090\%$	$\pm 1.175\%$	$\pm 1.081\%$	$\pm 0.421\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.10 ดังต่อไปนี้

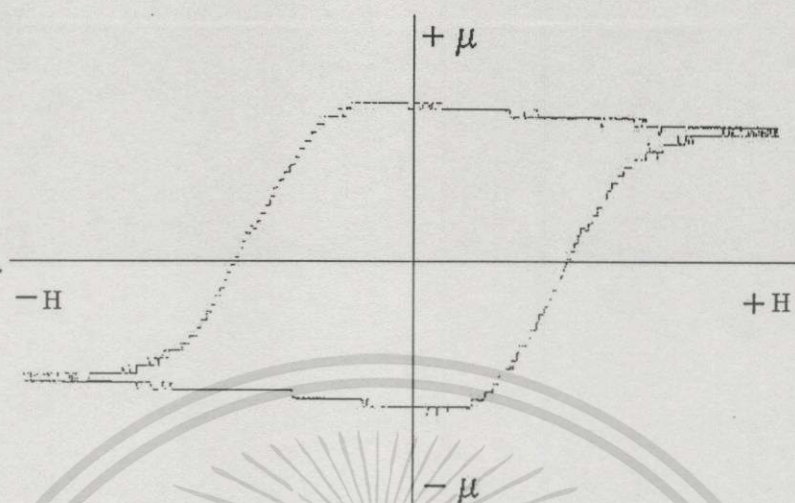
ตารางที่ 5.10 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c)

ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #004

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(\text{KG})$	4.060 ± 0.044	3.960	4.170
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$	3.206 ± 0.013	3.180	3.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #005



รูปที่ 5.8 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #005

ตารางที่ 5.11 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างรูปแม่เหล็กกล้าโพง #005

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก μ (emu)	แมกนีโตเซชันคงค้าง M_r (emu/cm ³)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	สนามโคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)
1	3.979	332	4.167	3.086
2	3.979	332	4.167	3.053
3	3.934	329	4.119	3.086
4	3.888	324	4.072	3.086
5	3.843	320	4.025	3.119
6	3.843	320	4.025	3.086
เฉลี่ย	3.911	326	4.096	3.086
ความคลาดเคลื่อน	± 0.051	± 4.575	± 0.053	± 0.017
%ความคลาดเคลื่อน	± 1.306%	± 1.403%	± 1.300%	± 0.552%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

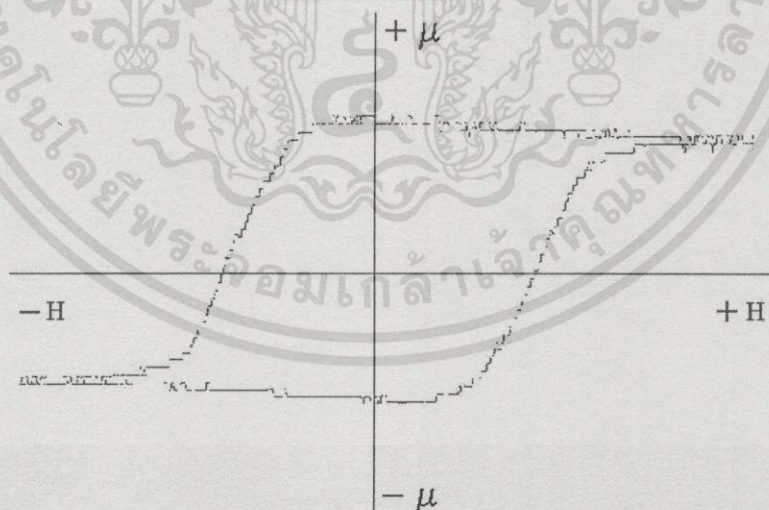
จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.12 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.12 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c)

ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #005

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กที่คงค้าง B_r (KG)	4.096 ± 0.053	3.860	4.190
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (Koe)	3.086 ± 0.017	3.060	3.060

5.2.6 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #006



รูปที่ 5.9 กราฟฮิสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #006

ตารางที่ 5.13 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #006

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีไทเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.256	327	4.114	2.856
2	4.311	331	4.167	2.889
3	4.311	331	4.167	2.856
4	4.311	331	4.167	2.856
5	4.311	331	4.167	2.856
6	4.311	331	4.167	2.889
เฉลี่ย	4.30	330	4.158	2.867
ความคลาดเคลื่อน	± 0.018	± 1.366	± 0.018	± 0.014
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.426\%$	$\pm 0.414\%$	$\pm 0.425\%$	$\pm 0.485\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.14 ดังต่อไปนี้

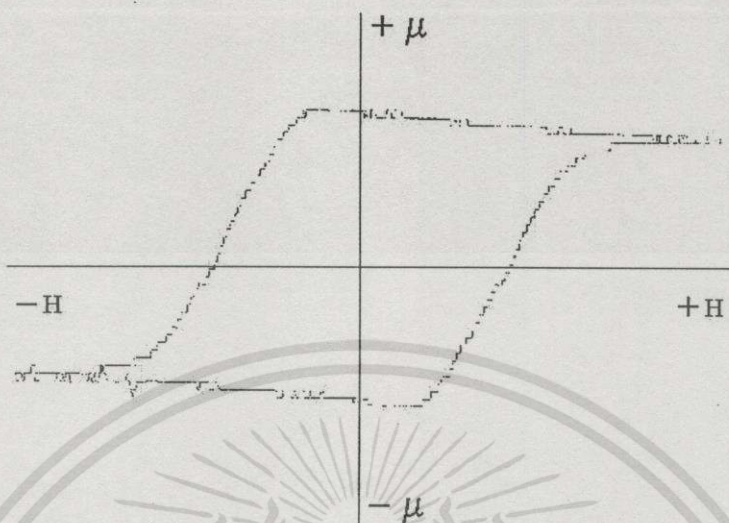
ตารางที่ 5.14 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c)

ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #006

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	4.158 ± 0.018	3.970	4.240
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$	2.867 ± 0.014	2.990	2.910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #007



รูปที่ 5.10 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #007

ตารางที่ 5.15 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #007

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.041	337	4.232	2.791
2	4.139	345	4.334	2.823
3	4.139	345	4.334	2.791
4	4.090	341	4.283	2.823
5	4.139	345	4.334	2.823
6	4.090	341	4.283	2.823
เฉลี่ย	4.106	342	4.300	2.812
ความคลาดเคลื่อน	± 0.033	± 2.683	± 0.034	± 0.013
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.796\%$	$\pm 0.785\%$	$\pm 0.791\%$	$\pm 0.480\%$

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ิซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.16 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.16 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #007

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	4.300 ± 0.034	4.370	4.380
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)	2.812 ± 0.013	2.740	2.870

5.2.8 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #008



รูปที่ 5.11 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #008

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.334	333	4.189	2.856
2	4.285	329	4.142	2.895
3	4.285	329	4.142	2.856
4	4.382	337	4.236	2.856
5	4.382	337	4.236	2.889
6	4.382	337	4.236	2.889
เฉลี่ย	4.342	334	4.197	2.884
ความคลาดเคลื่อน	± 0.039	± 3.225	± 0.038	± 0.016
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.896\%$	$\pm 0.966\%$	$\pm 0.899\%$	$\pm 0.548\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.18 ดังต่อไปนี้

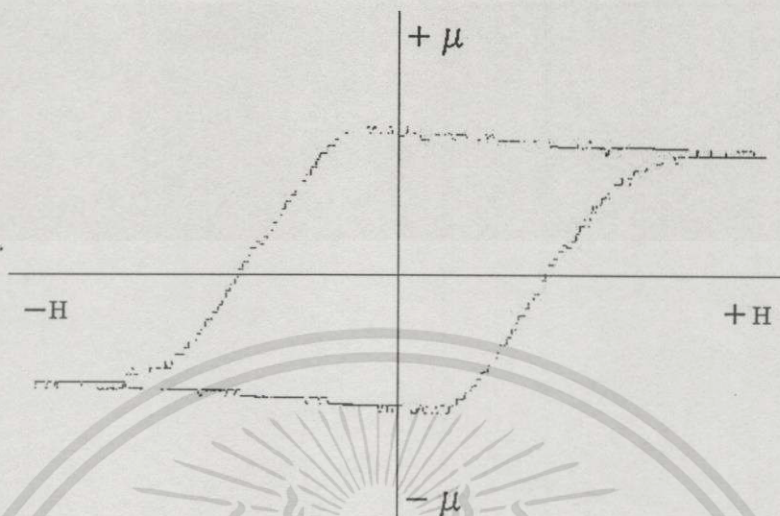
ตารางที่ 5.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้

จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #008

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	4.197 ± 0.038	4.090	4.250
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$	2.874 ± 0.016	2.850	2.820

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.9 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #009



รูปที่ 5.12 กราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #009

ตารางที่ 5.19 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #009

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.006	308	3.872	2.856
2	3.956	304	3.824	2.889
3	4.006	308	3.872	2.889
4	4.006	308	3.872	2.889
5	3.907	300	3.776	2.889
6	3.907	300	3.776	2.889
เฉลี่ย	3.965	305%	3.832	2.884
ความคลาดเคลื่อน	± 0.040	± 3.225	± 0.039	± 0.011
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.003\%$	$\pm 1.057\%$	$\pm 1.006\%$	$\pm 0.382\%$

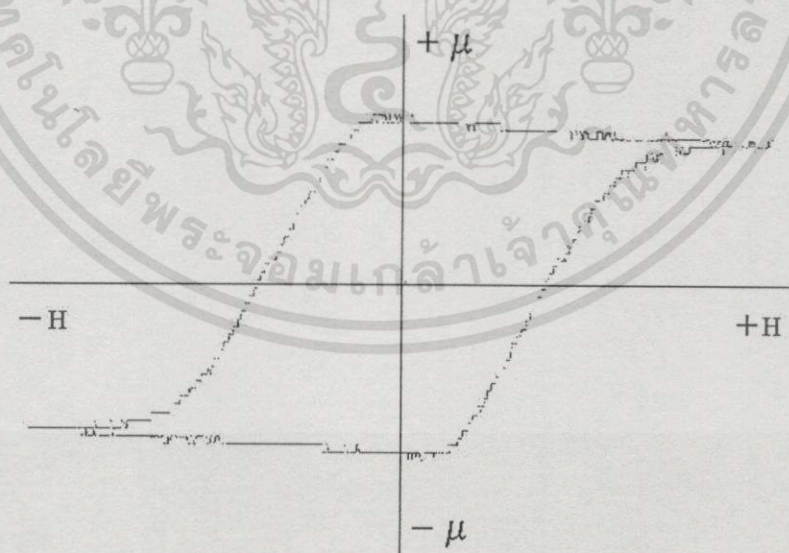
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ิซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.20 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.20 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าไทเทเนียม #009

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	3.832 ± 0.039	3.607	4.060
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (Koe)	2.884 ± 0.011	2.830	2.780

5.2.10 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าไทเทเนียม #010



รูปที่ 5.13 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างรูปแม่เหล็ก #010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.21 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #010

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก μ (emu)	แมกนีไทเซชันคงค้าง M_r (emu/cm ³)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	สนามโคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)
1	4.249	327	4.107	2.725
2	4.206	323	4.065	2.725
3	4.206	323	4.065	2.725
4	4.119	316	3.981	2.692
5	4.119	316	3.981	2.725
6	4.119	316	3.981	2.725
เฉลี่ย	4.170	320	4.030	2.720
ความคลาดเคลื่อน	± 0.047	± 3.916	± 0.046	± 0.011
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.129\%$	$\pm 1.124\%$	$\pm 1.131\%$	$\pm 0.405\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.22 ดังต่อไปนี้

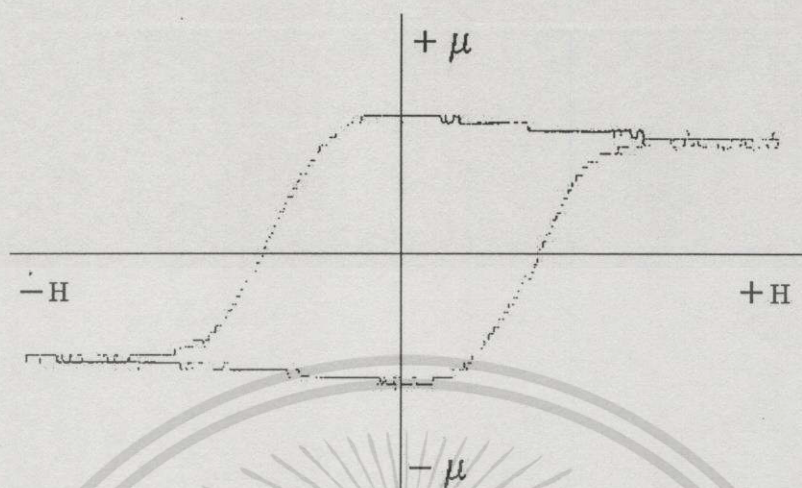
ตารางที่ 5.22 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้

จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #010

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	4.030 ± 0.046	3.970	4.210
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)	2.720 ± 0.011	2.660	2.660

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.11 ผลการทดลองของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #011



รูปที่ 5.14 กราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #011

ตารางที่ 5.23 ตัวแปรกราฟฮิสเตอร์ิซิสของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโพง #011

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(emu)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กคง ค้าง $B_r(KG)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	3.956	304	3.824	2.495
2	3.904	300	3.773	2.495
3	3.904	300	3.773	2.495
4	3.904	300	3.773	2.528
5	3.851	296	3.722	2.528
6	3.904	300	3.773	2.528
เฉลี่ย	3.904	300	3.773	2.512
ความคลาดเคลื่อน	± 0.027	± 2.066	± 0.026	± 0.015
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.688\%$	$\pm 0.689\%$	$\pm 0.698\%$	$\pm 0.588\%$

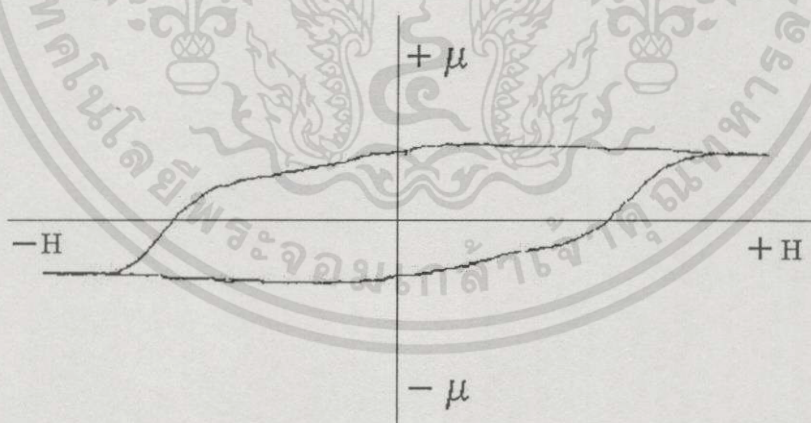
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI INDUSTRY CO.,LTD แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.24 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.24 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้ จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าโง #011

