

ยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรม

MAGNETIC RUBBERS FROM NATURAL RUBBER FOR INDUSTRIAL
APPLICATIONS

ชัชวาล โลหิตวิเศษ

CHATCHAWAN LOHEVISAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1111-6

ยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรม

MAGNETIC RUBBERS FROM NATURAL RUBBER FOR INDUSTRIAL
APPLICATIONS



ชัชวาล โลहितวิเศษ

CHATCHAWAN LOHITVISAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันที่เดือนปี.....

ISBN 974-15-1111-6

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องสมุด หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC RUBBERS FROM NATURAL RUBBER FOR
INDUSTRIAL APPLICATIONS

CHATCHAWAN LOHITVISAT

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

2004

ISBN 974-15-1111-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2004

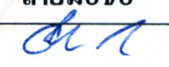

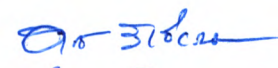

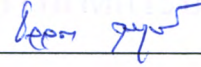
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรม
MAGNETIC RUBBERS FROM NATURAL RUBBER FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS
ชื่อนักศึกษา นายชัชวาล โลหิตวิเศษ
รหัสประจำตัว 43065612
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด	
รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย	
รศ.ดร.อารีย์	วิเชียรฉาย	
ผศ.ดร.ศิริพร	ดำรงศักดิ์กุล	
ดร.ชลลดา	ฤตวิรุฬห์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 พฤษภาคม 2547 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 6 ห้อง 602

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุนทร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๙.....เดือน.....๑๓๕๖.....พ.ศ.....๒๕๔๗.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรม
นักศึกษา	นายชัชวาล โลหิตวิเศษ
รหัสประจำตัว	43065612
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมยางธรรมชาติกับผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ หรือผงแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอนที่ 100 150 233 400 และ 900 phr โดยศึกษาผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ทั้งไม่เผา และเผา เพื่อปรับปรุงโครงสร้างผลึก และแบ่งศึกษาออกเป็นชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิก

ในงานวิจัยนี้พบว่ายางแม่เหล็กทุกชนิดมีแนวโน้มค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) แรงลบล่างสภาพแม่เหล็ก (H_c) พลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก (BH_{max}) ความแข็ง และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และแรงลบล่างสภาพแม่เหล็กภายใน (H_{ci}) ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นโดยที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ แรงลบล่างสภาพแม่เหล็กภายในมีแนวโน้มคงที่ สมบัติแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่าชนิดไอโซโทรปิก ยกเว้นแรงลบล่างสภาพแม่เหล็กภายใน เพราะชนิดแอนไอโซโทรปิกมีการเรียงผลึกในทิศทางเดียว ส่วนยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิกมีสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก แต่ชนิดแอนไอโซโทรปิกยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ยกเว้นค่า H_{ci} ยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอนมีสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กทางการค้าพบว่า สมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กทางการค้า มีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ แต่มีค่าต่ำกว่ายางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน ส่วนสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน และยางแม่เหล็กทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Magnetic Rubbers from Natural Rubber for Industrial Applications
Student	Mr. Chatchawan Lohitvisat
Student ID	43065612
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2004
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Somsak Woramongkolchai
Thesis Co-advisor	Associate Professor Dr. Aree Wichainchai

ABSTRACT

This research was studied the preparation, magnetic properties and mechanical properties of magnetic rubbers by mixing natural rubber with barium ferrite or neodymium iron boron powder loading of 100, 150, 233, 400 and 900 phr. Barium ferrite was sintered to improve its crystal structure. Both of the sintered and unsintered barium ferrites could be classified into two types: Isotropic and anisotropic types.

It was found that properties of magnetic rubbers, such as, residual flux density (B_r), coercive force (H_c), maximum energy product (BH_{max}), hardness and density had a trend to increase, but some properties, such as, intrinsic coercive force (H_{ci}), tensile strength and elongation at break had a trend to decrease when the powder loading was increased. Magnetic properties of the anisotropic type were higher than isotropic type except the H_{ci} because anisotropic magnetic rubber had crystal orientation in one direction. Isotropically unsintered barium ferrite magnetic rubbers had higher magnetic and mechanical properties than isotropically sintered barium ferrite magnetic rubbers. But in anisotropic types, the sintered barium ferrite magnetic rubbers had highly magnetic properties than unsintered barium ferrite magnetic rubbers except the H_{ci} . Neodymium iron boron showed the highest magnetic and mechanical properties. When it was compared to a commercial grade of magnetic rubber, it was found that magnetic properties of commercial grade were higher than those of barium ferrite rubber but it was lower than neodymium iron boron magnetic rubber. And mechanical properties of commercial grade were the same as neodymium iron boron magnetic rubber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากผู้ทำวิจัยได้รับคำแนะนำ การสนับสนุน และความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการดำเนินการจากผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ที่กรุณาชี้แนะ ให้ความรู้ และคำแนะนำในการดำเนินวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพรเดช คงชัยพาณิชย์ คุณปณิตिता มากขุนทด และบริษัทแอดวานซ์แมกเนติกแมททีเรียล (ไทยแลนด์) จำกัด ที่อนุเคราะห์แม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน รวมทั้งความช่วยเหลือในการทดสอบสมบัติทางแม่เหล็ก ทำให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณท่าน ส.ส.สมควร โอบอ้อม และบริษัทโอบอ้อมอุตสาหกรรม ในการอนุเคราะห์แม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยทำให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีบริษัทพรีเมียร์ที่ให้แนวคิดเริ่มต้นของงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และบุคคลในครอบครัวของผู้ทำวิจัยที่ให้คำแนะนำ ด้านต่าง ๆ อีกทั้งยังคอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอดทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ชัชวาล โลहितวิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลผู้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
สัญลักษณ์ และคำย่อ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตในการศึกษา.....	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ยางแม่เหล็ก (Magnetic Rubbers).....	3
2.2 ยาง.....	5
2.2.1 สมบัติของยาง (Properties of Rubbers).....	6
2.2.2 การเชื่อมโยงในยาง (Rubber Vulcanization).....	7
2.2.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....	8
2.2.4 การควบคุมกระบวนการผลิต.....	10
2.3 สารแม่เหล็ก.....	14
2.3.1 สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetism).....	15
2.3.2 สารพาราแมกเนติก (Paramagnetism).....	16
2.3.3 สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetism).....	16
2.3.4 สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetism).....	16
2.3.5 สารเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetism).....	17
2.3.5.1 โครงสร้างของคิวบิกเฟอร์ไรท์	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5.2 เฮกซะโกนอลเฟอร์ไรท์.....	21
2.3.6 การทำให้เป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของสารเฟอร์ไรท์ (Saturation Magnetization).....	23
2.5.7 สารแม่เหล็กอื่นๆ.....	26
2.3.8 การวัดสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	27
2.3.9 กราฟการทำให้เป็นแม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็ก (Magnetization Curve and Hysterisis Loop).....	32
2.3.10 สมบัติแอนไอโซโทรปิกของโครงผลึกเฮกซะโกนอล (Anisotropy in Hexagonal Crystal)	35
2.3.11 กระบวนการผลิตแม่เหล็กเฟอร์ไรท์.....	36
2.3.11.1 เซรามิก (Ceramic Process).....	36
2.3.11.2 วิธีแบบเปียก (Wet Method)หรือ การตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation).....	37
2.3.11.3 วิธีเตรียมแบบอื่น ๆ.....	37
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	42
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	43
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.3.1 การเตรียมผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา.....	43
3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์.....	43
3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดผงแม่เหล็ก.....	43
3.3.4 การเตรียมยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรปิก.....	44
3.3.5 การเตรียมยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดแอนไอโซโทรปิก.....	45
3.3.6 การเตรียมยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน.....	46
3.4 การทดสอบ.....	46
3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็ก (Mechanical Properties).....	46
3.4.2 การทดสอบสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Properties).....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็ก.....	48
3.5 ตัวแปรสำคัญในงานวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	50
4.1 ขนาดผงแม่เหล็ก.....	50
4.2 เวลาบ่มตัวยาง (Cure Time).....	50
4.3 ค่าความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney Viscosity).....	51
4.4 โครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์.....	52
4.5 สมบัติทางแม่เหล็ก.....	54
4.5.1 ผลของปริมาณผงแม่เหล็กต่อสมบัติทางแม่เหล็ก.....	55
4.5.2 ผลของการเผาผงแบเรียมเฟอร์ไรท์.....	58
4.5.3 ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์แบบไอโซโทรปิก และแบบแอนไอโซโทรปิก.....	61
4.6 สมบัติเชิงกล.....	65
4.6.1 ความแข็งแรงดึง.....	65
4.2.2 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด.....	66
4.2.3 ความแข็งกด.....	67
4.2.4 ความหนาแน่น.....	69
4.7 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็ก.....	69
4.8 เปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กทางการค้า.....	79
4.8.1 สมบัติทางแม่เหล็ก.....	80
4.8.2 สมบัติเชิงกล.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โมเมนต์การหมุนในไอออนชนิดต่าง ๆ.....	18
2.2 การเรียงตัวของไอออนโลหะในหน่วยเซลล์ของ Ferrite $MO \cdot Fe_2O_3$	20
2.3 การกระจายไอออนและผลลัพธ์ของโมเมนต์ต่อโมเลกุลของเฟอร์ไรท์บางชนิด.....	24
2.4 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กจากการคำนวณและการวัด.....	25
2.5 ข้อมูลของเฟอร์ไรท์ชนิดต่าง ๆ.....	26
3.1 อัตราส่วนผลมยางแม่เหล็ก.....	44
4.1 ขนาดผงแม่เหล็ก.....	50
4.2 เวลาในการบ่มตัวของยางแม่เหล็ก.....	51
4.3 ค่าความหนืดแบบมูนนี่.....	51
4.4 การเปรียบเทียบปริมาณผงแม่เหล็กในหน่วยต่าง ๆ.....	54
4.5 สมบัติทางแม่เหล็กของผงแม่เหล็ก.....	54
4.6 สมบัติของผงแม่เหล็กในการทดลอง และทางการค้า.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
2.1 ทิศทางสนามแม่เหล็กของไอโซโทรอปิก และแอนไอโซโทรอปิก.....	3
2.2 การทำให้เป็นแม่เหล็กทั้ง 2 ด้าน.....	4
2.3 การทำให้เป็นแม่เหล็กด้านเดียว.....	4
2.4 การทำให้เป็นแม่เหล็กหลายด้าน.....	4
2.5 การเชื่อมโยงในยาง.....	7
2.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	8
2.7 เครื่องผสมระบบปิด.....	9
2.8 เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้.....	12
2.9 เครื่องวัดการบ่มตัวของยาง.....	14
2.10 สมบัติทางแม่เหล็กของนิกเกิลเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	18
2.11 โครงผลึกของคิวบิกเฟอร์ไรท์.....	20
2.12 โครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรท์.....	21
2.13 อุณหภูมิต่าง ๆ ของความอึดตัวของกาทำให้เป็นแม่เหล็กของแบเรียมเฟอร์ไรท์.....	23
2.14 การทำให้เป็นแม่เหล็กอิมิตว์ที่ 0 องศาเคลวิน.....	25
2.15 ผลกระทบของความอึดตัวของกาทำให้เป็นแม่เหล็กที่ 0 องศาเคลวินเมื่อเติม ซิงค์เฟอร์ไรท์	26
2.16 วงจรสำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็กตัวอย่างวงแหวน.....	28
2.17 ภาคตัดขวางของวงแหวนโรว์แลน (Rowland Ring).....	29
2.18 กราฟกาทำให้เป็นแม่เหล็กของ (a) ไดอะแมกเนติก (b) พารา และแอนติเฟอร์โร แมกเนติก (c) เฟอร์โร และเฟอร์โรแมกเนติก.....	31
2.19 วงจรแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นเส้นแรง B.....	33
2.20 วงจรแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นเส้นแรงภายใน.....	34
2.21 การลบล้างสภาพแม่เหล็กโดยการลดแอมพลิจูดเป็นวงจร.....	35
2.22 การทำให้เป็นแม่เหล็กผลึกเดี่ยวของโคบอลต์.....	35
2.23 ปริมาณกาเกิดแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	37
3.1 การเตรียมยางแม่เหล็กแบบแอนไอโซโทรอปิก.....	45
3.2 เครื่องทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizer).....	47
3.3 เครื่องสร้างกราฟฮีสเทอรีซิส (Hysteresis graph).....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3.4 ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรสำคัญในงานวิจัย.....	49
4.1 หน่วยเซลล์ของแบเรียมเฟอร์ไรท์ (Unit Cell of Barium Ferrite).....	52
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD Pattern) ของแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา.....	53
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD Pattern) ของแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา.....	54
4.4 กราฟฮีสเทอรีซิสของตัวอย่างในจุดภาคที่ 2 (2 nd quadrant).....	55
4.5 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	56
4.6 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	56
4.7 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	57
4.8 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	58
4.9 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	59
4.10 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	59
4.11 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	60
4.12 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	61
4.13 วงจรแม่เหล็กของสารชนิดไอโซโทรอปิก และชนิดแอนไอโซโทรอปิก.....	62
4.14 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	63
4.15 แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	63
4.16 พลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	64
4.17 แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก.....	65
4.18 ค่าความแข็งแรงดึง.....	66
4.19 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด.....	67
4.20 ความแข็งกด (Shore A) ของยางแม่เหล็ก.....	68
4.21 ความแข็งกด (Shore D) ของยางแม่เหล็ก.....	68
4.22 ความหนาแน่นของยางแม่เหล็ก.....	69
4.23 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา.....	70
4.24 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา.....	71
4.25 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน.....	71
4.26 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 100 phr.....	72
4.27 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 100 phr.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4.28	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 100 phr.....73
4.29	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 150 phr73
4.30	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 150 phr.....74
4.31	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 150 phr.....74
4.32	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 233 phr75
4.33	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 233 phr.....75
4.34	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 233 phr.....76
4.35	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 400 phr76
4.36	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 400 phr.....77
4.37	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 400 phr.....77
4.38	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 900 phr78
4.39	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 900 phr.....78
4.40	สัดส่วนวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 900 phr.....79
4.41	สนามแม่เหล็กตกค้างของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....81
4.42	แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....81
4.43	พลังงานสูงสุดของแม่เหล็กของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....82
4.44	แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....82
4.45	ความแข็งแรงดึงของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....83
4.46	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....84
4.47	ความแข็งแรงกดของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....84
4.48	ความหนาแน่นของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....85