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ VSM รุ่น 7307	เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300
ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็กคงค้าง B_r (KG)	3.773 ± 0.026	3.710	3.970
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี H_c (KOe)	2.512 ± 0.015	2.490	2.490

5.2.12 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1



รูปที่ 5.15 กราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1

ตารางที่ 5.25 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1

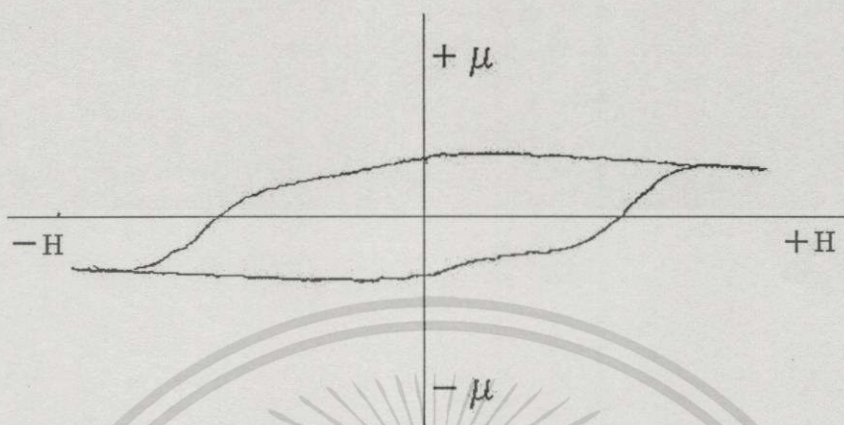
จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(10^{-4} \text{ emu})$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง $M_r(\text{emu/cm}^3)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} \text{ emu/cm}^2)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{Koe})$
1	4.525	258	0.773	2.511
2	4.525	258	0.773	2.594
3	4.525	258	0.773	2.561
4	4.525	258	0.773	2.594
5	4.525	258	0.773	2.594
6	4.423	252	0.756	2.561
เฉลี่ย	4.508	257	0.770	2.569
ความคลาดเคลื่อน	± 0.034	± 2.000	± 0.007	± 0.027
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.754\%$	$\pm 0.778\%$	$\pm 0.736\%$	$\pm 1.041\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ (KERR) และเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER (TRDM) ของบริษัทซีเทค(ประเทศไทย)จำกัด แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.26 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.26 แมกนีโตเซชันคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#1

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ TRDM	เครื่องมือวัดแบบ KERR
แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} \text{ emu/cm}^2)$	0.770 ± 0.007	0.811	-
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{Koe})$	2.569 ± 0.027	2.528	2.602

5.2.13 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2



รูปที่ 5.16 กราฟฮีสเตอร์ซิซของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2

ตารางที่ 5.27 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิซของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(10^{-4} emu)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} emu/cm^2)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.114	247	0.742	2.363
2	4.114	247	0.742	2.429
3	4.217	254	0.760	2.397
4	4.217	254	0.760	2.462
5	4.217	254	0.760	2.462
6	4.217	254	0.760	2.462
เฉลี่ย	4.183	252	0.754	2.429
ความคลาดเคลื่อน	± 0.043	± 2.966	± 0.008	± 0.034
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.038\%$	$\pm 1.177\%$	$\pm 1.007\%$	$\pm 1.398\%$

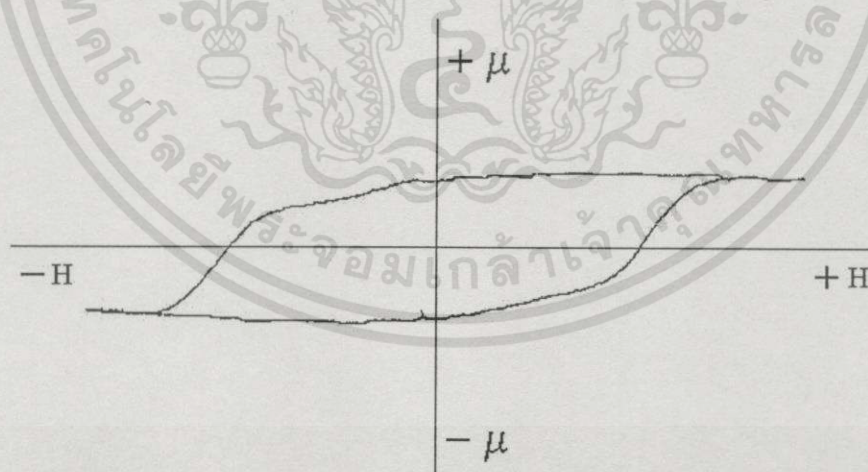
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร(KERR) และเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER(TRDM) ของบริษัทซีเทท(ประเทศไทย)จำกัด แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.28 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.28 แมกนีโตเซชันคูณด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#2

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ TRDM	เครื่องมือวัดแบบ KERR
แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r t (10^{-3} \text{ emu} / \text{cm}^2)$	0.774 ± 0.008	0.812	-
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี $H_c (K Oe)$	2.429 ± 0.027	2.517	2.668

5.2.14 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3



รูปที่ 5.17 กราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3

ตารางที่ 5.29 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(10^{-4} \text{ emu})$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(\text{emu} / \text{cm}^3)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} \text{ emu} / \text{cm}^2)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$
1	4.937	281	0.844	2.413
2	4.834	276	0.827	2.364
3	4.937	281	0.844	2.374
4	4.937	281	0.844	2.380
5	4.834	276	0.827	2.429
6	4.834	276	0.827	2.397
เฉลี่ย	4.886	279	0.836	2.388
ความคลาดเคลื่อน	± 0.046	± 2.280	± 0.008	± 0.027
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.943\%$	$\pm 0.718\%$	$\pm 0.911\%$	$\pm 1.041\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร(KERR) และเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER(TRDM) ของบริษัทซีเทค(ประเทศไทย)จำกัด แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.30 ต่อไปนี้

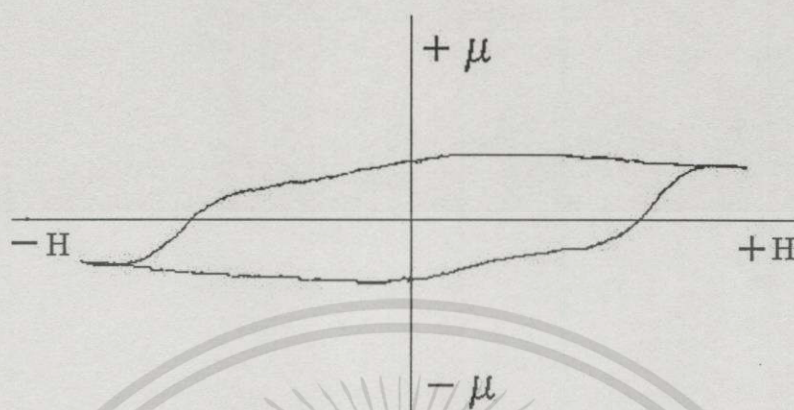
ตารางที่ 5.30 แมกนีโตเซชันคงค้างด้วยความหนา ($M_r t$) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#3

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ TRDM	เครื่องมือวัดแบบ KERR
แมกนีโตเซชันคงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} \text{ emu} / \text{cm}^2)$	0.836 ± 0.007	0.836	-
สนามแม่เหล็กโคเออร์ซิวิตี $H_c(\text{KOe})$	2.388 ± 0.027	2.494	2.589

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.15 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4



รูปที่ 5.18 กราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4

ตารางที่ 5.31 ตัวแปรกราฟฮีสเทอรีซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(10^{-4} emu)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	แมกนีโตเซชันคงค้าง \times ความหนา $M_r t(10^{-3} emu/cm^2)$	สนามโคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	4.114	254	0.762	2.528
2	4.217	260	0.781	2.626
3	4.114	254	0.762	2.626
4	4.217	260	0.781	2.594
5	4.217	260	0.781	2.626
6	4.217	260	0.781	2.626
เฉลี่ย	4.183	258	0.775	2.604
ความคลาดเคลื่อน	± 0.043	± 2.530	± 0.008	± 0.032
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 1.038\%$	$\pm 0.981\%$	$\pm 1.034\%$	$\pm 1.239\%$

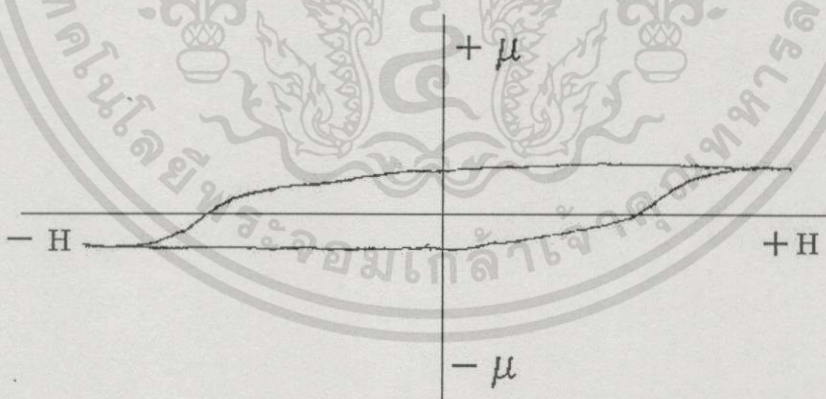
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ร(KERR) และเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER(TRDM) ของบริษัทซีเทค(ประเทศไทย)จำกัด แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.32 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.32 แมกนีไทเซชันคู่ด้วยความหนา (M_r, t) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้ จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#4

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ TRDM	เครื่องมือวัดแบบ KERR
แมกนีไทเซชัน คงค้าง × ความหนา $M_r, t (10^{-3} emu / cm^2)$	0.775 ± 0.008	0.712	-
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี $H_c (KOe)$	2.604 ± 0.027	2.782	3.032

5.2.16 ผลการทดลองของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5



รูปที่ 5.19 กราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5

ตารางที่ 5.33 ตัวแปรกราฟฮีสเตอร์ซิสของตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5

จำนวนครั้งที่วัด	โมเมนต์แม่เหล็ก $\mu(10^{-4} emu)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง $M_r(emu/cm^3)$	แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r,t(10^{-3} emu/cm^2)$	สนามโคเออร์ ซิวิตี $H_c(KOe)$
1	3.563	221	0.663	2.889
2	3.353	208	0.623	2.954
3	3.458	214	0.643	2.922
4	3.353	208	0.623	2.954
5	3.353	208	0.623	2.987
6	3.35.	208	0.623	2.922
เฉลี่ย	3.406	211	0.633	2.938
ความคลาดเคลื่อน	$\pm 0.072\%$	± 4.397	± 0.014	± 0.029
%ความคลาดเคลื่อน	$\pm 2.106\%$	$\pm 2.084\%$	$\pm 2.174\%$	$\pm 0.949\%$

จากการวัดกราฟฮีสเตอร์ซิสของเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดกราฟฮีสเตอร์ซิส โดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์ (KERR) และเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER (TRDM) ของบริษัทซีเทค(ประเทศไทย)จำกัด แสดงให้เห็นดังตารางที่ 5.34 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.34 แมกนีโตเซชันคูณด้วยความหนา (M_r,t) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแบบ KERR และเครื่องมือ TRDM ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ RD#5

	เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือ TRDM	เครื่องมือวัดแบบ KERR
แมกนีโตเซชัน คงค้าง \times ความหนา $M_r,t(10^{-3} emu/cm^2)$	0.633 ± 0.014	0.713	-
สนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี $H_c(KOe)$	2.938 ± 0.028	2.859	3.120

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การพัฒนาเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์ งานวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบในส่วนของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ และทำการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กและสนามเกรเดียนท์ เพื่อใช้ในการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็ก ในส่วนของการให้สนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็ก และสามารถสรุปความสามารถของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาได้ดังต่อไปนี้

1. ความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กตามที่ออกแบบและใช้งานที่ระยะระหว่างขั้ว 5.10 เซนติเมตร ในพื้นที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรบริเวณจุดกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้า 1 ถึง 10 แอมแปร์ ได้สนามแม่เหล็ก $0.606 \pm 0.002 \text{ kOe}$, $1.212 \pm 0.003 \text{ kOe}$, $1.871 \pm 0.008 \text{ kOe}$, $2.401 \pm 0.006 \text{ kOe}$, $3.003 \pm 0.004 \text{ kOe}$, $3.586 \pm 0.019 \text{ kOe}$, $4.172 \pm 0.016 \text{ kOe}$, $4.793 \pm 0.015 \text{ kOe}$, $5.246 \pm 0.019 \text{ kOe}$ และ $5.757 \pm 0.022 \text{ kOe}$ ตามลำดับ พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 0-5 เปอร์เซ็นต์

2. สนามเกรเดียนท์ที่ได้จากขดลวดเกรเดียนท์ที่ออกแบบ เมื่อวัดเทียบกับแหล่งกำเนิดกระแสสลับและตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์มีเพียงพอ และเหมาะสมที่จะใช้วัดกราฟฮิสเตอร์ซิสสารแม่เหล็กดำโพง และชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ที่เป็นสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3. ตัวอย่างสารแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ สารแม่เหล็กที่ใช้ทำลำโพงที่มีส่วนผสมของแคลเซียมคาบอเนต ซิลิกอนออกไซด์ สตรอนเตียมออกไซด์ และแบเรียมออกไซด์ และสารแม่เหล็กที่เป็นฟิล์มแม่เหล็กที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ และ โคเมียม ที่เคลือบบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ ในแต่ละตัวอย่างก็จะมีสัดส่วนทางเคมีแตกต่างกัน ทำให้มีตัวแปรของกราฟฮิสเตอร์ซิสแตกต่างกันไป เพื่อความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่วัดได้กับเครื่องเครื่องมือที่น่าเชื่อถือและมีใช้ในงานอุตสาหกรรม สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กดำโพง จะทำการวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือไวเบรติงแชมเปิลแมกนีโตมิเตอร์(VSM) รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE กับ เครื่อง B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJIKI INDUSTRY CO.,LTD ในส่วนของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ได้ทำการวัดเปรียบเทียบกับงานวิจัยหนึ่งซึ่งเป็นการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสโดยใช้ปรากฏการณ์ของเคอร์กับเครื่องมือ NON-CONTACT TURBO ROTATING DISC MAGNETOMETER (TRDM) ของบริษัท(ประเทศไทย)จำกัด และความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือต่างๆที่ที่ใช่วัดกับเครื่องมือที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาขึ้น ที่วัดได้ของตัวอย่างสารแม่เหล็กสรุปได้ดังตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.11