สัญลักษณ์ และคำย่อ

B (G)	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Induction, Flux Density)
B_d (G)	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ณ จุด BHmax (Flux Density at The Point BHmax on the Demagnetization Curve)
BH_{max} (MGOe)	พลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก (Maximum Energy Product, Peak Energy Product)
B_r (G)	สนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux Density, Residual Induction, Remanence)
G	เกาส์ (Gauss ($1G = 0.1 \text{ mT} = 1 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$))
H (Oe)	ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetic Flux Strength)
H_c (Oe)	แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (Coercivity, Coercive Force)
H_{ci} (Oe)	แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (Intrinsic Coercivity, Intrinsic Coercive Force)
M (emu/cm ³)	การทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization)
Oe	เออร์สเต็ด (Oersted ($4\pi \times 10^{-3} \text{ A.Turn/m}$))
phr	ปริมาณสารตัวเติมในยาง 100 ส่วน (Part per Hundred Rubber)
K (Weber/Am)	อัตราความเป็นแม่เหล็ก (Susceptibility)
μ (Weber/Am)	ความสามารถในการแผ่สนามอำนาจแม่เหล็ก (Permeability)
μ_0 (Weber/Am)	ความสามารถในการแผ่สนามอำนาจแม่เหล็กของอากาศ (Air Permeability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าประเทศไทยผลิต และส่งออกยางธรรมชาติได้เป็นอันดับ 1 ของโลก แต่การส่งออกยางของไทยยังอยู่ในรูปของวัตถุดิบเป็นส่วนใหญ่ ทำให้มูลค่าการส่งออกที่ได้รับมีมูลค่าต่ำ ดังนั้นการเปลี่ยนยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้มูลค่าของยางธรรมชาติสูงขึ้น อีกทั้งยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุประเภทยางอื่น ๆ คือมีความแข็งแรงดี และมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่า และในปัจจุบันวัสดุแม่เหล็กได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่นการใช้แม่เหล็กในไมโครมอเตอร์ (Micro Motor) คอมพิวเตอร์ กล้องถ่ายรูป โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น แต่แม่เหล็กมีข้อเสียคือ มีน้ำหนักมาก เปราะ แตกหักได้ง่าย และกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานสูงคือต้องมีการเผาแม่เหล็กที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และการขึ้นรูป แม่เหล็กมีรูปร่างที่จำกัด จึงมีข้อจำกัดบางประการในการเลือกใช้งาน ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงแม่เหล็กให้มีสมบัติให้เหมาะสมกับงาน คือการทำให้แม่เหล็กมีน้ำหนักเบา อ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น สามารถดัด พับ โค้งงอได้โดยไม่สูญเสียสมบัติทางแม่เหล็ก การปรับปรุงทำได้โดยการผสมผงแม่เหล็กกับวัสดุที่อ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นที่ดี และมีน้ำหนักเบา เช่น วัสดุประเภทยาง หรือพอลิเมอร์ ยางแม่เหล็กจึงเป็นอีกทางเลือกในการใช้เป็นวัสดุในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ แทนแม่เหล็ก แต่ยางแม่เหล็กมีข้อจำกัดในเรื่องของสมบัติทางแม่เหล็กที่ต่ำกว่าวัสดุแม่เหล็กทั่วไปเนื่องจากมีปริมาณแม่เหล็กที่น้อยกว่าแม่เหล็กทั่ว ๆ ไป ทำให้ต้องมีการวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กให้มีความเหมาะสมในงานด้านต่างตามต้องการ ในด้านของสมบัติทางแม่เหล็กสามารถปรับปรุงได้โดยการเลือกใช้ผงแม่เหล็กที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี เช่นใช้ผงแม่เหล็กแบเรียมสตรอนเตียมเฟอร์ไรท์ หรือผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน ส่วนในด้านสมบัติเชิงกล ปรับปรุงได้โดยเลือกใช้วัสดุประเภทยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุที่เหมาะสมได้แก่ยางธรรมชาติ เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวในข้างต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษา และค้นคว้าส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ และผงแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างกันในอัตราส่วนผสมที่หลากหลาย เพื่อให้ได้ยางแม่เหล็กที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวเลือกในงาน

อุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงสภาวะ และกระบวนการในการผลิตยางแม่เหล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตยางแม่เหล็กในระดับอุตสาหกรรมต่อไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