ตารางที่ 6.1 ความหนาแน่นฟลักซ์คงค้าง (B_r) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับกับเครื่องมือ VSM รุ่น 7307 และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300

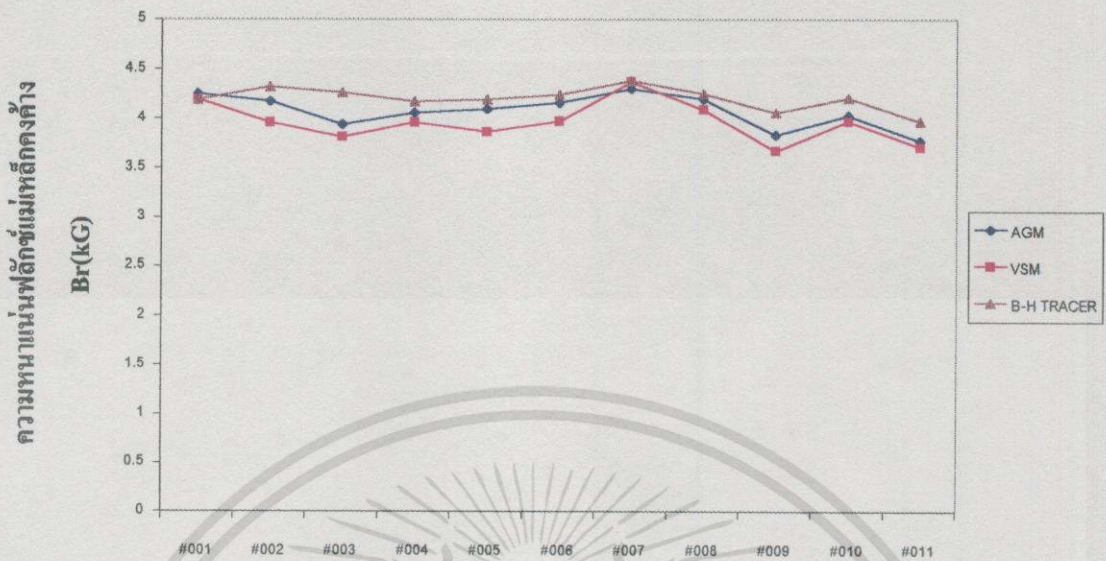
ตัวอย่าง สารแม่เหล็ก	เครื่องมือ AGM		เครื่องมือ VSM		เครื่องมือ B-H CURVE TRACER	
	B_r (kG)	H_c (kOe)	B_r (kG)	H_c (kOe)	B_r (kG)	H_c (kOe)
#001	4.252	3.059	4.200	2.940	4.190	3.090
#002	4.173	2.852	3.960	2.770	4.320	2.790
#003	3.936	2.714	3.810	2.790	4.260	2.730
#004	4.060	3.206	3.960	3.180	4.170	3.100
#005	4.096	3.086	3.860	3.060	4.190	3.060
#006	4.158	2.867	3.970	2.990	4.240	2.910
#007	4.300	2.812	4.370	2.740	4.380	2.870
#008	4.197	2.874	4.090	2.850	4.250	2.820
#009	3.832	2.884	3.670	2.830	4.060	2.780
#010	4.030	2.720	3.970	2.660	4.210	2.660
#011	3.773	2.512	3.710	2.490	3.970	2.490

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แมกนีไทเซชันคุณสมบัติความหนา (M, t) และสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่ได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR และเครื่องมือ TRDM

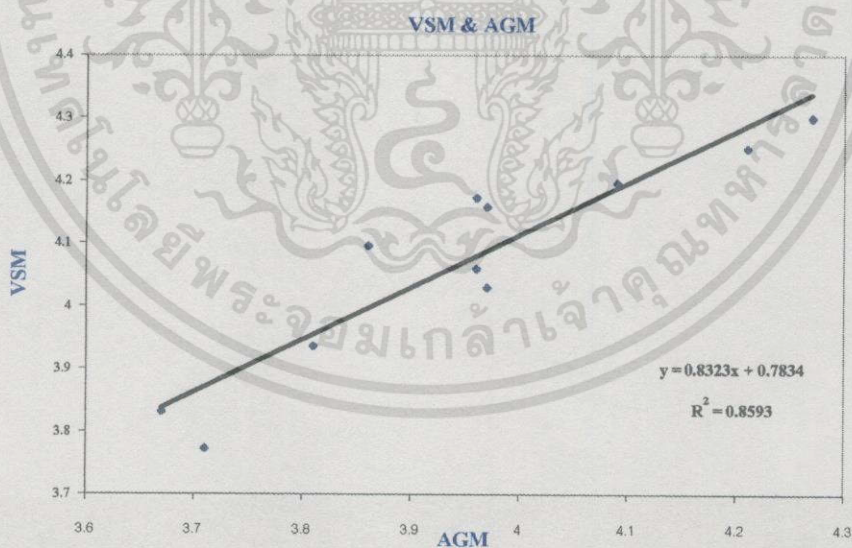
ตัวอย่าง สารแม่เหล็ก	เครื่องมือ AGM		เครื่องมือ TRDM		เครื่องมือ KERR	
	M, t $\left(10^{-3} \frac{emu}{cm^2}\right)$	$H_c (kOe)$	M, t $\left(10^{-3} \frac{emu}{cm^2}\right)$	$H_c (kOe)$	M, t $\left(10^{-3} \frac{emu}{cm^2}\right)$	$H_c (kOe)$
RD#1	0.770	2.569	0.811	2.528	-	2.602
RD#2	0.774	2.429	0.812	2.517	-	2.668
RD#3	0.836	2.388	0.836	2.494	-	2.589
RD#4	0.775	2.604	0.712	2.782	-	3.032
RD#5	0.633	2.938	0.7130	2.859	-	3.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



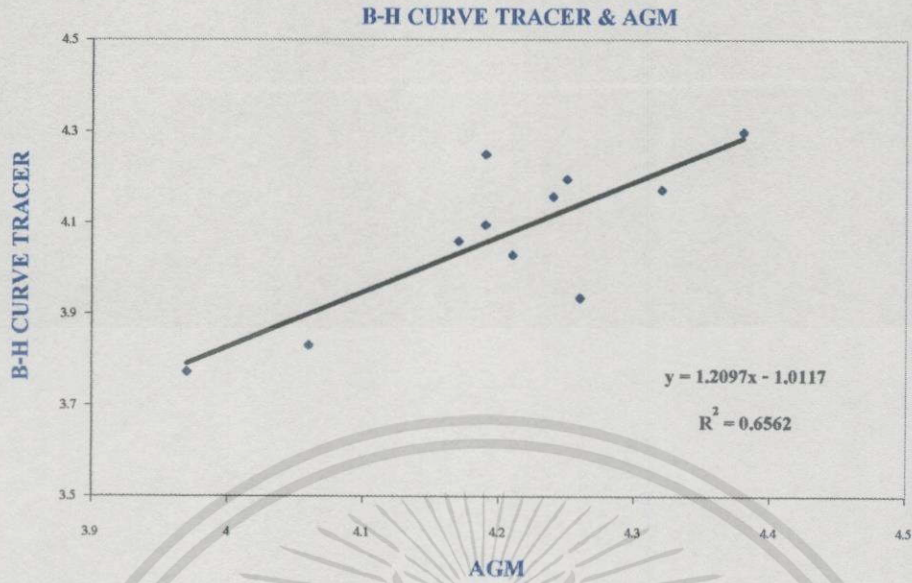
ตัวอย่างสารแม่เหล็กกล้าไทเทเนียม

รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าไทเทเนียมที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือ VSM และ เครื่องมือ B-H CURVE TRACER



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าไทเทเนียมที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

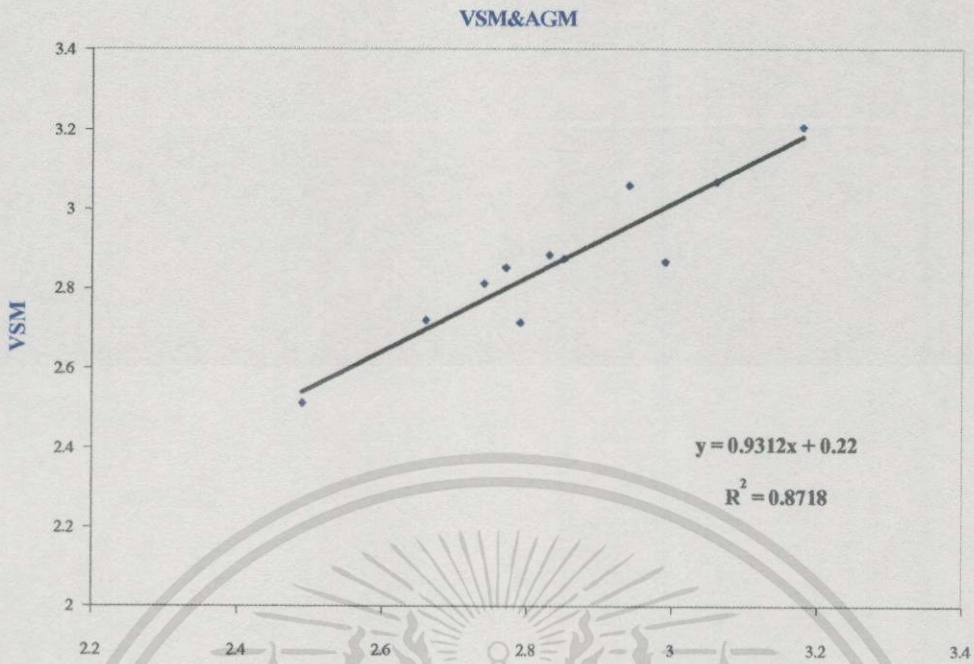


รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กถาวรที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER

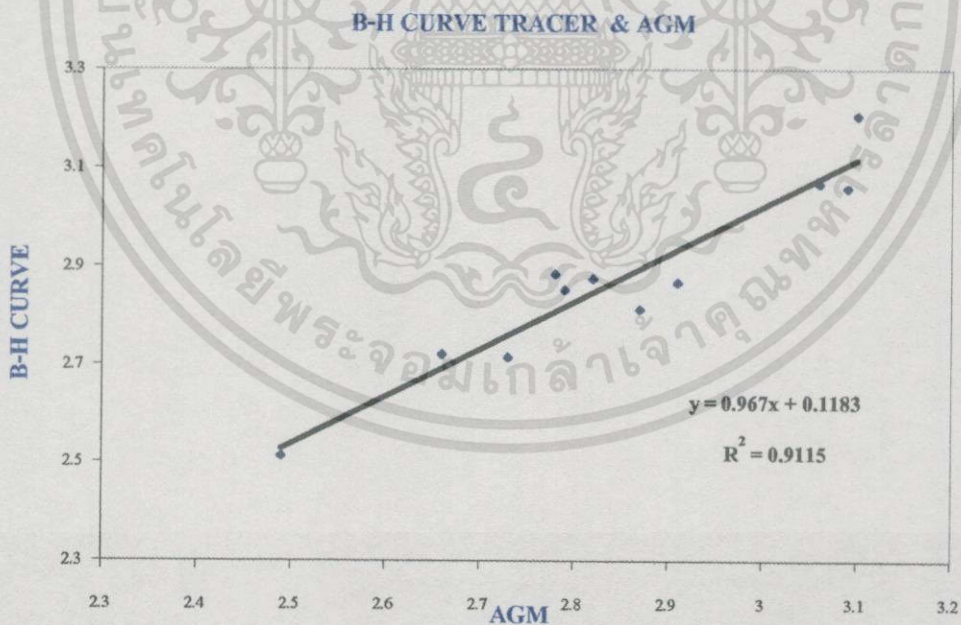


รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กถาวรที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือ VSM และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

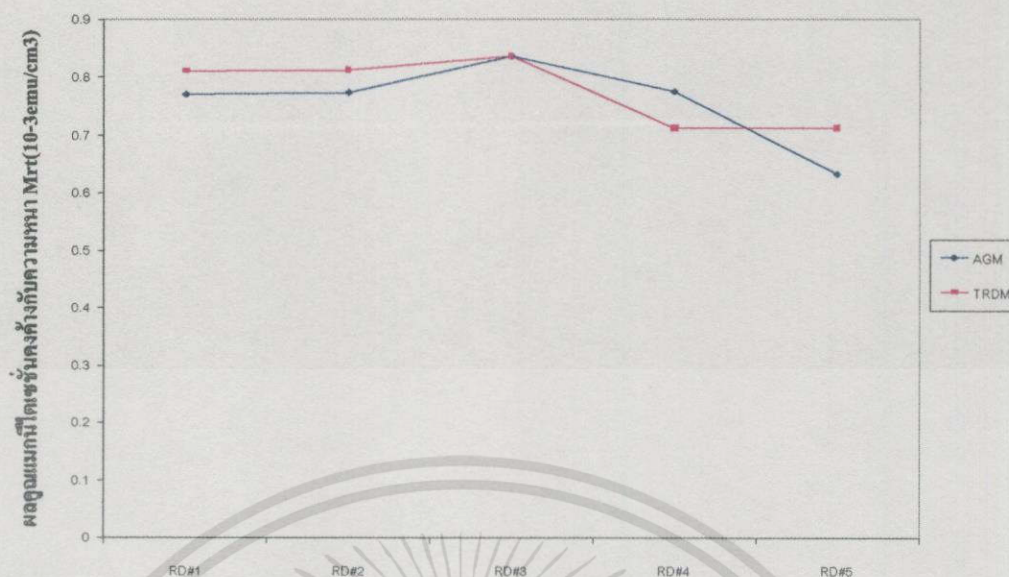


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กกล้าโรงแท้งที่วัดได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ VSM