1. ศึกษาผลของปริมาณผงแม่เหล็ก และเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์
2. ศึกษา และเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กที่ได้จากผงเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผา
3. ศึกษา และเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กแบบเรียม-เฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทโรปิก และชนิดแอนไอโซโทโรปิก
4. ศึกษา และเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของผงเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตยางที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับงานในด้านต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ และผงแม่เหล็กที่เหมาะสม
2. สามารถทราบกระบวนการที่ใช้ในการผลิตยางแม่เหล็กที่มีสมบัติทางแม่เหล็กและสมบัติเชิงกลที่ดี
3. สามารถทราบแนวทางการวิจัยหากต้องการพัฒนาสมบัติยางแม่เหล็กให้มีคุณภาพสูงขึ้นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

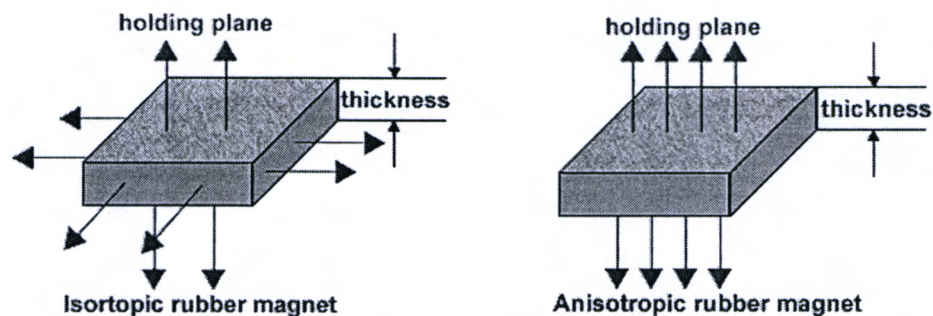
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางแม่เหล็ก (Magnetic Rubbers) [1-6]

ยางแม่เหล็กเป็นวัสดุทางแม่เหล็กที่มีความยืดหยุ่น อ่อนนุ่ม และสามารถดูดติดกับวัสดุทางแม่เหล็กได้เหมือนกับแม่เหล็กโดยทั่วไป ยางแม่เหล็กต่างๆ ไปผลิตได้จากการผสมผงแม่เหล็กเฟอร์ไรท์กับวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพอลิเมอร์ โดยที่ยางหรือพอลิเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) ผงแม่เหล็กที่นิยมใช้ในการผสมคือ แบเรียมเฟอร์ไรท์ ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) สตรอนเตียมเฟอร์ไรท์ ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$) หรือนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน ($NbFeB$) ส่วนยาง หรือพอลิเมอร์ที่นิยมใช้คือ ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เป็นต้น

ยางแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดไอโซโทรปิก (Isotropic) และชนิดแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) [7]

ชนิดแอนไอโซโทรปิกจะมีสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงกว่าชนิดไอโซโทรปิกอยู่ประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากผงแม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวให้โครงสร้างของสารแม่เหล็กไปในทิศทางเดียวกัน จึงมีสมบัติแม่เหล็กที่สูงกว่าชนิดไอโซโทรปิก ยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกจึงมีราคาสูงกว่า ส่วนยางแม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิกมีการจัดเรียงตัวของผงแม่เหล็กแบบสุ่ม (Random) สมบัติทางแม่เหล็กจึงต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.1

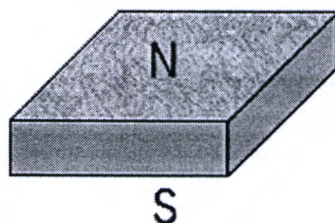


รูปที่ 2.1 ทิศทางสนามแม่เหล็กของไอโซโทรปิก และแอนไอโซโทรปิก [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

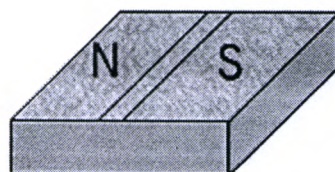
การทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานซึ่งมี 3 รูปแบบหลัก ๆ ดังนี้คือ

1. การทำให้เป็นแม่เหล็กทั้ง 2 ด้าน (Both Side) เป็นรูปแบบการทำให้เป็นแม่เหล็กโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.2



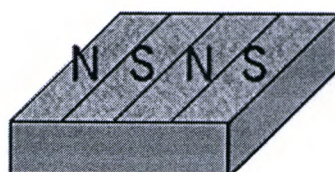
รูปที่ 2.2 การทำให้เป็นแม่เหล็กทั้ง 2 ด้าน [7]

2. การทำให้เป็นแม่เหล็กด้านเดียว (One Side) ใช้ในอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแม่เหล็กดังแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำให้เป็นแม่เหล็กด้านเดียว [7]

3. การทำให้เป็นแม่เหล็กหลายด้าน (Multiple) รูปแบบนี้มีแรงดึงดูดระหว่างผิวที่สูงทำให้พื้นผิวมีการแนบติดกันสนิทจึงนิยมใช้เป็นแถบแม่เหล็กขอบประตูตู้เย็น ดังแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทำให้เป็นแม่เหล็กหลายด้าน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็ก คือ ปริมาณการเรียงตัวของผงแม่เหล็ก และปริมาณของผงแม่เหล็กในยางแม่เหล็ก [8]

ยางแม่เหล็กที่มีปริมาณการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันมากกว่าจะให้สนามแม่เหล็กที่แรงกว่า และยางแม่เหล็กที่มีปริมาณของผงแม่เหล็กที่มากกว่าจะให้สนามแม่เหล็กที่มากกว่า แต่ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อเพิ่มปริมาณของผงแม่เหล็กจะส่งผลให้ความหนืดของยางแม่เหล็กมีมากขึ้น ทำให้ผงแม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันได้ยากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงแม่เหล็กมาก ๆ สมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กจะไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงแม่เหล็ก [8]

เมื่อทำการผสมผงแม่เหล็กแล้วทำให้ยางแม่เหล็กมีข้อดีคือ สามารถผลิตให้มีรูปร่าง และขนาดตามต้องการได้ง่าย ยางแม่เหล็กมีความยืดหยุ่นทำให้ง่ายต่อการตัด พับ ดัด และการประกอบ ไม่แตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก หรือ ตกพื้น มีน้ำหนักเบากว่าแม่เหล็กเฟอร์ไรท์เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ($3.6-3.7 \text{ g/cm}^3$) เมื่อเปรียบเทียบกับแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ (5.4 g/cm^3) มีความต้านทานการลบล้างสภาพแม่เหล็กสูง (Demagnetization Resistance) ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี ดูดซับแรงกระแทก เก็บเสียงได้ดี รูปแบบการทำให้เป็นแม่เหล็กสามารถทำได้ตลอดเวลาแม้กระทั่งในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต และสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) ทำให้มีขนาดสม่ำเสมอจึงนำยางแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น ยางขอบประตูตู้เย็น แม่เหล็กแผ่นสำหรับของเด็กเล่น มอเตอร์กระแสตรง (DC-Motor) [1-6]

2.2 ยาง [9]

ยางเป็นวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นสามารถถูกดึงออกได้หลายเท่า และสามารถหดกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อปล่อยแรงดึง สามารถรับแรงได้มาก และมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดี ยางเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่าง ๆ เช่น ยางวงล้อ สายยาง สายพาน ยางรัดของ ถุงมือยาง ยางวิศวกรรม และพื้นรองเท้า เป็นต้น ยางที่ใช้เป็นวัสดุดิบแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ โดยมีสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. มีน้ำหนักโมเลกุลมาก
2. มีสายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่น (Flexible)
3. มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำ
4. ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity, χ_c) ต่ำ
5. สามารถเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ได้

2.2.1 สมบัติของยาง (Properties of Rubbers) [9-10]

สมบัติโดยทั่วไปของยางคือ หดกลับเมื่อได้รับแรง ยืดหยุ่นสูง เหนียว การซึมผ่านของน้ำ และก๊าซต่ำ ยางแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะ ขึ้นกับโครงสร้างทางโมเลกุลของยาง ปริมาณการเชื่อมโยง (Degree of Crosslinking) และขึ้นกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในสูตรยางผสม โดยทั่วไปองค์ประกอบของสูตรยางผสมมี 9 ชนิดได้แก่

1. ยาง (Rubbers) เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของยางผสมสูตร อาจจะเป็นเนื้อยางอย่างเดียว หรือเป็นยางผสมเข้มข้นก็ได้ เช่น ยางผสมน้ำมัน ยางผสมเขม่าดำ หรือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ก็ได้ การเลือกชนิดของยางจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์
2. สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing Aids) เป็นสารที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของยางขณะทำการผสม และในขั้นตอนการแปรรูป
3. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing Agents) เป็นสารที่จำเป็นในการเชื่อมโยงยางเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยาง ทำให้โครงสร้างของยางเป็นโครงร่างแหสามมิติ
4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) ใช้ร่วมกับสารเชื่อมโยง โดยจะช่วยลดเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มอัตราการเชื่อมโยง และช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกด้วย
5. ตัวกระตุ้น (Activators) จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีขึ้น เพิ่มอัตราการเชื่อมโยง และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์
6. ตัวต้านอายุการใช้งาน (Age Resisters) เช่น สารป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารป้องกันโอโซน สารเสถียรภาพทางความร้อน และแสง มีหน้าที่ลดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยางในระหว่างกระบวนการผลิต และระหว่างการใช้งาน
7. สารตัวเติม (Fillers) เป็นสารที่ใช้เสริมแรง ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ ปรับปรุงกระบวนการผลิต หรือใช้ลดต้นทุน
8. สารช่วยให้อ่อนนุ่ม (Softeners) ใส่ในยางเพื่อช่วยในการผสมส่งผลให้มีสมบัติยืดหยุ่นที่ดีขึ้น และไปแทรกห่างสายโซ่ยางโดยไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเสียไป
9. ส่วนประกอบอื่นๆ (Miscellaneous Ingredients) เป็นสารที่ใส่เพื่อต้องการสมบัติเป็นพิเศษ โดยไม่เป็นสารเคมีหลักในการผสมยาง เช่น สี สารให้ฟอง สารป้องกันไฟฟ้าสถิต เป็นต้น