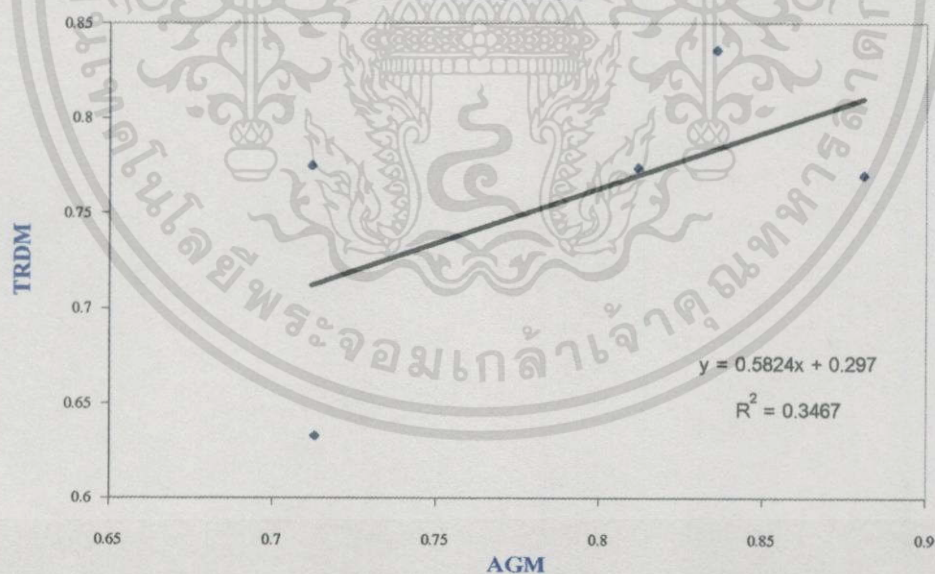


รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารแม่เหล็กกล้าโรงแท้งที่วัดได้จาก เครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ B-H CURVE TRACER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

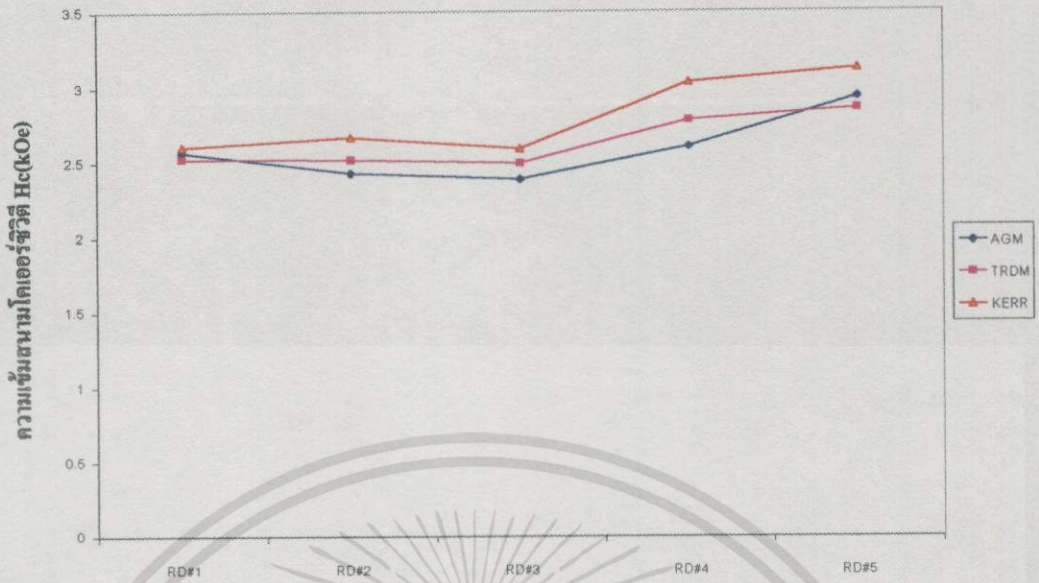


รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ของผลคูณแมกนีไตเซชันกับความหนา ($M_r t$) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิस्कที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ TRDM

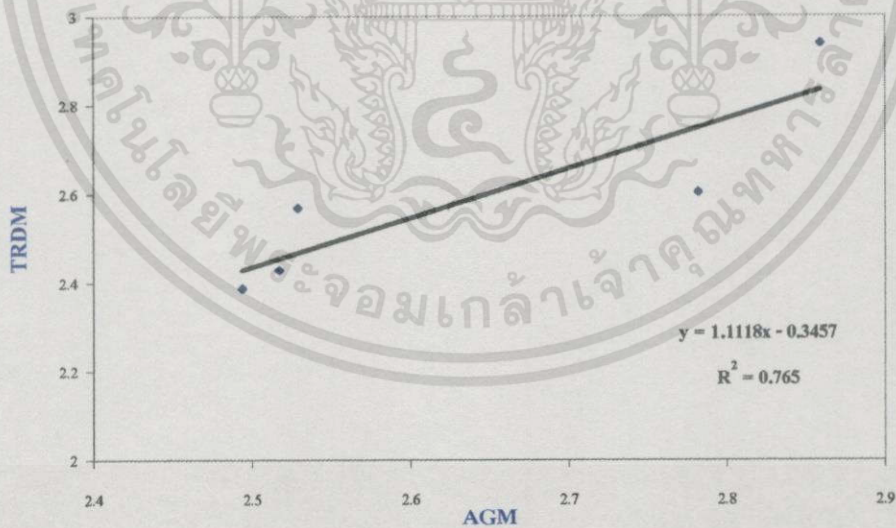


รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของผลคูณแมกนีไตเซชันกับความหนา ($M_r t$) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิस्कที่วัดจากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ TRDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

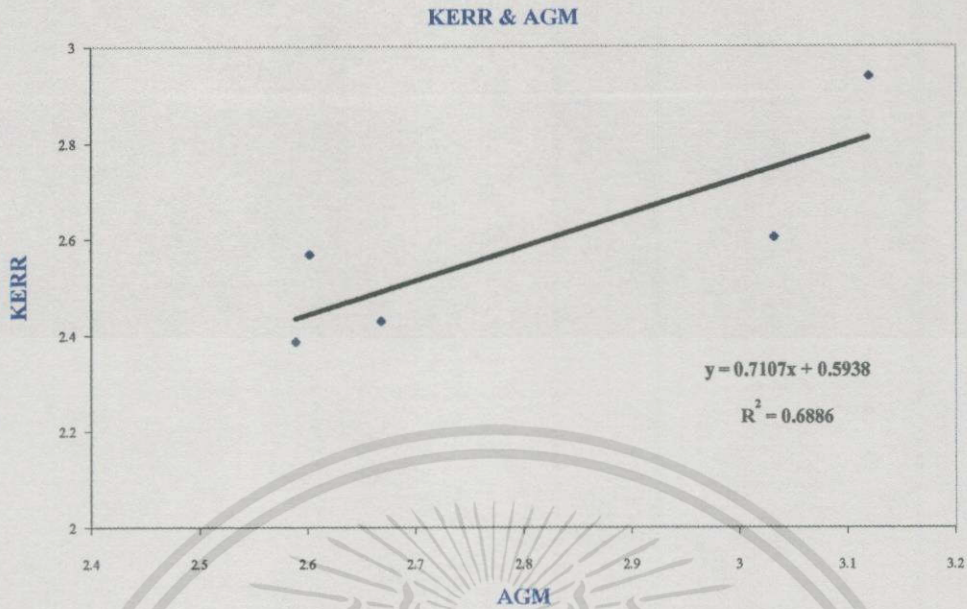


รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ ที่วัดได้จาก 3 เครื่องมือ คือ AGM ที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือ TRDM และเครื่องมือ KERR



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ ที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ TRDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตี (H_c) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ ที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือ KERR

จากการทดลองในการวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของสารตัวอย่างจำนวน 16 ตัวอย่าง ประกอบด้วยสารตัวอย่างที่เป็นสารแม่เหล็กกล้าโพงจำนวน 11 ตัวอย่าง และสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์จำนวน 5 ตัวอย่าง พบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถหาค่าตัวแปรที่สำคัญของกราฟฮิสเตอร์ซิสได้อย่างถูกต้องและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ (0-5)% และมีความไวโมเมนต์แม่เหล็กประมาณ $(10^{-4} - 10) \text{ emu}$ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่นำเชือกที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมแล้วพบว่าสนามโคเออร์ซิวิตี (H_c) ที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นความสัมพันธ์และใกล้เคียงกับเครื่องมือ VSM และเครื่องมือ B-H CURVE TRACER มากกว่าเครื่องมือ TRDM และเครื่องมือ KERR เนื่องจากมีเทคนิคการวัดใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (B_r) ของสารแม่เหล็กกล้าโพงที่วัดได้จากเครื่องมือ AGM ที่พัฒนาขึ้นมีความสัมพันธ์กับเครื่องมือ VSM มากกว่าเครื่องมือ B-H CURVE TRACER เนื่องจากหลักการวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างของสารแม่เหล็กกล้าโพง ได้มาจากการคำนวณโมเมนต์แม่เหล็กเหมือนกัน ส่วนผลคูณแมกนีโตเซชันกับความหนา ($M_r t$) ของสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ ที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความสัมพันธ์กันน้อยกว่าเครื่องมือ TRDM เนื่องจากไม่ทราบปริมาณของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ที่ใช้จึงเป็นประมาณ และอาจจะขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็กที่เคลือบบนแผ่นฮาร์ดดิสก์นั้นอาจมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้การคำนวณหาของผลคูณของแมกนีโตเซชันกับความหนาเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ดังนั้น เครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเคอร์เดียนท์ที่ได้พัฒนาขึ้นในขณะนี้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของสารแม่เหล็กที่เป็นเนื้อเดียวกัน มากกว่าการวัดสารแม่เหล็กที่เป็นทินฟิล์มหลายชั้น(layer) เป็นผลทำให้การวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสของสารแม่เหล็กถ้าโงงได้ดีกว่าการวัดสารตัวอย่างฮาร์ดดิสก์ และในอนาคตการพัฒนาเครื่องมือวัดกราฟฮิสเตอร์ซิสแบบอัลเทอร์เนติเกรเดียนท์ แมกนีโตมิเตอร์ควรมีการพัฒนาให้ได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม อาทิเช่น การพัฒนาเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กของตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นจาก 7 kOe เพิ่มขึ้นเป็น 15-20 kOe ทั้งนี้เพื่อให้วัดกับตัวอย่างสารแม่เหล็กได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น สารแม่เหล็กจำพวกอัลนิโก ฮาร์ดเฟอร์ไรต์ และนีโอไดเนียมไอออนโบรอน ที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและสนามโคเออร์ซิวิตีสูงๆ ซึ่งเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก และการพัฒนาระบบระบายความร้อนที่เกิดขึ้นกับขดลวด เพื่อรักษาอุณหภูมิของระบบไม่ให้เปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของระบบจะมีผลกับการแมกนีโตเซชันของสารแม่เหล็ก และสุดท้ายแล้วควรมีนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการเก็บและประมวลผลข้อมูล



บรรณานุกรม

- [1] Revision Issue Annually, “ Standard Test Method for D-C Magnetic Properties of Material Using Ring and Permeameter Procedure with D-C Electronic Hysteresisgraphs ” Annual Book of ASTM Standards, Volume 0.304, 1988 A 773 pp 181-194
- [2] Springford M., Stockton JR. and Wampler WR. “ A Vibrating Sample Magnetometer for use with a Superconducting Manet “ Journal of Physics E: Scientific Instrument, Vol 4, 1971 pp 1036-1040
- [3] B.D.Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison Wesley Publishing Company, Inc, 1972
- [4] มงคล เดชนครินทร์, สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 860-862 วังบูรพา, กรุงเทพฯ, มีนาคม 2524 หน้า 267-268
- [5] D.J Kroon, Laboratory Magnets, Cleaver-Hume Press Ltd, Little Essex Street, London, WC2, 1968
- [6] John C. Mallinson, The Foundation of Magnetic Recording, Mallisson Magnetic, Inc Carlsbad California, Academic Press, 1987
- [7] George L. Trigg, , Magnetic Material to Mechanical Vibration and Damping , Encyclopedia of Applied Physics Vol 9, 1994
- [8] R.Reeves, An Alternating Force Magnetometer, Journ. Phys. E: Sci.Instr., Vol 5, 1972 ,pp 547-552
- [9] S.Forner, Vibrating Sample Magnetometer, Rev.Sci.Instr., Vol 27, 1956 pp 548
- [10] S.Forner, Vibrating Sample Magnetometer, Rev.Sci.Instr., Vol 30, 1959 pp 548-552
- [11] S.Forner, Vibrating Sample Magnetometer Experiences of a Volunteer, Journ. Appl. Phys, Vol 79, 1996 pp 4740-4745
- [12] W.Bolton, Measurement and Instrument System, Hartnolls Limited, Great Britain, 1996
- [13] Davit Jiles , Introduction to Magnetism and Magnetic material, Chapman & Hall, 1991
- [14] R. A. McCurrie, Ferromagnetic Materials Structure And Properties, Univesity of Bradford, UK , Academic Press, 1994
- [15] Giorgio Bertotti, Hysteresis in Magnetism For Physicists, Material scientists And Engineers, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris Torino, Italy, Academic Press, 1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