จากที่กล่าวมาชนิด และอัตราส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง ดังนั้นการนำไปใช้จึงต้องศึกษาให้ละเอียดถี่ถ้วนเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การเชื่อมโยงในยาง (Rubber Vulcanization) [9-10]

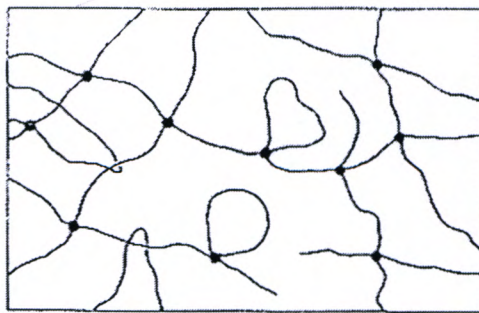
การเชื่อมโยงเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนยางสายโซ่ตรงที่อ่อน นิ่ม ไหลได้ ให้เป็นเทอร์โมเซต มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทนอุณหภูมิสูง แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง และมีความเสถียรของรูปร่างสูง สมบัติของยางที่เชื่อมโยงแล้วจะขึ้นกับชนิดของยาง ปริมาณของสารตัวเติม การกระจายตัวของสารตัวเติม และชนิดของสารเชื่อมโยง เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่เกิดขึ้นเมื่อยางเชื่อมโยงคือ

- ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion and Wear) เพิ่มขึ้น
- ความต้านทานการลื่นไถล (Slide Resistance)
- สมบัติทางพลวัต (Dynamic Properties)
- การเปลี่ยนขนาดถาวรเนื่องจากแรงกด (Compression Set) ลดลง
- เอจจิง (Aging)

องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการเชื่อมโยงคือ

1. สารเชื่อมโยง ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ และออกไซด์ของโลหะ เป็นต้น
2. สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสารช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้นหรือช้าลง โดยช่วยให้การใช้สารเชื่อมโยงลดจำนวนลง เช่น 2-Mercaptobenzothiazole (MBT)
3. ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาทำงานร่วมกับสารเชื่อมโยง และสารเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อลดปริมาณการใช้สารลง เช่น ซิงค์สเตียเรต

กำมะถันปริมาณ 0.5-5 phr (Part Per Hundred Rubber) นิยมใช้มากที่สุดใน การเชื่อมโยงยางที่ไม่อิมิตัว (มีพันธะคู่ในโครงสร้าง) เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวทาไดอีน (BR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และยางนีโอพรีน (Neoprene) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก ส่วนเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ในยางที่อิมิตัว เมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสม (120-180°C) จะเกิดการเชื่อมโยงในยาง ซึ่งสามารถเกิดได้ในหลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเชื่อมโยงในยาง [9]

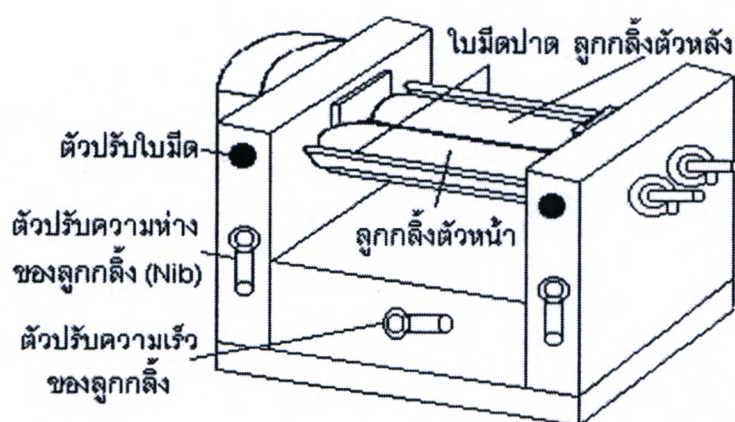
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [9]

ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางขึ้นอยู่กับสูตรยางผสม เครื่องจักร และสภาวะที่ใช้ในการผลิต ในกระบวนการผลิตต้องปฏิบัติอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และลดการเกิดการสูญเสียจากกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด กระบวนการผลิตมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การผสมสูตรยาง (Compounding) การขึ้นรูปยาง และการประกอบผลิตภัณฑ์ (Shaping) และการทำให้ยางเชื่อมโยง (Vulcanizing หรือ Curing)

การผสมสูตรยาง เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง จากเหตุผลที่ยางธรรมชาติเป็นสารอินทรีย์ที่น้ำหนักโมเลกุลสูง และไม่มีหัว ดังนั้นจึงมีความสามารถในการผสมรวมกับสารเคมีที่ใช้ในการผสมได้ต่ำ เพราะฉะนั้นในขั้นตอนการผสมสูตรยางจะต้องพิจารณาถึงหลักการทั่วไปของประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผสมสูตรยาง เช่น ชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ในการผสมสูตรยาง เวลา อุณหภูมิ ลำดับในการผสม และปริมาณทั้งหมดของส่วนผสมที่ใช้ในการผสมแต่ละครั้ง เครื่องจักรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผสมสูตรยางมีดังนี้

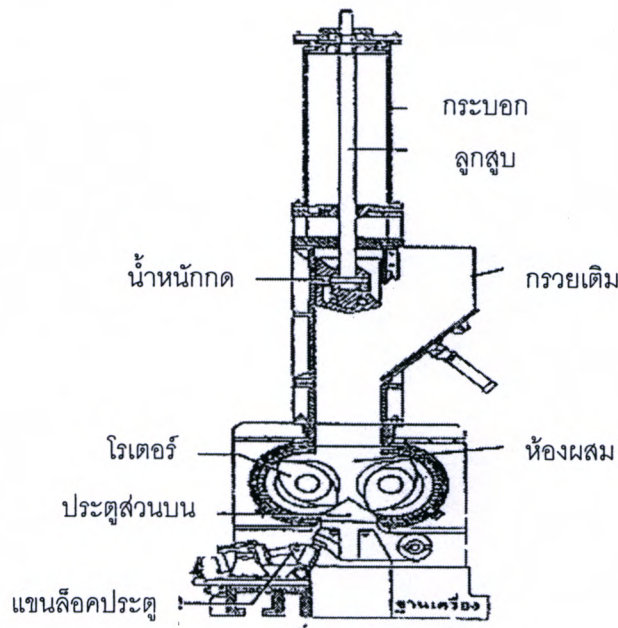
1. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) เป็นเครื่องผสมสูตรยางที่มีความนิยมมากที่สุด ตัวเครื่องประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกวางขนานกันในแนวนอนโดยที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งสามารถปรับเปลี่ยนแปลงได้ ลูกกลิ้งทั้งสองจะหมุนสวนทางกันด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (รูปที่ 2.6) โดยในการผสมสูตรยางจะเริ่มต้นด้วยการชั่งยาง และสารเคมีที่ใช้ในการผสมสูตร จากนั้นจะนำยางมาบด (Mastication) เพื่อให้ยางนิ่มและพันติดลูกกลิ้ง เติมสารเคมีที่ใช้ในการผสมสูตรยางชนิดต่าง ๆ ผสมลงในยางตามลำดับโดยผสมสารตัวเร่งและกำมะถันในลำดับสุดท้าย



รูปที่ 2.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) เป็นเครื่องผสมสูตรยางที่มีประสิทธิภาพมาก มีราคาสูง ตัวเครื่องประกอบด้วยกรวยป้อนสาร (Feed Hopper) อยู่เหนือห้องผสม ภายในห้องผสมประกอบด้วยโรเตอร์สองอัน หมุนสวนทางกันด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน และมีลูกสูบกด (Ram Piston) เพื่อช่วยให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี ส่วนการเหนี่ยวนำยางผสมสูตรออกจากเครื่อง สามารถทำได้โดยการเลื่อนแผ่นเปิดปิดด้านล่างออกหรือเทออก (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 เครื่องผสมระบบปิด [9]

การขึ้นรูปยาง และการประกอบผลิตภัณฑ์ การขึ้นรูปยาง และการประกอบผลิตภัณฑ์ เป็นขั้นตอนหลังจากการผสมยาง โดยจะนำยางที่ผสมได้ มาแปรรูปด้วยเครื่องรีดสองลูกกลิ้ง หรือสามลูกกลิ้ง เพื่อทำให้เป็นแผ่นตามความหนาที่ต้องการหรือนำยางที่ได้มาประกอบกับสิ่งทอ จากนั้นจึงตัดให้ได้ตามขนาด และน้ำหนักที่ต้องการ การเหนี่ยวนำขึ้นงานที่ได้ไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หรือขึ้นรูปยางด้วยเครื่องอัดรีดยาง โดยสามารถผลิตขึ้นงานที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามขนาดที่ต้องการ เช่น ยางวงล้อ พื้นรองเท้าเป็นต้น เครื่องจักรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) เครื่องรีดกลิ้ง (Calender) และเครื่องอัดรีด (Extruder)