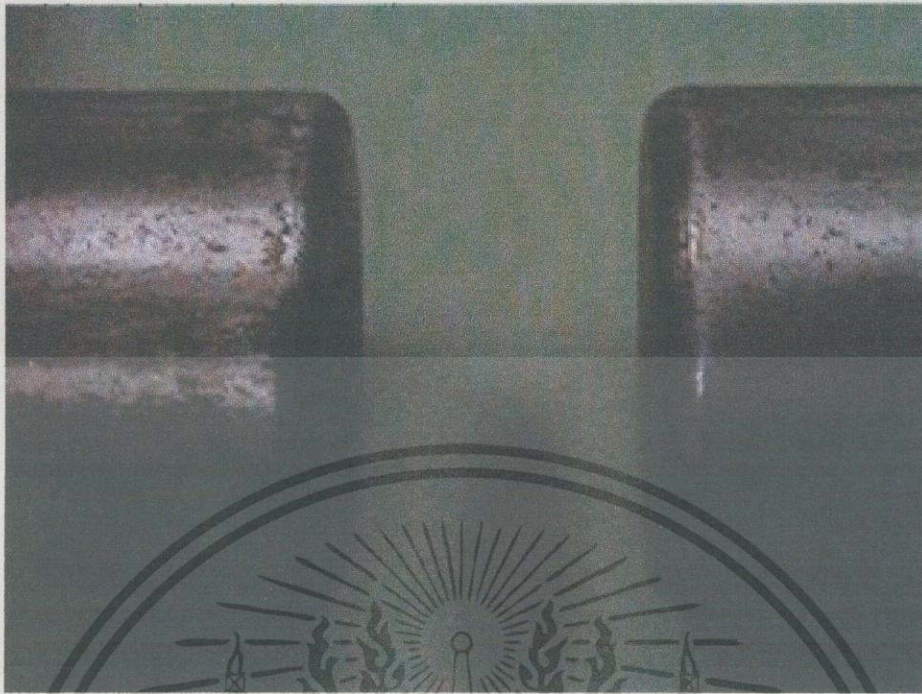


รูปที่ ผ.ก.1 ชุดเครื่องมือแมกนีโตมิเตอร์แบบอัลเทอร์เนติงเกรเดียนท์

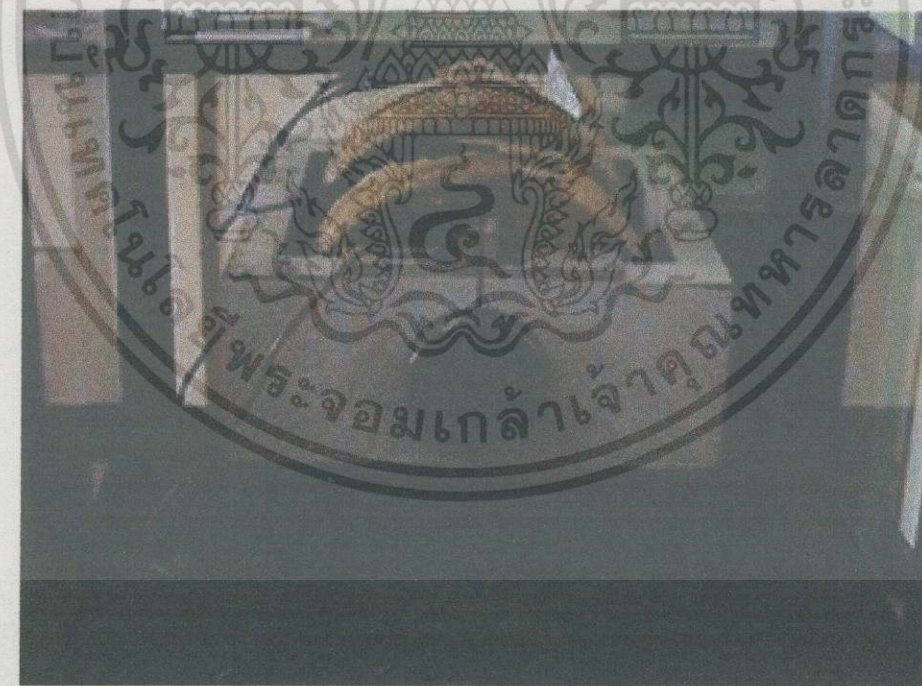


รูปที่ ผ.ก.2 ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กและแท่นยึดจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.3 ลักษณะของขั้วแม่เหล็กสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก



รูปที่ ผ.ก.4 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

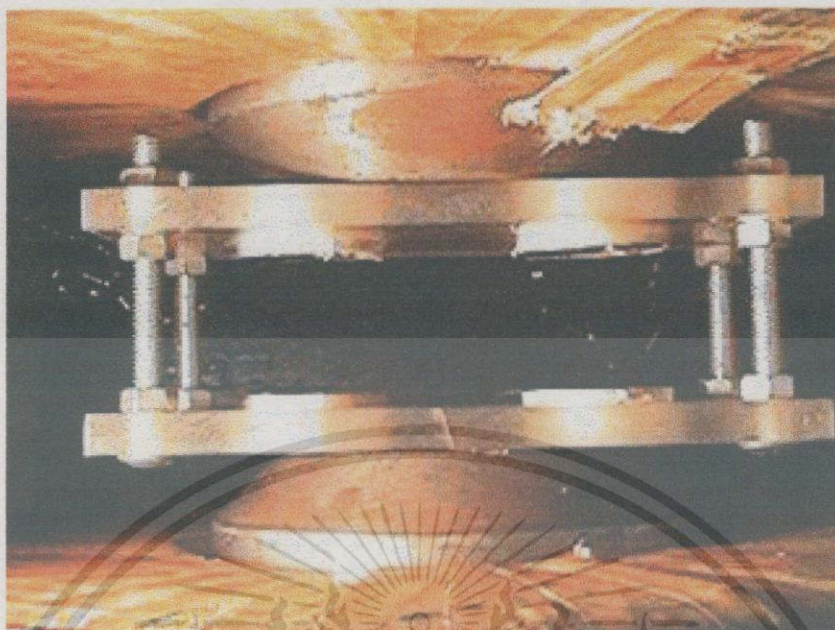
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



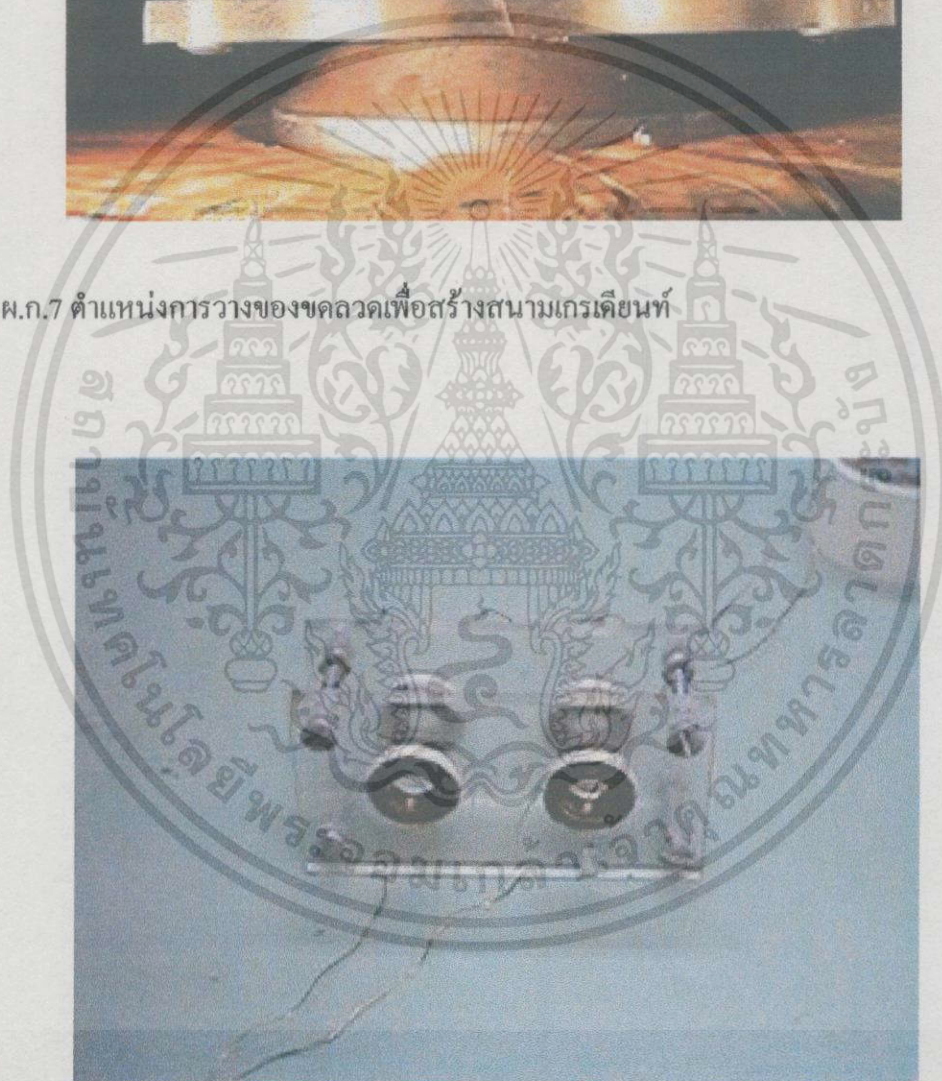
รูปที่ ผ.ก.5 ตัวตรวจวัดแอมป์ลิจูดการสั้นของสารตัวอย่าง

รูปที่ ผ.ก.6 ตำแหน่งการวางของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.7 ตำแหน่งการวางของขดลวดเพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์



รูปที่ ผ.ก.8 ลักษณะ โครงสร้างของขดลวดเพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.
เครื่องมือวัดกราฟิสเตอร์ซีสของทางการค้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

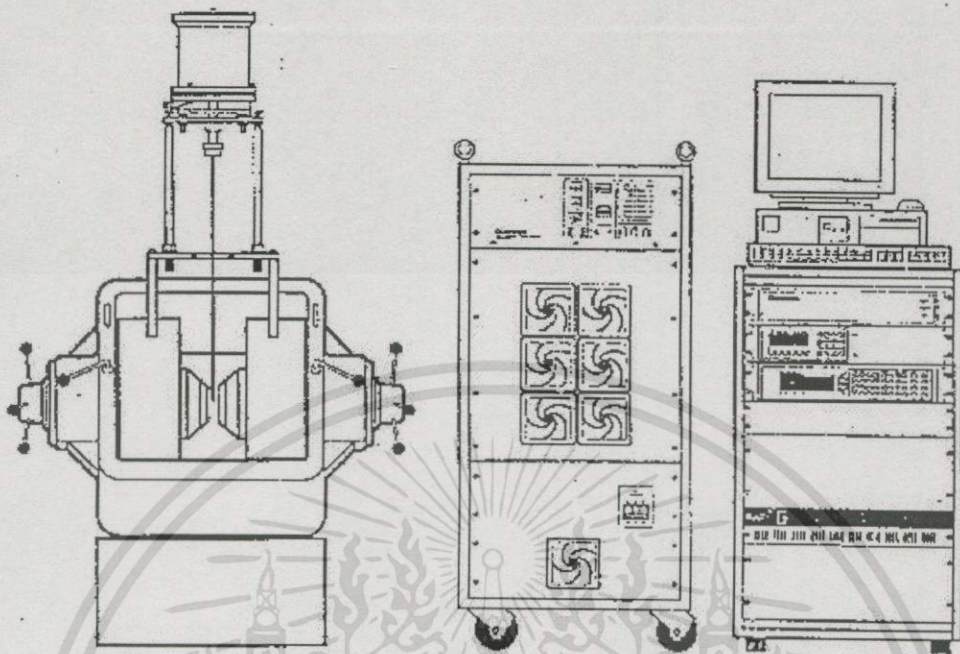
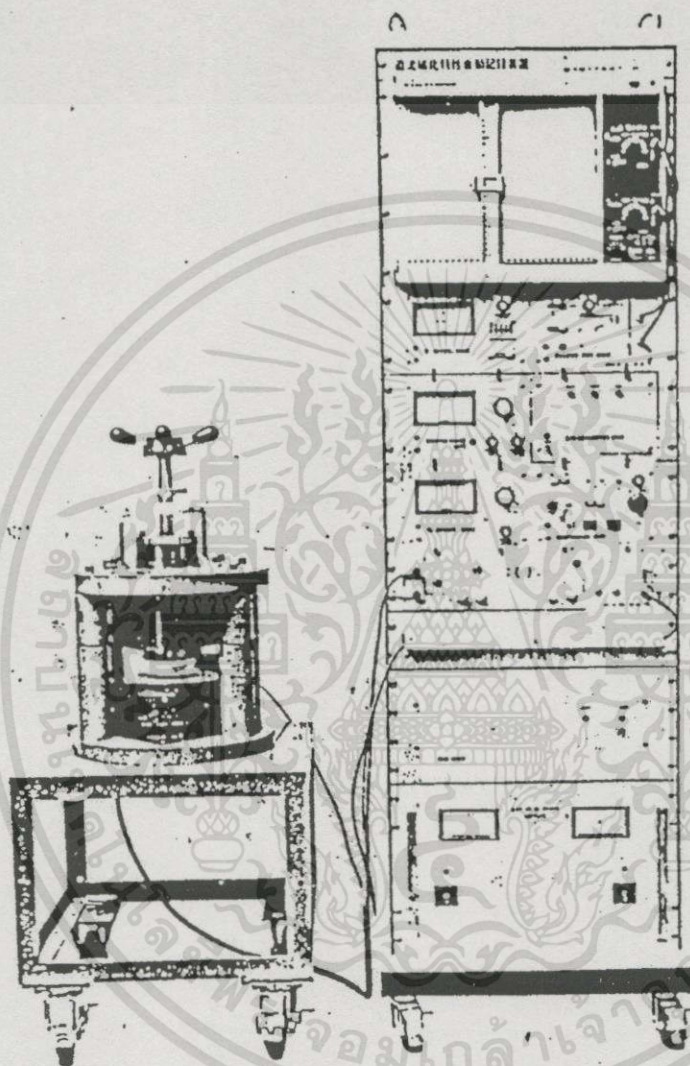


Figure 1-1 Typical Model 7307 7-Inch Electromagnet VSM System

รูปที่ ผ.บ.1 เครื่องมือ Vibrating Sample Magnetometer (VSM) รุ่น 7307 ของบริษัท LAKE SHORE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC MAGNETIZATION CHARACTERISTICS
 AUTOMATIC RECORDER
 MODEL BH-5300

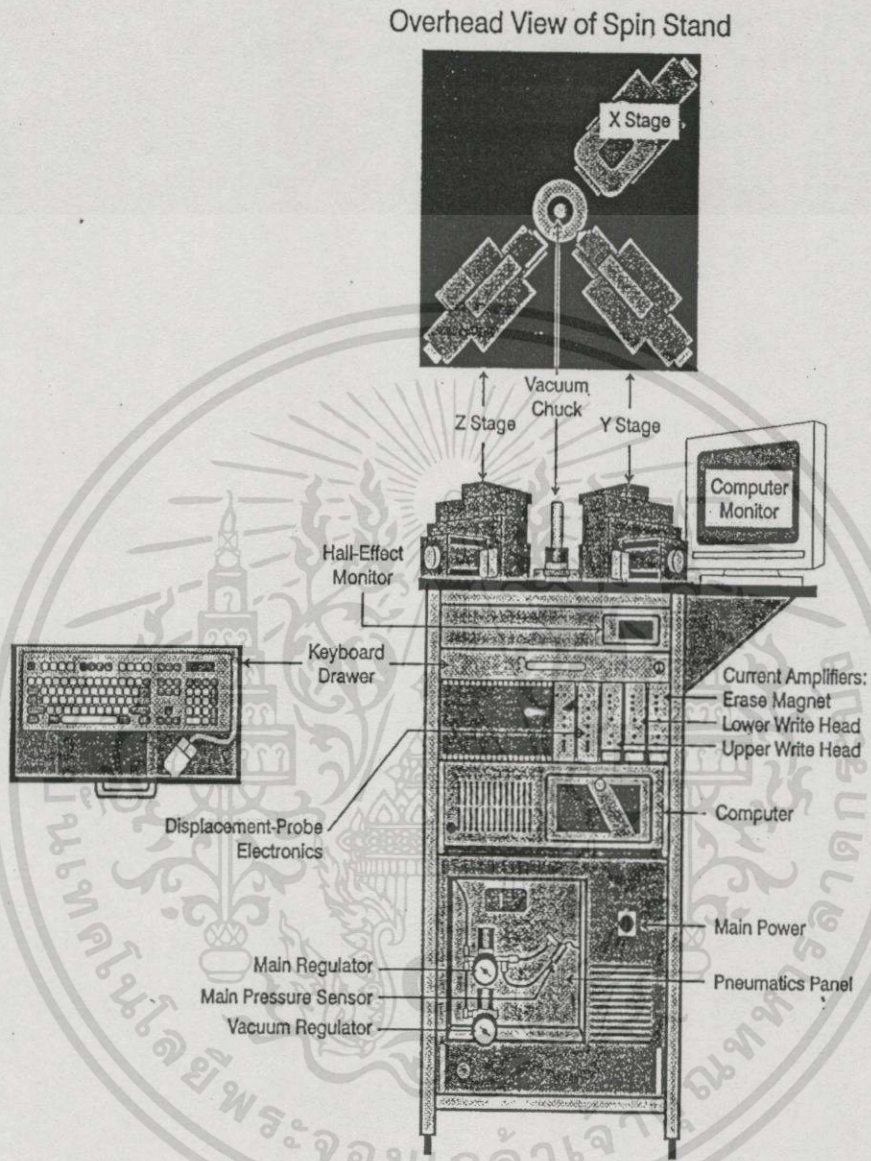


DENSHIJKI INDUSTRY CO., LTD.