การทำให้ยางเชื่อมयोग เป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ซึ่งจะทำให้ยางบ่มตัว (Cure) หรือเชื่อมयोग ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงยางสายโซ่ตรงที่อ่อน นิ่ม ไหลได้ให้มีโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติ ทนอุณหภูมิสูง แข็งแรง ยึดหยุ่นสูง และมีความเสถียรของรูปร่างสูง ในอุตสาหกรรมยาง สารเคมีที่ช่วยให้ยางเชื่อมयोग คือ กำมะถัน และเครื่องจักรที่นิยมใช้ในการทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ยางเชื่อมโยงได้แก่ เครื่องอัดร้อน (Hot Press) และเครื่องฉีดขึ้นรูปยาง (Rubber Injection Machine)

2.2.4 การควบคุมกระบวนการผลิต [9]

ในการควบคุมกระบวนการผลิตจะสามารถทำได้โดยการสุ่มตัวอย่างสูตรยางผสมที่ได้จากขั้นตอนการผสม เพื่อทำการตรวจสอบสมบัติด้านความหนืด และสมบัติในการเชื่อมโยงของสูตรยางผสมที่ได้จากการผสมแต่ละครั้ง ในการควบคุมการผลิตจะใช้เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ และเครื่องวัดการบ่มตัวของยาง

1. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney Viscometer) เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบการไหล และความสามารถในการแปรรูปของยางดิบสามารถใช้วัดความหนืดหรือความสามารถในการไหลภายใต้อุณหภูมิที่กำหนดของยางผสมสูตร ใช้ตรวจสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure Characteristics) ระยะเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Mooney Scorch Time) และสามารถวัดอัตราการเชื่อมโยง (Cure Rate) หรือดัชนีการเชื่อมโยง (Cure Index) ของยางผสมสูตร โดยภายในตัวเครื่องจะมีโรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วคงที่อยู่ที่ช่องใส่ยาง และจะให้อุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ เมื่อเครื่องเดินโรเตอร์จะหมุน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวของโรเตอร์เนื่องจากความหนืดของยาง โดยที่ทอร์ก (Torque) หรือแรงบิดที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการไหลของยางที่อุณหภูมิที่ทดสอบ ซึ่งทำให้สามารถวัดค่าความหนืดแบบมูนนี่ได้ เมื่อเริ่มเดินเครื่อง ยางที่อยู่ในช่องใส่ยางยังมีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นทอร์กจึงมีค่าสูง เมื่อเวลาผ่านไปยางที่อยู่ในช่องใส่ยางร้อนขึ้นทำให้ยางนิ่มและไหลได้ดี ทอร์กจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนทอร์กมีค่าต่ำสุด และหลังจากนั้นทอร์กจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนต้น และค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมาจนค่าทอร์กมีค่ามากกว่าตอนเริ่มทดสอบ การวัดความหนืดแบบมูนนี่จะทำการอ่านค่าทอร์กเมื่อใส่ยางเข้าไปในเครื่องแล้ว 5 นาที โดยเขียนค่าความหนืดแบบ มูนนี่ เป็น ML 1+4(100°C) ซึ่งหมายความว่า เป็นค่าความหนืดแบบมูนนี่ที่ 100°C โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ทำการอุ่นยาง 1 นาที แล้วทำการวัด โดยให้โรเตอร์หมุนอีก 4 นาที ในกรณีที่ยางมีความแข็งมากจะใช้โรเตอร์เล็กในการทดสอบ และจะใช้สัญลักษณ์ S แทน L และสามารถทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจาก 100 เป็น 120 และ 125°C ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

การวิเคราะห์ลักษณะการวัลคาไนซ์ทำได้โดยการอ่านค่าความหนืดแบบมูนนี่ต่ำสุด (V_{min}) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ t_5 หมายถึงช่วงเวลาที่ค่าความหนืดแบบมูนนี่เพิ่มขึ้นจากค่าทอร์กต่ำที่สุด 5 หน่วย ถัดจากนี้ค่าความหนืดแบบมูนนี่จะเพิ่มขึ้นจากค่าต่ำที่สุด 35 หน่วย เรียกว่า t_{35} โดยสามารถหาค่าดัชนีการวัลคาไนซ์หรืออัตราการวัลคาไนซ์ได้จากสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดัชนีการวัลคาไนซ์หรืออัตราการวัลคาไนซ์ (t}_{30}) = t_{35} - t_5 \quad (2.1)$$

และสามารถคำนวณหาค่าเวลาการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมแบบมูนนี่ (Mooney Optimum Cure Time, t_c) ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$t_c = t_5 + 10 t_{30} \quad (2.2)$$

ถ้าการใช้แกนหมุนขนาดเล็ก (Small Rotor) จะหาค่าดัชนีการวัลคาไนซ์ได้ดังสมการ (2.3)

$$t_{15} = t_{18} - t_3 \quad (2.3)$$

นอกจากนี้เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการแปรรูป (Processability) นอกเหนือจากการตรวจสอบระดับในการผสม ในกรณีที่ทำกรผสมยางนาน เพื่อให้คุณภาพในการผสมดี ค่าความหนืดแบบมูนนี่จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการผสมยางที่ใช้เวลาสั้น (คุณภาพของการผสมไม่ดี) ดังนั้นค่าความหนืดแบบมูนนี่ของการผสมยางแต่ละครั้งจะใช้เป็นเครื่องชี้คุณภาพของการผสมได้ โดยใช้ค่าดัชนีการผสม (Mixing Index, MI) เป็นค่าบ่งชี้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

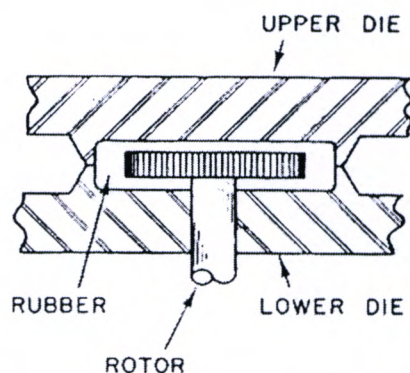
$$MI \% = 100 \times [(ML\ 1+4)_u - (ML\ 1+4)_5] / (ML\ 1+4)_5 \quad (2.4)$$

เมื่อ

$(ML\ 1+4)_u$ = ค่าความหนืดแบบมูนนี่ของการผสมยางแต่ละครั้ง

$(ML\ 1+4)_5$ = ค่าความหนืดแบบมูนนี่มาตรฐาน

ถ้าในกรณี $MI = 0 \%$ หมายถึงการผสมยางแต่ละครั้งได้คุณภาพดีระดับมาตรฐาน



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้ [9]

2. เครื่องวัดการบ่มตัวของยาง (Curelastometer[®] (ODR)) เป็นเครื่องที่ใช้วัดลักษณะการบ่มตัวของยาง ที่มีประโยชน์อย่างมากในการควบคุมการผลิตในอุตสาหกรรมยางดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในการเปลี่ยนจากยางที่ยังไม่เชื่อมโยงไปเป็นยางเชื่อมโยง โดยสามารถศึกษาและตรวจสอบได้จากเส้นกราฟของการเชื่อมโยง ซึ่งได้จากการเหนี่ยวนำยางไปทดสอบโดยใช้เครื่องวัดลักษณะการบ่มตัวของยาง ที่อุณหภูมิคงที่จะได้เส้นกราฟของการบ่มตัวที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจากยางที่ยังไม่เชื่อมโยงเป็นยางเชื่อมโยงสามารถแบ่งระยะเวลาที่ใช้ได้เป็น 3 ระยะคือ

ระยะที่ 1 ช่วงเวลาในการแปรรูป (Processing Time)

ความสามารถในการแปรรูปเป็นสมบัติที่สูตรยางผสมที่อยู่ในสถานะที่ยังไม่เชื่อมโยงไปเป็นยางที่เชื่อมโยง และมีความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับความหนืดของสูตรยางผสมและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงของยางภายใต้สภาวะที่ใช้ในการแปรรูป ค่าของความหนืดวัดได้จากแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปยางไปเป็นรูปร่างต่าง ๆ เวลาที่ใช้ก่อนการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นเวลาที่เริ่มต้นในการเชื่อมโยง หรือระยะเวลาความปลอดภัยในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง สูตรยางผสมที่เปลี่ยนแปลงปริมาณและชนิดของสารตัวเร่ง กำมะถัน สารตัวเติม ยาง น้ำมันผสมยาง และสารเติมแต่ง จะส่งผลต่อระยะเวลาการเชื่อมโยง และความหนืดของยางผสมสูตร

ระยะที่ 2 ช่วงระยะเวลาในการบ่มตัว (Curing Time)

ช่วงระยะเวลาในการบ่มตัวของยาง ค่ามอดุลัส ค่าทอร์ค จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มตัว ช่วงระยะเวลาในการบ่มตัวเป็นระยะเวลาที่ยางยังอยู่ในแม่พิมพ์ระหว่างการอัดร้อน โดยจะขึ้นอยู่กัชนิด และปริมาณของสารตัวเร่ง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้ยางบ่มตัว ปริมาณของกำมะถัน และชนิดของยางที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่ 3 การบ่มตัวของยาง (Cure)

การเชื่อมโยงของยางเป็นสภาวะสุดท้ายในวัฏจักรการเชื่อมโยงของยาง ซึ่งจะเป็นสภาวะที่ยางบ่มตัวได้สูงสุด (Maximum Cure) สภาวะในการบ่มตัวของยางจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึง มอดุลัส ความแข็ง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ปริมาณสารตัวเร่งและกำมะถัน ซึ่งเป็นสารเคมีที่ส่งผลโดยตรงต่อสภาวะในการเชื่อมโยงดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้เครื่องวัดการบ่มตัวของยางในการควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

เครื่องวัดการบ่มตัวของยางมีข้อดี คือ

1. มีความสะดวกและรวดเร็วในการควบคุมการผลิต ใช้เวลาไม่เกิน 5 นาที และสามารถบอกสมบัติต่าง ๆ ของยางผสมสูตรได้ดังนี้

- ความสามารถในการแปรรูป หรือการไหลเนื่องจากความร้อน โดยดูได้จากค่าทอร์คต่ำสุด

- ระยะเวลาก่อนการบ่มตัวของยาง (Scorch Time) ทำให้ทราบระยะเวลาปลอดภัยที่ใช้ในการแปรรูป

- อัตราเร็วในการแปรรูปและความคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานที่กำหนด

- ค่ามอดุลัสที่เปลี่ยนแปลงจากมาตรฐานที่กำหนด

2. ลดระยะเวลาและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความเหนียวแบบมูนี และสมบัติเชิงกลของยางทุกครั้งที่มีการผลิต

3. สามารถใช้เป็นข้อมูลในการยอมรับและไม่ยอมรับยางผสมสูตรทำให้ยางที่ผลิตได้มีมาตรฐานตรงตามที่กำหนด

การวัดการเชื่อมโยงของยางโดยใช้เครื่องวัดการบ่มตัวของยางทำได้โดยนำยางมาใส่ในช่องใส่ยางซึ่งสามารถตั้งอุณหภูมิได้ เครื่องจะทำการวัดค่าแรงบิดต่อเวลา และจะได้กราฟแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque, MI) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสามารถในการแปรรูป

2. เวลาที่เส้นกราฟเริ่มสูงขึ้น (Time to Incipient Cure หรือ Scorch Time, t_{s2} หรือ t_{10}) ซึ่งจะทำให้ทราบระยะเวลาปลอดภัยในการแปรรูป

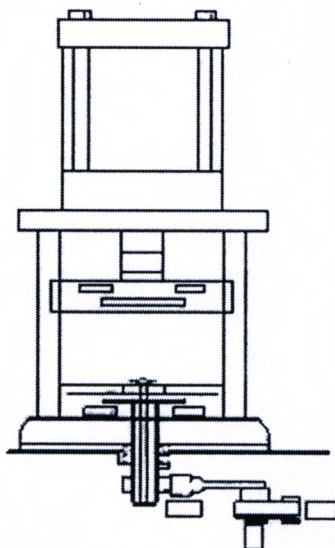
3. เวลาที่ยางวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นสัดส่วนร้อยละของการวัลคาไนซ์สูงสุดทำให้สามารถหาเวลาในการวัลคาไนซ์

4. แรงบิดสูงสุด ซึ่งจะทำให้ทราบความแข็งของยางวัลคาไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 % (เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงเวลาก่อนการเชื่อมโยง)

การหาเวลาที่ยางเชื่อมโยงที่เหมาะสมนั้นสามารถทำได้โดยหาเวลาที่ยางวัลคาไนซ์เกิดขึ้น 90% หรือ 95% เนื่องจากเวลาที่ 100% จะเป็นเวลาที่นานเกินไป และอาจจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง



รูปที่ 2.9 เครื่องวัดการบ่มตัวของยาง (Curelastermeter[®] (ODR)) [9]

2.3 สารแม่เหล็ก [12-13]

สมบัติทางแม่เหล็กเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เช่นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเกิดจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่รอบๆ นิวเคลียสที่มีประจุไฟฟ้าลบจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กของอะตอม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การเคลื่อนที่ในออร์บิทัล (Orbital Motion) และการเคลื่อนที่แบบหมุน (Spin Motion) ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัล (Orbital Magnetic Moment) และโมเมนต์แม่เหล็กของการหมุน (Spin Magnetic Moment) โดยความแรงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเรียกว่าโมเมนต์แม่เหล็ก หน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กเรียกว่าบอร์แมกนิตรอน (Bohr Magnetron; μ_B) มีค่า 9.27×10^{-27} (A.m²) โมเมนต์แม่เหล็กในอะตอมจึงเกิดจากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัล และโมเมนต์แม่เหล็กของการหมุน แต่ในโลหะทรานซิชันที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีอิเล็กตรอนในชั้น 3d จะไม่เกิดโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัล เนื่องจากแต่ละอะตอมในโครงสร้างผลึกจะถูกสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบนไอออนข้างเคียงเปลี่ยนรูปร่างของฟังก์ชันคลื่น ส่งผลให้ผลรวมของโมเมนต์เชิงมุมของออร์บิทัลมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัลเกิดขึ้น แต่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไม่มีผลกระทบต่อโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กของการหมุนในโลหะทรานซิชันจึงมีแต่โมเมนต์แม่เหล็กของการหมุนเท่านั้น แต่ในธาตุแรเอิร์ทจะมีโมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัลอิเล็กตรอนในชั้น 4f เนื่องจากในชั้นนี้จะมีอิเล็กตรอนในชั้น 5d และอิเล็กตรอนในชั้นอื่นๆเป็นตัวกันสนามไฟฟ้าจากอะตอมรอบๆ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัลไม่ถูกรบกวน จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทำให้สามารถแบ่งสารแม่เหล็กออกเป็น 5 ชนิดได้แก่ สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic) สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) และสารเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic)

2.3.1 สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) [13] เป็นสารที่อิเล็กตรอนภายในอะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบคู่เต็มออร์บิทัล (Closed Shell) จึงทำให้ไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ (Net Magnetic Moment) ดังนั้น ก๊าซเฉื่อยเช่น He Ne และ Ar จึงเป็นสารไดอะแมกเนติก ดังนั้น สารที่มีการจัดเรียงตัวแบบคู่เต็มออร์บิทัลจึงเป็นสารไดอะแมกเนติกทั้งหมด เช่น ก๊าซที่เกิดจากหลายอะตอม (Polyatomic) เช่น H_2 N_2 สารที่เกิดจากพันธะไอออนิก เช่น NaCl สารที่เกิดจากพันธะโควาเลนต์ เช่น เพชร เป็นต้น สมบัติของสารไดอะแมกเนติกของอะตอมเกิดจากผลกระทบของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในออร์บิทัล โดยพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบโปรตอนในออร์บิทัลที่มีรัศมี r มีความถี่เชิงมุม ω (Angular Frequency) โดยปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะมีโมเมนต์แม่เหล็ก (μ) ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในออร์บิทัล เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในขดลวดที่มีการกระแสไหล

$$\mu = \text{กระแส} \times \text{พื้นที่} \quad (2.5)$$

$$\mu = (-\omega e/2\pi) \times \pi r^2 \quad (2.6)$$

เมื่อให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก (H) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) ผ่านออร์บิทัล และจากกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางสวนกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดเมื่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนค่าไปจากศูนย์ สนามไฟฟ้ามีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัมเชิงมุม (Angular Momentum) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่เชิงมุมที่เรียกว่า ความถี่ลามอร์ (Larmor Frequency) มีค่า $eB/2m$ เมื่อ B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density) ที่กระทำกับสนามภายนอก m คือน้ำหนักของอิเล็กตรอน การเหนี่ยวนำทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัลมีทิศตรงข้ามกับในตอนที่เริ่มต้นที่ไม่มีสนามภายนอก ปรากฏการณ์นี้ทำให้ค่าอัตราการเป็นแม่เหล็ก (Susceptibility) ของสารไดอะแมกเนติกมีค่าเป็นลบเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic) [13] เป็นสารที่มีโมเมนต์แม่เหล็กมาจากการหมุน และโมเมนต์แม่เหล็กภายในออร์บิทัลไม่หักล้างกันพอดี อะตอมหนึ่งๆ จึงมีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิไม่เป็นศูนย์ ทำให้มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรเหมือนกับสารเฟอร์โรแมกเนติก ถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่อสารแม่เหล็กประเภทนี้โมเมนต์แม่เหล็กจะพยายามเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก แต่การเรียงตัวจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากมีพลังงานความร้อนที่ยังคงทำให้โมเมนต์แม่เหล็กมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Thermal Motion) แต่เนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้พยายามเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กภายนอก จึงทำให้มีค่า Susceptibility เป็นบวกเล็กน้อย ประมาณ 10^{-5} - 10^{-3} K (emu/cm³Oe) เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก โมเมนต์แม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวกลับคืนเป็นแบบสุ่มอีก สารประเภทนี้ได้แก่ โปตัสเซียม ออกซิเจน ทั้งสเดน เป็นต้น