TOKYO, JAPAN

รูปที่ ผ.ข.2 เครื่องมือ B-H CURVE TRACER รุ่น BH-5300 ของบริษัท DENSHIJKI
 INDUSTRY CO.,LTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.3 เครื่องมือ Turbo Rotating Disk Magnetometer (TRDM) ที่ทางบริษัทซีเทค (ประเทศไทย) จำกัดได้ซื้อนำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.4 เครื่องมือวัดกราฟิซิสเตอร์ชนิดแบบ KERR ที่ทางคณะผู้วิจัยจากภาควิชาฟิสิกส์ได้จัดสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNITS AND CONVERSIONS

Magnetim

<i>cgs unit</i>	<i>msk unit</i>
$B = H + 4\pi M$	$B = \mu_0 H + M$
B in gauss	B in weber/meter ² (tesla)
H in oerste	H in amperes/meter
M in emu/cm ³	M in weber/meter ²
μ (vacuum)=1	μ (vacuum)= $4\pi \times 10^{-7}$ weber/ampere meter
<i>cgs to mks</i>	<i>mks to cgs</i>
$B : 1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ weber/meter}^2$	$1 \text{ weber/meter}^2 = 10^4 \text{ gauss}$
$H : 1 \text{ oersted} = 79.6 \text{ ampere/meterr}$	$1 \text{ ampere/meter} = 12.57 \times 10^{-3} \text{ Oe}$
$M : 1 \text{ emu/cm}^3 = 12.57 \times 10^{-4} \text{ weber/meter}$	$1 \text{ weber/meter}^2 = 796 \text{ emu/cm}^3$
$\phi : 1 \text{ maxwell} = 10^{-8} \text{ weber}$	$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ maxwell}$
<i>Length</i>	
$1 \text{ angstrom}(A^0) = 10^{-8} \text{ cm}$	$1 \text{ cm} = 0.394 \text{ in}$
$1 \text{ micron}(\mu) = 10^{-6} \text{ meter}$	$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$
$= 10^{-4} \text{ cm}$	$10^3 \text{ in} = 1 \text{ mil} = 2.54 \mu$
$= 10^4 A^0$	$1 \mu = 39.4 \times 10^{-6} \text{ in.}$
<i>Mass</i>	
$1 \text{ kg} = 2.205 \text{ lb}$	$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$
<i>Energy</i>	
$1 \text{ cal} = 4.19 \times 10^7 \text{ ergs}$	$1 \text{ ergs} = 2.39 \times 10^{-8} \text{ cal}$
$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ joule}$	$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs}$
$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg}$	$1 \text{ erg} = 6.25 \times 10^{11} \text{ eV}$

รูปที่ ผ.ค.1 หน่วยและการแปลงหน่วยทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ cgs และ mks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stress and energy density

$$1 \text{ dyne/cm}^2 = 1.02 \times 10^{-8} \text{ kg/mm}^2$$

$$= 1.45 \times 10^{-5} \text{ lb/in}^2$$

$$1 \text{ kg/mm}^2 = 9.80 \times 10^7 \text{ dynes/cm}^2$$

$$= 1420 \text{ lb/in}^2$$

$$1 \text{ erg/cm}^3 = 10^{-1} \text{ joule/meter}^3$$

$$1 \text{ lb/in}^2 = 6.90 \times 10^4 \text{ dynes/cm}^2$$

$$= 7.03 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$$

$$1 \text{ joule/meter}^3 = 10 \text{ ergs/cm}^3$$

Power

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/sec}$$

$$= 10^7 \text{ ergs/sec}$$

$$= 0.239 \text{ cal/sec}$$

Core loss per unit weight

$$1 \text{ watt/kg} = 0.454 \text{ watt/lb}$$

$$1 \text{ watt/lb} = 2.205 \text{ watt/kg}$$

Metric prefixes

$$10^{12} \text{ tera } T$$

$$10^9 \text{ giga } G$$

$$10^6 \text{ mega } M$$

$$10^3 \text{ kilo } k$$

$$10^2 \text{ hecto } h$$

$$10^1 \text{ deka } da$$

$$10^{-1} \text{ deci } d$$

$$10^{-2} \text{ centi } c$$

$$10^{-3} \text{ mili } m$$

$$10^{-6} \text{ micro } \mu$$

$$10^{-9} \text{ nano } n$$

$$10^{-12} \text{ pico } p$$

$$10^{-15} \text{ femto } f$$

$$10^{-18} \text{ atto } a$$

รูปที่ ผ.ค.1 หน่วยและการแปลงหน่วยทางแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ cgs และ mks(ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน นิกเกิล(Nickel) แผ่นที่ 1

Properties of Pure Metals/777

Neptunium

See tables at end of this section

Nickel (Ni)

Compiled by Donald L. Pasquine
The International Nickel Company,
Inc.

Structure

Crystal structure. Face-centered
cubic; $a = 0.35167 \text{ nm}$ at 20°C

Mass Characteristics

Atomic weight. 58.71
Density. 8.902 Mg/m^3 at 25°C

Thermal Properties

Melting point. 1453°C
Boiling point. Approx 2730°C
Coefficient of thermal expansion.
Linear. $13.3 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$ at 0 to 100°C
Specific heat. $471 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ at 100°C
Recrystallization temperature.
 370°C
Thermal conductivity. $62.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
at 100°C

Electrical Properties

Electrical conductivity. Volumetric, 25.2% IACS at 20°C
Electrical resistivity. $68.44 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$
at 20°C ; temperature coefficient,
 $69.2 \text{ n}\Omega\cdot\text{M per K}$ at 0 to 100°C

Magnetic Properties

Magnetic susceptibility. Ferromagnetic
Magnetic permeability. $\mu_{\text{max}} = 1240$ at $B = 1900 \text{ G}$
Coercive force. 167 A/m (from $H = 4 \text{ kA/m}$)
Saturation magnetization. 0.616 T
at 20°C
Residual induction. 0.300 T
Hysteresis loss. 655 J/m^3 at $B = 0.6 \text{ T}$
Curie temperature. 358°C

Optical Properties

Color. Grayish-white
Spectral reflectance. 41.3% for $\lambda = 0.30 \mu\text{m}$

Nuclear Properties

Effect of neutron irradiation. Results in small increase in tensile strength but large increase in yield strength

Chemical Properties

General corrosion behavior. Nickel is not an active element chemically, does not readily evolve hydrogen from acid solutions and usually requires the presence of an oxidizing agent for significant corrosion to occur. Generally, reducing conditions retard corrosion whereas oxidizing conditions accelerate corrosion of nickel in chemical solutions. However, nickel may also form a protective corrosion-resistant, or passive, oxide film on exposure to some oxidizing conditions.

Mechanical Properties

Tensile properties. Typical. Tensile strength, 317 MPa ; 0.2% offset yield strength, 59 MPa ; elongation, 30% in 50 mm or 2 in.
Hardness. 64 HV (annealed)
Poisson's ratio. 0.31 at 25°C
Elastic modulus. Tension, 207 GPa ; shear, 76 GPa ; compression, 207 GPa
Velocity of sound. 4.7 km/s at 40°C

SELECTED REFERENCES

E. M. Wise and R. H. Schaefer, The Properties of Pure Nickel, *Metals and Alloys*, Vol 16, 1942
W. A. Wesley, Preparation of Pure Nickel by Electrolysis of a Chloride Solution, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol 103 (No. 5), 1956
G. W. P. Rengstorff, "High-Purity Metals", Report 222, Defense Metals Information Center, 1966
"Nickel and Its Alloys", National Bureau of Standards Monograph 106, 1968
J. Crangle and G. M. Goodman, The Magnetization of Pure Iron and Nickel, *Proceedings of the Royal Society (Series A)*, London, Vol 321, 1971
R. Hultgen, et al, *Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements*, American Society for Metals, 1973

Niobium (Columbium) (Nb)

Compiled by E. S. Bortlett
Batelle Memorial Institute
Reviewed for this edition by
L. H. Belz
Kowacki Eerylco Industries, Inc.Niobium is used as an alloying element in nickel- and cobalt-based superalloys as well as some grades of stainless and low alloy steels. It is also used as an alloy base for various combinations with zirconium, hafnium, tungsten, tantalum and molybdenum to increase high temperature mechanical properties. Niobium, niobium-titanium alloys and niobium-tin alloys are used as superconductors. Niobium oxidizes and becomes contaminated with absorbed oxygen rapidly above about 400°C in oxygen-containing atmospheres, including atmospheres normally considered neutral or reducing; absorbs hydrogen at temperatures between about 250 and 950°C from hydrogen-containing atmospheres. Contamination by interstitial elements results in loss of ductility at ambient temperature. Consequences of high impurity levels include impaired fabricability, increased ductile-to-brittle transition temperature, considerable low-temperature strengthening with attendant loss in ductility, intensified strain-aging effects at slightly elevated temperature, and slight strengthening at higher temperature.

Structure

Crystal structure. Body-centered cubic, $a = 0.3294 \text{ nm}$, atomic diameter, 0.294 nm
Slip plane. 110
Metallography. (1) Grind through 000 emery; (2) rough polish with coarse diamond in kerosene; (3) standard finish polish with alumina; (4) etchant (all acids in parts by volume of laboratory reagent grades): 30 lactic—10 nitric—5 hydrofluoric acid solution (more HF for alloys); (5) chemical polish (for freedom of distortion, if required): 30 lactic—30 nitric—1 to 2 hydrofluoric; (6) electrolytic etch (for particularly uniform grain-boundary definition): $90\text{H}_2\text{SO}_4$ — 10HF at 2 V .

Mass Characteristics

Atomic weight. 92.9064
Density. At 20°C : 8.57 Mg/m^3

Thermal Properties

Melting point. 2468°C
Boiling point. 4927°C
Coefficient of thermal expansion. Linear:

Mercury is a heavy silvery-white metal which is liquid at normal temperatures. In its solid form (below -39°C) it is soft, ductile and malleable. Because of its wide liquid range and high coefficient of thermal expansion it is widely used in thermometers, but its chief application is in the chemical and pharmaceutical industries. Specific industrial uses of mercury include solders (4 to 8% mercury); as an active element in primary batteries; mercury vapour plant and vacuum plant; rectifiers; fulminates; as amalgams with silver, tin and gold; and prealloys in powder metallurgy.

Mercury vapour is poisonous and the maximum concentration which can be tolerated in a working atmosphere is of the order of 0.1 g/m^3 per eight hour day.

Commercial purity mercury (99.7% mercury) is obtained by distilling the crude metal extracted from cinnabar. It normally contains traces of aluminium, copper, iron, lead, magnesium, chromium, nickel and manganese.

MG

Aluminium-manganese alloys (British).

MISCH METAL

Rare-earth alloy see *Lanthanum*.

MOLYBDENUM

Symbol: Mo

Specific gravity: 10.22

Density: 10.22 g/cm^3 (0.369 lb/in^3)

Tensile strength (approx) (annealed): 32.3 kg/mm^2 (20.5 tons/in^2)

Yield strength (annealed): 5.9 kg/cm^2 (3.75 tons/in^2)

Modulus of elasticity: $3.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ($47 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$)

Elongation (annealed): 30%

Melting point: 2610°C (4730°F)

Coefficient of linear expansion: $4.99 \times 10^{-6} / \text{degC}$

Thermal conductivity (circa 20°C): $0.34 \text{ cal/g/cm}^2\text{sec/degC}$

Specific heat at 20°C : 0.066 cal/g/degC

Electrical resistivity: $5.2 \mu \text{ ohm cm}$

Molybdenum is a soft silvery-white metal which can be machined and formed readily, and also welded. It work hardens to a brittle state but can be annealed. It cannot be hardened by heat treatment.

The principal use of molybdenum is as an alloying element in alloy steels and tool steels to improve mechanical properties and resistance to creep at elevated temperatures. It is an effective alternative to tungsten in this respect. It also reduces temper brittleness in low alloy steels and case hardening steels. A further application is in austenitic stainless steels to improve corrosion resistance.

Molybdenum metal is used for electrodes, filament supports, resistance ele-

ments, etc in the electrical industry; also for glass-to-metal seals, resistance welding electrodes and heavy duty contact breakers. The most ductile form of the metal is produced by powder metallurgy in bar form which can subsequently be reworked into fine wire or thin sheet. More limited use is made of molybdenum alloys, such as molybdenum (60%) cupro nickel (20%) platinum (10%) and tungsten (10%) as an alternative to osmium for tipping pen nibs; and molybdenum-copper-pure iron alloys for corrosion resistant duties in the chemical industry, etc.

MONEL

See *Nickel*.

MUNTZ METAL

60/40 copper/zinc brass

NICKEL AND NICKEL ALLOYS

Symbol: Ni

Specific gravity: 8.88

Density: 8.88 g/cm^3 (0.321 lb/in^3)

Melting point: 1453°C

The latest national specification for pure nickel is DIN 1701: 1974 see Table 45. Composition of typical commercial nickel is given in Table 46, with mechanical properties in Tables 47 and 48. British Standards for the specification of nickel and nickel alloys are:

BS 3071 Nickel-copper alloy castings

BS 3072 Nickel and nickel alloys, sheet and plate

BS 3073 Nickel and nickel alloys, strip

BS 3074 Nickel and nickel alloys, tube

BS 3075 Nickel and nickel alloys, wire

BS 3076 Nickel and nickel alloys, rods

Wrought nickel containing 99% nickel (NA11) has a tensile strength of $3.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (25 tons/in^2) in the annealed condition and a hardness of about 125 (Vickers). Low carbon nickel (NA12) has a slightly lower tensile strength and hardness in the annealed condition. The main difference between these two compounds is in the carbon content (NA11 0.15% maximum; NA12 0.02% maximum). Strength can be increased by cold working, although this will reduce ductility. The low carbon metal (NA12) is more ductile and is preferred for deep drawing, etc.

The various nickel alloy types and families are described under separate headings.

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน สารแม่เหล็กอัลลอยด์ แผ่นที่ 1

VALUES FOR THE LANGEVIN FUNCTION $\mathcal{L}(u)$
Compiled by Allen L. King

Because of random thermal rotations a dipole or dipole-like element ordinarily has an average dipole moment of zero. If it is placed in an orienting field F however it tends to align itself with the field so that the average component of the dipole moment parallel to the field equals p . Classically, if the system is in thermal equilibrium,

$$\bar{p} = p_0(\coth u - 1/u) = p_0\mathcal{L}(u)$$

Here p_0 is the permanent moment (electric or magnetic) of the dipole, and $\mathcal{L}(u)$ is the Langevin function of the argument u which equals Fp_0/kT . The following table gives values of $\mathcal{L}(u)$. Note that for $u \ll 1$, $\mathcal{L}(u) \approx u/3$; for $u \gg 1$, $\mathcal{L}(u) \approx (u - 1)/u$.

(u)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Diff.
0.0	.0000	.0033	.0066	.0100	.0133	.0166	.0200	.0233	.0267	.0300	.0333	33
0.1	.0333	.0366	.0400	.0433	.0466	.0499	.0532	.0566	.0599	.0632	.0665	33
0.2	.0665	.0698	.0731	.0764	.0797	.0830	.0863	.0896	.0928	.0961	.0994	33
0.3	.0994	.1027	.1059	.1092	.1125	.1157	.1190	.1222	.1255	.1287	.1319	32.5
0.4	.1319	.1352	.1384	.1416	.1448	.1480	.1512	.1544	.1576	.1608	.1640	32
0.5	.1640	.1671	.1703	.1734	.1766	.1797	.1829	.1860	.1891	.1922	.1954	31
0.6	.1954	.1985	.2016	.2046	.2077	.2108	.2139	.2169	.2200	.2230	.2261	31
0.7	.2261	.2291	.2321	.2351	.2381	.2411	.2441	.2471	.2500	.2530	.2559	30
0.8	.2559	.2589	.2618	.2647	.2677	.2706	.2735	.2763	.2792	.2821	.2850	29
0.9	.2850	.2878	.2906	.2935	.2963	.2991	.3019	.3047	.3075	.3103	.3130	28
1.0	.3130	.3158	.3185	.3213	.3240	.3267	.3294	.3321	.3348	.3375	.3401	27
1.1	.3401	.3428	.3454	.3481	.3507	.3533	.3559	.3585	.3611	.3636	.3662	26
1.2	.3662	.3688	.3713	.3738	.3763	.3789	.3813	.3838	.3863	.3888	.3912	25
1.3	.3912	.3937	.3961	.3985	.4010	.4034	.4057	.4081	.4105	.4129	.4152	24
1.4	.4152	.4175	.4199	.4222	.4245	.4268	.4291	.4314	.4336	.4359	.4381	23
1.5	.4381	.4404	.4426	.4448	.4470	.4492	.4514	.4535	.4557	.4578	.4600	22
1.6	.4600	.4621	.4642	.4663	.4684	.4705	.4726	.4747	.4767	.4788	.4808	21
1.7	.4808	.4828	.4849	.4869	.4889	.4908	.4928	.4948	.4967	.4987	.5006	20
1.8	.5006	.5026	.5045	.5064	.5083	.5102	.5120	.5139	.5158	.5176	.5194	19
1.9	.5194	.5213	.5231	.5249	.5267	.5285	.5303	.5321	.5338	.5356	.5373	18
2.0	.5373	.5390	.5408	.5425	.5442	.5459	.5476	.5493	.5509	.5526	.5543	17
2.1	.5543	.5559	.5575	.5592	.5608	.5624	.5640	.5656	.5672	.5687	.5703	16
2.2	.5703	.5719	.5734	.5750	.5765	.5780	.5795	.5810	.5825	.5840	.5855	15
2.3	.5855	.5870	.5885	.5899	.5914	.5928	.5943	.5957	.5971	.5985	.5999	14.5
2.4	.5999	.6013	.6027	.6041	.6055	.6068	.6082	.6096	.6109	.6122	.6136	14
2.5	.6136	.6149	.6162	.6175	.6188	.6201	.6214	.6227	.6240	.6252	.6265	13
2.6	.6265	.6277	.6290	.6302	.6314	.6327	.6339	.6351	.6363	.6375	.6387	12
2.7	.6387	.6399	.6411	.6422	.6434	.6446	.6457	.6469	.6480	.6492	.6503	12
2.8	.6503	.6514	.6525	.6536	.6547	.6558	.6569	.6580	.6591	.6602	.6612	11
2.9	.6612	.6623	.6634	.6644	.6655	.6665	.6675	.6686	.6696	.6706	.6716	10.5
3.0	.6716	.6726	.6736	.6746	.6756	.6766	.6776	.6786	.6796	.6805	.6815	10
3.1	.6815	.6824	.6834	.6843	.6853	.6862	.6872	.6881	.6890	.6899	.6908	9
3.2	.6908	.6917	.6926	.6935	.6944	.6953	.6962	.6971	.6980	.6988	.6997	9
3.3	.6997	.7006	.7014	.7023	.7031	.7040	.7048	.7056	.7065	.7073	.7081	8.5
3.4	.7081	.7089	.7097	.7106	.7114	.7122	.7130	.7138	.7145	.7153	.7161	8
3.5	.7161	.7169	.7177	.7184	.7192	.7200	.7207	.7215	.7222	.7230	.7237	8
3.6	.7237	.7245	.7252	.7259	.7267	.7274	.7281	.7288	.7295	.7302	.7310	7
3.7	.7310	.7317	.7324	.7331	.7337	.7344	.7351	.7358	.7365	.7372	.7378	7
3.8	.7378	.7385	.7392	.7398	.7405	.7412	.7418	.7425	.7431	.7438	.7444	7
3.9	.7444	.7450	.7457	.7463	.7469	.7476	.7482	.7488	.7494	.7501	.7507	6

PROPERTIES OF MAGNETIC ALLOYS

Name	Composition,* Weight percent					Remanence, B _r (Gauss)	Coercive force H _c (Oersteds)	Maximum energy product, (BH) _{max} (Gauss- Oersteds × 10 ⁻⁴)
	Al	Ni	Co	Cu	Other			
U.S.A.								
Alnico I	12	20-22	5	.....	.....	7,100	440	1.4
Alnico II	10	17	12.5	6	.....	7,200	540	1.6
Alnico III	12	24-26	.....	3	.....	6,900	470	1.35
Alnico IV	12	27-28	5	.....	.....	5,500	700	1.3
Alnico V†	8	14	24	3	.....	12,500	600	5.0
Alnico V DG†	8	14	24	3	.....	13,100	640	6.0
Alnico VI†	8	15	24	3	1.25 Ti	10,500	750	3.75
Alnico VII†	8.5	18	24	3	5 Ti	7,200	1,050	2.75
Alnico XII	6	18	35	.....	8 Ti	5,800	950	1.6
Carbon steel	.....	.....	.....	.....	1 Mn	10,000	50	0.2
Chromium steel	.....	.....	.....	.....	0.9 C	9,700	65	0.3
	.....	.....	.....	.....	3.5 Cr			
	.....	.....	.....	.....	0.9 C			
Cobalt steel	.....	.....	.....	.....	0.3 Mn	9,500	150	0.65
	.....	.....	.....	.....	2.5 Cr			
	.....	.....	.....	.....	8 W			
.....	.....	.....	.....	0.75 C	.....	.....	.....	.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน สารแม่เหล็กอัลลอยด์ แผ่นที่ 2

PROPERTIES OF MAGNETIC ALLOYS (continued)

Name	Composition,* Weight percent					Remanence, B _r (Gauss)	Coercive force H _c (Oersteds)	Maximum energy product, (BH) _{max} (Gauss- Oersteds × 10 ⁻⁴)
	Al	Ni	Co	Cu	Other			
Cunico	21	29	50	.....	.....	3,400	660	0.80
Cunife	20	.....	60	.....	.....	5,400	550	1.5
Ferroxdur 1	BaFe ₁₂ O ₁₉					2,200	1,800	1.0
Ferroxdur 2	BaFe ₁₂ O ₁₉ (oriented)					3,840	2,000	3.5
Platinum-Cobalt	.....	23	.....	77 Pt	.....	6,000	4,300	7.5
Remalloy	.....	12	.....	17 Mo	.....	10,500	250	1.1
Silmanol	4.4	.....	.....	86.6 Ag 8.8 Mn	.....	550	6,000	0.075
Tungsten steel	.....	.....	.....	5 W 0.3 Mn 0.7 C	.....	10,300	70	0.32
Vicalloy I	.....	52	.....	10 V	.....	8,800	300	1.0
Vicalloy II (wire)	.....	52	.....	14 V	.....	10,000	510	3.5
<i>Germany</i>								
Alni 90	12	21	.....	.....	.....	8,000	350	1.2
Alni 120	13	27	.....	.....	.....	6,000	570	1.2
Alnico 130	12	23	5	.....	.....	6,300	620	1.4
Alnico 160	11	24	12	4	.....	6,200	700	1.6
Alnico 190	12	21	15	4	.....	7,000	700	1.8
Alnico 250	8	19	23	4	6 Ti	6,500	1,000	2.2
Alnico 400†	9	15	23	4	.....	12,000	650	4.8
Alnico 5S0† (semicolumnar)	9	15	23	4	.....	13,000	700	6.0
Oerstit 800	9	18	19	4	4 Ti	6,600	750	1.95
<i>Great Britain</i>								
Alcomax I	7.5	11	25	3	1.5 Ti	12,000	475	3.5
Alcomax II	8	11.5	24	4.5	.....	12,400	575	4.7
Alcomax II SC (semicolumnar)	8	11	22	4.5	.....	12,800	600	5.15
Alcomax III	8	13.5	24	3	0.8 Nb	12,500	670	5.10
Alcomax III SC (semicolumnar)	8	13.5	24	3	0.8 Nb	13,000	700	5.80
Alcomax IV	8	13.5	24	3	2.5 Nb	11,200	750	4.30
Alcomax IV SC (semicolumnar)	8	13.5	24	3	2.5 Nb	11,700	780	5.10
Alni, high B,	13	24	.....	3.5	.....	6,200	480	1.25
Alni, normal	.....	.....	.....	.....	.....	5,600	580	1.25
Alni, high H,	12	32	.....	.....	0-0.5 Ti	5,000	680	1.25
Alnico, high B,	10	17	12	6	.....	8,000	500	1.20
Alnico, normal	.....	.....	.....	.....	.....	7,250	560	1.70
Alnico, high H,	10	20	13.5	6	0.25 Ti	6,600	620	1.70
Columnax (columnar)	similar to Alcomax III or IV					13,000-14,000	780-800	7.0-8.5
Hycomax	9	21	20	1.6	.....	9,500	830	3.3

* Remainder of unlisted composition is either iron or iron plus trace impurities
† Cast anisotropic. Unmarked ones are cast isotropic.

HIGH PERMEABILITY MAGNETIC ALLOYS
(See separate table for magnetic properties)

Name	Composition, Weight percent	Sp. gr., g/cm ³	Tensile strength		Remark	Use
			kg/mm ² **	Form		
Silicon iron AISI M 15	Si 4	7.68-7.64	44.3	.....	Annealed 4 hrs 802-1093°C	Low core losses
Silicon iron AISI M 8	Si 3	7.68-7.64	44.2	Grain oriented	Annealed 4 hrs 802-1204°C	.....
45 Permalloy	Ni 45; Mn 0.3	8.17	.....	.....	.....	Audio transformer, coils, relays
Monimax	Ni 47; Mo 3	8.27	.....	.....	.....	High frequency coils
4-79 Permalloy	Ni 79; Mo 4; Mn 0.3	8.74	55.4	.....	H ₂ annealed 1121°C	Audio coils, trans- formers, magnetic shields
Sinimax	Ni 43; Si 3	7.70	.....	.....	.....	High frequency coils
Nu-metal	Ni 75; Cr 2; Cu 5	8.58	44.8	.....	H ₂ annealed 1221°C	Audio coils, mag- netic shields, trans- formers
Supermalloy	Ni 79; Mo 5; Mn 0.3	8.77	.....	.....	.....	Pulse transformers, magnetic ampli- fiers, coils
2-V Per- mendur	Co 40; V 2	8.15	46.3	.....	.....	D-c electromagnets, pole tips

* Iron is additional alloying metal.
** kg/mm² × 1422.33 = lbs/in.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน สารแม่เหล็กอัสลอยด์ แผ่นที่ 3

PROPERTIES OF MAGNETIC ALLOYS (continued)

Properties of Antiferromagnetic Compounds

Compound	Crystal Symmetry	θ_N (K)	θ_P (K)	$(P_A)_{eff}$ μ_B	P_A μ_B
CoCl ₂	Rhombohedral	25	-38.1	5.18	3.1 ± 0.6
CoF ₂	Tetragonal	38	50	5.15	3.0
CoO.....	Tetragonal	291	330	5.1	3.8
Cr.....	Cubic	475			
Cr ₂ O ₃	Rhombohedral	307	485	3.73	3.0
CrSb.....	Hexagonal	723	550	4.92	2.7
CuBr ₂	Monoclinic	189	246	1.9	
CuCl ₂ ·2H ₂ O.....	Orthorhombic	4.3	4-5	1.9	
CuCl ₂	Monoclinic	~70	109	2.08	
FeCl ₂	Hexagonal	24	-48	5.38	4.4 ± 0.7
FeF ₂	Tetragonal	79-90	117	5.56	4.64
FeO.....	Rhombohedral	198	507	7.06	3.32
α-Fe ₂ O ₃	Rhombohedral	953	2940	6.4	5.0
α-Mn.....	Cubic	95			
MnBr ₂ ·4H ₂ O.....	Monoclinic	2.1	{2.5 1.3}	5.93	
MnCl ₂ ·4H ₂ O.....	Monoclinic	1.66	1.8	5.94	
MnF ₂	Tetragonal	72-75	113.2	5.71	5
MnO.....	Rhombohedral	122	610	5.95	5.0
β-MnS.....	Cubic	160	982	5.82	5.0
MnSe.....	Cubic	~173	361	5.67	
MnTe.....	Hexagonal	310-323	690	6.07	5.0
NiCl ₂	Hexagonal	50	-68	3.32	
NiF ₂	Tetragonal	78.5-83	115.6	3.5	2.0
NiO.....	Rhombohedral	533-650	~2000	4.6	2.0
TiCl ₃		100			
V ₂ O ₅		170			

1. θ_N = Néel temperature, determined from susceptibility maxima or from the disappearance of magnetic scattering.
2. θ_P = a constant in the Curie-Weiss law written in the form $\chi_A = C_A/(T + \theta_P)$, which is valid for antiferromagnetic material for $T > \theta_N$.
3. $(P_A)_{eff}$ = effective moment per atom, derived from the atomic Curie constant $C_A = (P_A)_{eff}^2(N^2/3R)$ and expressed in units of the Bohr magneton, $\mu_B = 0.9273 \times 10^{-18}$ erg gauss⁻¹.
4. P_A = magnetic moment per atom, obtained from neutron diffraction measurements in the ordered state.