2.3.3 สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) [14] แต่ละอะตอมของสารนี้มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กสูงมาก ส่วนใหญ่เกิดจากโมเมนต์การหมุนของอิเล็กตรอนที่ไม่มีการชดเชยแรงระหว่างอะตอมทำให้โมเมนต์เหล่านี้เรียงตัวขนานกันในบริเวณหนึ่งๆ ซึ่งมีอะตอมเป็นจำนวนมาก บริเวณเหล่านี้เรียกว่าโดเมน (Domain) ซึ่งมีรูปร่าง และขนาดต่าง ๆ กันตั้งแต่ขนาด 1 ไมครอนถึงหลายเซนติเมตร ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ชนิดของสาร และประวัติทางความร้อนของสาร สารเฟอร์โรแมกเนติกที่ไม่เคยผ่านสนามแม่เหล็กมาก่อนเลย จะมีโดเมนที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กแรงมาก แต่โดเมนเหล่านี้มีทิศทางที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์คือการหักล้างกันพอดี เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ โดเมนที่มีโมเมนต์ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีการขยายแผ่ไปในบริเวณใกล้เคียงโดยรอบ และสนามแม่เหล็กภายในจะมีค่าสูงชันมากกว่าสนามภายนอกมาก ๆ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกนำออกไป โดเมนบางส่วนจะกลับมาเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเหมือนเดิม แต่จะมีสนามคงค้าง (Residual Field) ในโครงสร้างมหภาพ การที่โมเมนต์แม่เหล็กของสารเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำแตกต่างไปจากเมื่อเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก หรือกล่าวได้ว่าสมบัติแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันกับลักษณะทางแม่เหล็กนี้ ซึ่งเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติทางแม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะลดลงจนถึงอุณหภูมิวิกฤต เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature; T_c) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กจะเป็นแบบสุ่ม สารเฟอร์โรแมกเนติกจะเปลี่ยนสภาพเป็นสารพาราแมกเนติก ตัวอย่างของสารแม่เหล็กประเภทนี้ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ โลหะผสมอัลนิโก (Alnico) เป็นต้น

2.3.4 สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) [15] สารชนิดนี้แรงกระทำระหว่างอะตอมที่อยู่ติดกันทำให้เกิดโมเมนต์ของอะตอมซึ่งเรียงตัวสวนทางกันทำให้โมเมนต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวางนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กสุทธิเป็นศูนย์ เรียกว่าเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกน้อยมาก สารนี้ไม่มีความสำคัญในทางวิศวกรรม เช่น MnO

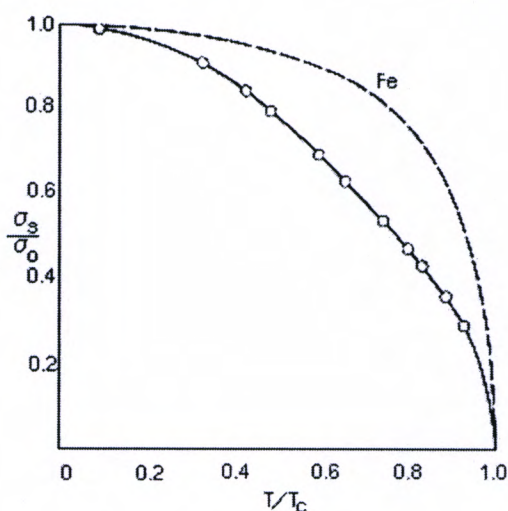
2.3.5 สารเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) [15] เฟอร์ริแมกเนติกเป็นสารที่สามารถเกิดการเหนี่ยวนำด้วยตัวเองได้ที่อุณหภูมิห้อง เหมือนเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) และแสดงปรากฏการณ์การอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Magnetic Saturation) และวงจรมแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis) การเหนี่ยวนำด้วยตัวเองจะไม่สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) และที่อุณหภูมินี้เฟอร์ริแมกเนติกจะเปลี่ยนสภาพเป็นสารพาราแมกเนติก เฟอร์ริแมกเนติกที่สำคัญส่วนใหญ่มีคู่ออกไซด์ของเหล็ก และโลหะอื่น ๆ จึงเรียกว่าเฟอร์ไรท์ เช่น นิกเกิลเฟอร์ไรท์ ($\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) เฟอร์ริแมกเนติกสามารถแบ่งตามโครงสร้างของผลึกได้ 2 แบบคือ ลูกบาศก์ (Cubic) และเฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ลูกบาศก์ สูตรทั่วไปคือ $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ โดย M ได้แก่ ไอออนของโลหะที่ประจุบวก 2 เช่น Mn Ni Fe Co Mg และอื่นๆ โคบอลท์เฟอร์ไรท์ (Cobalt Ferrite, $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) เป็น แมกเนติกคอลลิสฮาร์ด (Magnetically Hard) แต่คิวบิกเฟอร์ไรท์ (Cubic Ferrite) อื่นๆ เป็นแมกเนติกคอลลิสซอฟท์ (Magnetically Soft)

เฮกซะโกนอล เป็นรูปทรงที่สำคัญมากที่สุดในกลุ่มของแบเรียมเฟอร์ไรท์ (Barium Ferrite, $\text{BaO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$) เฟอร์ไรท์จะผลิตโดยใช้เทคนิคของเซรามิก เช่น ในการผลิตนิกเกิลเฟอร์ไรท์จะนำผงนิกเกิลออกไซด์ (NiO) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ผสมกันแล้วมาอัดให้เป็นรูปร่างตามต้องการ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิมากเกินพอที่ 1,200 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งเปราะ เฟอร์ริเป็นสารประกอบของไอออนต่าง ๆ สมบัติทางแม่เหล็กเกิดขึ้นได้จากไอออนแม่เหล็กที่มีอยู่ (O^{2-} ไม่มีโมเมนต์แม่เหล็ก) โดยใช้กฎของฮุนด์ (Hund's Rule) ในการศึกษาโมเมนต์แม่เหล็กของไอออนของอะตอม ซึ่งได้จากการศึกษาสเปกตรัมทางแสง (Optical Spectra) และการเรียงตัวของการหมุนของอิเล็กตรอน (Electron Spin) ที่สามารถทำนายผลของแรงแลกเปลี่ยน (Exchange Force) ในอะตอมเดียว หรือ ไอออนในออร์บิทัลชั้นนอกสุด ได้แก่ ชั้น 3d ซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้ถึง 5 อิเล็กตรอนที่หมุนขึ้น (Spin Up) และ 5 อิเล็กตรอนที่หมุนลง (Spin Down) โดยโมเมนต์แม่เหล็กของไอออนต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของนิกเกิลเฟอร์ไรท์ ($\text{NiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) มีไอออนนิกเกิล 1 ไอออนที่มีประจุสองบวกมีโมเมนต์แม่เหล็ก $2 \mu_B$ (Bohr Magnetron) และไอออนของเหล็ก 2 ไอออนที่มีประจุสามบวกที่มีโมเมนต์แม่เหล็กไอออนละ $5 \mu_B$ ถ้าแรงแลกเปลี่ยนเป็นบวกจะทำให้นิกเกิลและเหล็กมีการเรียงตัวขนานกันทั้งหมดเหมือนในเฟอร์โรแมกเนติก ผลรวมโมเมนต์แม่เหล็กต่อโมเลกุลจะเป็น $12 \mu_B$ แต่การวัดการทำให้เป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation Magnetization, σ_0) ที่ 0 องศาเคลวิน เป็น 56 emu/g หรือ $2.3 \mu_B$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อโมเลกุลเท่านั้น แสดงว่าโมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละไอออนไม่สามารถเรียงตัวขนานซึ่งกันและกันได้ จะเห็นได้ว่าเฟอร์ริแมกเนติกไม่เป็นเฟอร์โรแมกเนติก รูปที่ 2.10 แสดงค่าการทำให้เป็นแม่เหล็กแบบเศษส่วน (Fractional Magnetization, σ_s/σ_0) โดยเฟอร์ริแมกเนติกจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อถึงอุณหภูมิคูรี



รูปที่ 2.10 สมบัติทางแม่เหล็กของนิกเกิลเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [15]

ตารางที่ 2.1 โมเมนต์การหมุนในไอออนชนิดต่าง ๆ [15]

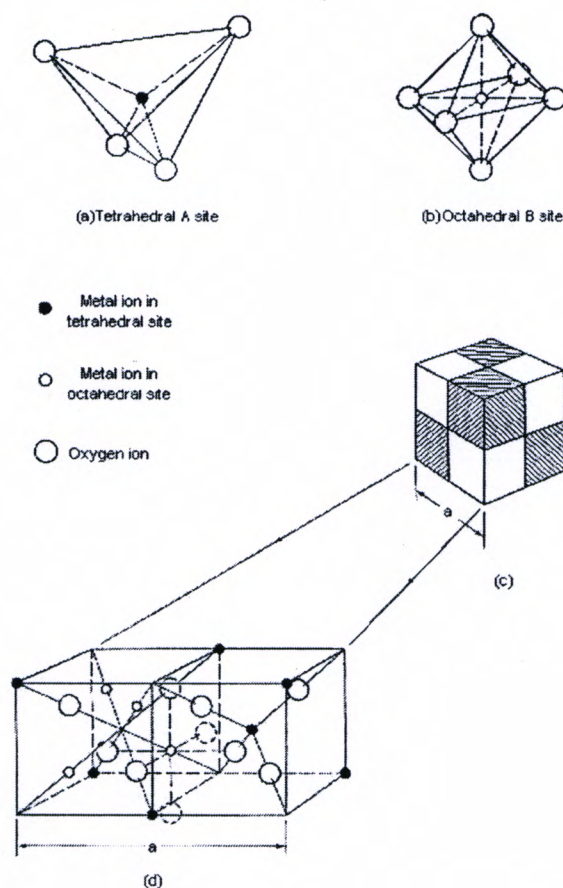
ไอออน									จำนวนอิเล็กตรอน ในชั้น 3d	โมเมนต์การหมุน (μ_B)
Sc ³⁺	Ti ⁴⁺								0	0
	Ti ³⁺	V ⁴⁺							1	1
	Ti ²⁺	V ³⁺	Cr ⁴⁺						2	2
		V ²⁺	Cr ³⁺	Mn ⁴⁺					3	3
			Cr ²⁺	Mn ³⁺	Fe ⁴⁺				4	4
				Mn ²⁺	Fe ³⁺	Co ⁴⁺			5	5
					Fe ²⁺	Co ³⁺	Ni ⁴⁺		6	4
						Co ²⁺	Ni ³⁺		7	3
							Ni ²⁺		8	2
								Cu ²⁺	9	1
								Cu ⁺ Zn ²⁺	10	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.1 โครงสร้างของคิวบิกเฟอร์ไรท์ (Structure of Cubic Ferrite) [15]