SATURATION CONSTANTS AND CURIE POINTS OF FERROMAGNETIC ELEMENTS

Element	μ_s (20°C)	M_s (20°C)	μ_s (0 K)	μ_s	Curie Point (°C)
Fe	218.0	1,714	221.9	2,219	770
Co	181	1,422	182.5	1,715	1,131
Ni	54.39	434.1	57.50	604	358
Gd	0	0	253.3	1,112	18

μ_s = saturation magnetic moment/gram; M_s = saturation magnetic moment/cm³, in cgs units; μ_B = magnetic moment per atom in Bohr magnetons.
From American Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill Company (1963) by permission.

MAGNETIC PROPERTIES OF TRANSFORMER STEELS

HIGH SILICON TRANSFORMER STEEL

Ordinary Transformer Steel			B	H	Permeability
B (Gauss)	H (Oersted)	Permeability = B/H	2,000	0.50	4,000
			4,000	0.70	5,720
			6,000	0.90	6,670
2,000	0.60	3,340	8,000	1.28	6,250
4,000	0.87	4,600	10,000	1.99	5,020
6,000	1.10	5,450	12,000	3.60	3,340
8,000	1.48	5,400	14,000	9.80	1,430
10,000	2.28	4,380	16,000	47.4	338
12,000	3.85	3,120	18,000	165	109
14,000	10.9	1,280			
16,000	43.0	372			
18,000	149	121			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน สารแม่เหล็กอัลลอยด์ แผ่นที่ 4

PROPERTIES OF MAGNETIC ALLOYS (continued)

SATURATION CONSTANTS FOR MAGNETIC SUBSTANCES

Substance	Field intensity (For saturation)	Induced magnetization	Substance	Field intensity (For saturation)	Induced magnetization
Cobalt	9000	1300	Nickel, hard annealed	8000	400
Iron, wrought cast	2000	1700	Vicker's steel	7000	515
Manganese steel	4000	1200		15000	1600
	7000	200			

INITIAL PERMEABILITY OF HIGH PURITY IRON FOR VARIOUS TEMPERATURES

L. Alberts and B. J. Shepstone

Temperature °C	Permeability (gauss/oersted)
0	920
200	1040
400	1440
600	2550
700	3900
770	12580

MAGNETIC MATERIALS
High-permeability Materials

Material	Form	Approximate percent composition					Typical heat treatment °C	Permeability at B = 20 gauss	Maximum permeability	Saturation flux density B gauss	Hysteresis loss, W _e ergs/cm ³	Coercive force H _c oersteds	Resistivity microhm cm	Density, g/cm ³
		Fe	Ni	Co	Mo	Other								
Cold rolled steel	Sheet	98.5	—	—	—	—	950 Anneal	180	2,000	21,000	—	1.8	10	7.88
Iron	Sheet	99.91	—	—	—	—	950 Anneal	200	5,000	21,500	5,000	1.0	10	7.88
Purified iron	Sheet	99.95	—	—	—	—	1480 H ₂ + 880	5,000	180,000	21,500	300	.05	10	7.88
4% Silicon-iron	Sheet	96	—	—	—	4 Si	800 Anneal	500	7,000	19,700	3,500	.5	60	7.65
Grain oriented*	Sheet	97	—	—	—	3 Si	800 Anneal	1,500	30,000	20,000	—	.15	47	7.67
45 Permalloy	Sheet	54.7	45	—	—	.3 Mn	1050 Anneal	2,500	25,000	16,000	1,200	.3	45	8.17
45 Permalloy †	Sheet	54.7	45	—	—	.3 Mn	1200 H ₂ Anneal	4,000	50,000	16,000	—	.07	45	8.17
Hipernik	Sheet	50	50	—	—	—	1200 H ₂ Anneal	4,500	70,000	16,000	220	.05	50	8.25
Monimax	Sheet	—	—	—	—	—	1125 H ₂ Anneal	2,000	35,000	15,000	—	.1	80	8.27
Sinimax	Sheet	—	—	—	—	—	1125 H ₂ Anneal	3,000	35,000	11,000	—	—	90	—
78 Permalloy	Sheet	21.2	78.5	—	—	.3 Mn	1050 + 600 Q ‡	8,000	100,000	10,700	200	.05	16	8.60
4-79 Permalloy	Sheet	16.7	79	—	4	.3 Mn	1100 + Q	20,000	100,000	8,700	200	.05	55	8.72
Mu metal	Sheet	18	75	—	—	2 Cr, 5 Cu	1175 H ₂	20,000	100,000	6,500	—	.05	62	8.58
Supermalloy	Sheet	15.7	79	—	5	.3 Mn	1300 H ₂ + Q	100,000	800,000	8,000	—	.002	60	8.77
Permendur	Sheet	49.7	—	50	—	.3 Mn	800 Anneal	800	5,000	24,500	12,000	2.0	7	8.3
2V Permendur	Sheet	49	—	49	—	2 V	800 Anneal	800	4,500	24,000	6,000	2.0	26	8.2
Hiperco	Sheet	64	—	34	—	Cr	850 Anneal	650	10,000	24,200	—	1.0	25	8.0
2-81 Permalloy powder	Insulated powder	17	81	—	2	—	650 Anneal	125	130	8,000	—	<1.0	10*	7.8
Carbonyl iron	Insulated powder	99.9	—	—	—	—	—	55	132	—	—	—	—	7.86
Ferroxcube III	Sintered powder	—	—	—	—	MnFe ₂ O ₄ + ZnFe ₂ O ₄	—	1,000	1,500	2,500	—	.1	10*	5.0

* Properties in direction of rolling.
 † Similar properties for Nicaloi, 4750 alloy, Carpenter 49, Armco 48.
 ‡ At saturation.
 § Q, quench or controlled cooling.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่างมาตรฐาน สารแม่เหล็กอัลลอยด์ แผ่นที่ 5

PROPERTIES OF MAGNETIC ALLOYS (continued)
Permanent Magnet Alloys

Material	Percent composition (remainder Fe)	Heat treatment* (temperature, °C)	Magnetizing force H_{max} oersteds	Coercive force H_c oersteds	Residual induction B_r gauss	Energy product BH_{max} $\times 10^{-4}$	Method of fabrication†	Mechanical properties‡	Weight lb/in. ³
Carbon steel	1 Mn, 0.9 C	Q 800	300	50	10,000	.20	HR, M, P	H, S	.280
Tungsten steel	5 W, 0.3 Mn, 0.7 C	Q 850	300	70	10,300	.32	HR, M, P	H, S	.292
Chromium steel	3.5 Cr, 0.9 C, 0.3 Mn	Q 830	300	65	9,700	.30	HR, M, P	H, S	.280
17% Cobalt steel	17 Co, 0.75 C, 2.5 Cr, 8 W	—	1,000	150	9,500	.65	HR, M, P	H, S	.296
36% Cobalt steel	36 Co, 0.7 C, 4 Cr, 5 W	Q 950	1,000	240	9,500	.97	HR, M, P	H, S	.296
Remalloy or Comol	17 Mo, 12 Co	Q 1200, B 700	1,000	250	10,500	1.1	HR, M, P	H	.295
Alnico I	12 Al, 20 Ni, 5 Co	A 1200, B 700	2,000	440	7,200	1.4	C, G	H, B	.249
Alnico II	10 Al, 17 Ni, 2.5 Co, 6 Cu	A 1200, B 600	2,000	550	7,200	1.6	C, G	H, B	.256
Alnico II (sintered)	10 Al, 17 Ni, 2.5 Co, 6 Cu	A 1300	2,000	520	6,900	1.4	Sn, G	H	.249
Alnico IV	12 Al, 28 Ni, 5 Co	Q 1200, B 650	3,000	700	5,500	1.3	Sn, C, G	H	.253
Alnico V	8 Al, 14 Ni, 24 Co, 3 Cu	AF 1300, B 600	2,000	550	12,500	4.5	C, G	H, B	.264
Alnico VI	8 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, 1 Ti	—	3,000	750	10,000	3.5	C, G	H, B	.268
Alnico XII	6 Al, 18 Ni, 35 Co, 8 Ti	—	3,000	950	5,800	1.5	C, G	H, B	.26
Vicalloy I	52 Co, 10 V	B 600	1,000	300	8,800	1.0	C, CR, M, P	D	.295
Vicalloy II (wire)	52 Co, 14 V	CW + B 600	2,000	510	10,000	3.5	C, CR, M, P	D	.292
Cunife (wire)	60 Cu, 20 Ni	CW + B 600	2,400	550	5,400	1.5	C, CR, M, P	D, M	.311
Cunico	50 Cu, 21 Ni, 29 Co	—	3,200	660	3,400	.80	C, CR, M, P	D, M	.300
Vectolite	30 Fe ₃ O ₄ , 44 Fe ₂ O ₃ , 26 C ₂ O ₃	—	3,000	1,000	1,600	.60	Sn, G	W	.113
Silmanal	86.8 Ag, 8.8 Mn, 4.4 Al	—	20,000	6,000*	550	.075	C, CR, M, P	D, M	.325
Platinum-cobalt	77 Pt, 23 Co	Q 1200, B 650	15,000	3,600	5,900	6.5	C, CR, M	D	—
Hyflux	Fine powder	—	2,000	390	6,600	.97	—	—	.176

- * Value given is intrinsic H_c .
- † Q—Quenched in oil or water. A—Air cooled. B—Baked. F—Cooled in magnetic field. CW—Cold worked.
- ‡ HR—Hot rolled or forged, CR—Cold rolled or drawn, M—Machined, G—Must be ground, P—Punched, C—Cast, Sn—Sintered.
- § H—Hard, B—Brittle, S—Strong, D—Ductile, M—Malleable, W—Weak.

ELECTRON WORK FUNCTIONS OF THE ELEMENTS

Compiled by Herbert B. Michaelson, 1977

The measured values cited for polycrystalline and single-crystal specimens are selected as being the best available data at this time. The selection is based on (1) The validity of the experimental technique (e.g., vacua of 10^{-10} or 10^{-11} Torr, clean surfaces, and identification of crystal-face distribution and other surface conditions), and (2) Best agreement with preferred values and theoretical values of the true work function (given variously by Fomenko,¹ Riviere,² Trasatti,³ and Lang and Kohn⁴). Experimental data that are not well substantiated according to these criteria are listed in *italics*. Crystallographic directions for single-crystal data are indicated by parentheses.

Abbreviations apply to the experimental method: T, thermionic; P, photoelectric; CPD, contact potential difference; F, field emission. Important distinctions among such measurements are discussed in the Riviere² paper, pp. 180 to 198.

Element	Experimental value, ϕ (eV)	Experimental method	Ref.	Element	Experimental value, ϕ (eV)	Experimental method	Ref.
Ag	4.26	P	5		4.81 ₀ (111)	P	22
	4.64 (100)	P	5		4.70 ₀	P	23
	4.52 (110)	P	5		4.62 ₀	P	23
	4.74 (111)	P	6		4.68 ₇	P	23
Al	4.28	P	7	Ga	4.2	CPD	24
	4.41 (100)	P	8	Ge	5.0	CPD	25
	4.06 (110)	P	7		4.80 (111)	P	26
	4.24 (111)	P	8	Gd	3.1	P	10
As	3.75	P	9	Hf	3.9	P	10
Au	5.1	P	10	Hg	4.49	P	27
	5.47 (100)	P	11	In	4.12	P	28
	5.37 (110)		11	Ir	5.27	T	29
	5.31 (111)		11		5.42 (110)	F	30
B	4.45	T	12		5.76 (111)	F	30
Ba	2.7	T	13		5.67 (100)	F	31
Be	4.95	P	14		5.00 (210)	F	31
Bi	4.22	P	15	K	2.30	P	32
C	5.0	CPD	16	La	3.5	P	10
Ca	2.87	P	17	Li	2.9	F	33
Cd	4.22	CPD	18	Lu	3.3	CPD	34
Ce	2.9	P	10	Mg	3.66	P	35
Co	5.0	P	10	Mn	4.1	P	10
Cr	2.5	P	10	Mo	4.6	P	10
Cs	2.14	P	19		4.53 (100)	P	36
Cu	4.65	P	10		4.95 (110)	P	36
	4.59 (100)	P	20		4.55 (111)	P	36
	4.48 (110)	P	20		4.36 (112)	P	36
	4.94 (111)	P	20		4.50 (114)	P	36
	4.53 (112)	P	20		4.55 (332)	P	36
Eu	2.5	P	10	Na	2.75	P	37
Fe	4.5	P	10	Nb	4.3	P	10
	4.67 (100)	P	21		4.02 (001)	T	38
					4.87 (110)	T	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศิริมงคล สุทธิสาร เกิดวันที่ 4 กรกฎาคม 2514 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษา
 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระ
 จอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2536 และเข้าทำงานในตำแหน่ง Technical Staff แผนก
 Quality Assurance ของบริษัท NNC ประเทศไทยจำกัดเป็นระยะเวลาประมาณ 9 เดือน จากนั้น ก็
 เข้าทำงานในตำแหน่ง Boardman แผนก Power Plant ของบริษัท TPI ประเทศไทยจำกัดเป็นระยะ
 เวลาประมาณ 4 เดือน และสุดท้ายเข้าทำงานในตำแหน่ง Engineer แผนก Manufacturing Instruction
 ของบริษัท KCE ประเทศไทยจำกัดเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี จึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา
 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้