เฟอร์ไรท์มีโครงสร้างแบบสปินเนล (Spinel) ในบางครั้งจึงเรียกว่าเฟอร์ไรต์สปินเนล (Ferro-Spinel) คล้ายกับมินเนอรัลสปินเนล (Mineral Spinel; $MgO \cdot Ag_2O_3$) ออกซิเจนที่มีขนาดไอออนใหญ่ (13 Å) จะไปเรียงตัวเป็นเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face Center Cubic; FCC) และไอออนของโลหะ (M) ที่มีขนาดเล็ก (0.7-0.8 Å) จะเข้าไปอยู่ในที่ว่าง ทำให้มีโครงสร้าง 2 แบบคือ รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) หรือ A Site (รูปที่ 2.11a) และ รูปทรงแปดหน้า (Octahedral) หรือ B Site (รูปที่ 2.11b) ถ้าแบ่งหน่วยเซลล์ของ a ออกเป็นแปดส่วนโดยให้แต่ละส่วนเท่ากับ $a/2$ แสดงในรูปที่ 2.11c สี่ส่วนที่แรงา และที่ไม่แรงาจะบรรจุไอออนได้เท่ากัน ช่อง 2 ช่องทางด้านล่างซ้าย ในรูป c แสดงอยู่ในรูป d โดยที่ หนึ่งรูปทรงสี่หน้าจะเกิดที่ตรงกลางของช่องขวาของ d และรูปทรงสี่หน้าอื่น ๆ จะอยู่ที่มุมของช่อง และทรงแปดหน้า 4 รูปจะเกิดในช่องด้านซ้าย ที่กล่าวมาทั้งหมดไม่ได้เกิดจากการแทนที่ของไอออนของโลหะจริง แต่เฉพาะหนึ่งในแปดของ A Site และ หนึ่งในสองของ B Site ที่เข้าไปแทนที่ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ในมินเนอรัลสปินเนลไอออน Mg^{2+} อยู่ใน A Site และไอออน Al^{3+} อยู่ใน B Site เฟอร์ไรท์บางชนิด ($MO \cdot Fe_2O_3$) จะมีโครงสร้างลักษณะนี้อย่างสมบูรณ์ โดยมี M^{2+} ใน A Site และ Fe^{3+} ใน B Site เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่านอร์มอลสปินเนล เช่น ซิงค์เฟอร์ไรท์ และแคดเมียม-เฟอร์ไรท์ ส่วนเฟอร์ไรท์อื่นๆ จะมีโครงสร้างแบบอินเวอร์สสปินเนล (Inverse Spinel Structure) โดยมีไอออนที่มีประจุสองบวกเป็น B Site และไอออนที่มีประจุสามบวกเป็นทั้ง A และ B Site เช่น เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลเฟอร์ไรท์ การศึกษาโครงสร้างแบบนี้ นอร์มอล และอินเวอร์สสปินเนลของเฟอร์ไรท์จะใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) และการเลี้ยวเบนของนิวตรอน (Neutron Diffraction) การกระจายตัวของไอออนที่มีประจุสองบวกบน A และ B Site สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ความร้อน (Heat Treatment) ซึ่งจะขึ้นกับการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Quenching) หรือ ลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ (Annealing)



รูปที่ 2.11 โครงผลึกของควมิกเฟอร์ไรท์ [15]

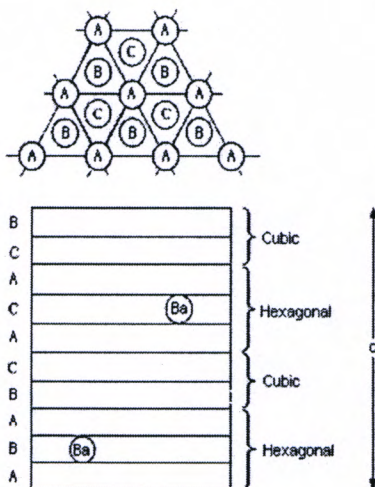
ตารางที่ 2.2 การเรียงตัวของไอออนโลหะในหน่วยเซลล์ของ Ferrite $MO \cdot Fe_2O_3$ [14]

ชนิดของ Site	Number Available	Number Occupied	Normal Spinel	Inverse Spinel
รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) (A)	64	8	$8 M^{2+}$	$8 Fe^{3+}$
รูปทรงแปดหน้า (Octahedral) (B)	32	16	$16 Fe^{3+}$	$8 Fe^{3+}$ $8 M^{2+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.2 เฮกซะโกนอลเฟอร์ไรท์ [15]

เฮกซะโกนอลเฟอร์ริแมกเนติกออกไซด์ มีอยู่เป็นจำนวนมากแต่ในทางการค้ามี 2 ชนิดที่สำคัญ คือ แบเรียมเฟอร์ไรท์ ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) และสตรอนเตียมเฟอร์ไรท์ ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างที่เหมือนกัน แบเรียมเฟอร์ไรท์มีโครงสร้างผลึกเหมือนกับแมกนีโตพลัมไบท์ (Magnetoplumbite) ซึ่งมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยประมาณคือ $\text{PbFe}_{7.5}\text{Mn}_{3.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_{19}$ (ไอออนของ Fe ในแบเรียมเฟอร์ไรท์จะเหมือนกับในองค์ประกอบของ Pb Fe Mn Al และ Ti ในแมกนีโตพลัมไบท์ หน่วยเซลล์ของเฮกซะโกนอล (Hexagonal Unit Cell) มีแบเรียมเฟอร์ไรท์ 2 โมเลกุล หรืออะตอมรวมเท่ากับ 64 อะตอม โดยแบเรียมไอออน และออกซิเจนไอออนจะมีขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกันเป็นสารอนแมกเนติกมีการจัดเรียงตัวแบบชิดกันมากที่สุด (Close – Packed Fashion) ไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) ที่เล็กกว่าจะอยู่ในช่องว่าง ทำให้มีความสัมพันธ์ระหว่างการจัดเรียงตัวแบบชิดกันมากที่สุด และเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก โครงสร้างทั้ง 2 ชนิดเกิดจากการวางเรียงเป็นชั้น ๆ (Stacking) ของอะตอมจากชั้นที่มีอะตอมเหมือนกันไปยังด้านบนของอีกอะตอม ในแต่ละชั้น อะตอมจะอยู่ที่มุมของโครงข่ายของสามเหลี่ยมด้านเท่าซึ่งแสดงตรงส่วนด้านบนของรูปที่ 2.12 ถ้าชั้นมีการจัดวางเป็นลำดับ ABABAB... ชั้นที่ 3 จะอยู่เหนือชั้นที่ 1 เป็นผลมาจากโครงสร้างของ Hexagonal Close Packed ถ้าลำดับการเรียงเป็น ABCABC... ลำดับจะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งถึงชั้นที่ 4 เป็นผลมาจากเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก คิวบิกเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างแบบ สปินเนลเกิดจากชั้นของไอออนออกซิเจนที่จัดวางเรียงในลำดับ ABCABC โดยมีไอออน M^{2+} และ Fe^{3+} อยู่ในช่องว่าง โมเมนต์แม่เหล็กของไอออนแม่เหล็ก (Magnetic Ions) จะตั้งฉากกับระนาบของชั้นของออกซิเจนในทิศของระนาบ $\langle 111 \rangle$

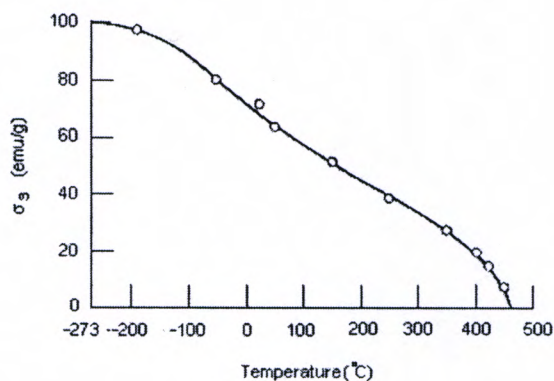


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรท์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยเซลล์ของแบเรียมเฟอร์ไรท์แสดงในรูปที่ 2.12 มีไอออนขนาดใหญ่ (Ba^{2+} , O^{2-}) 10 ชั้นโดยในแต่ละชั้นมี 4 ไอออน มีไอออนออกซิเจน 8 ชั้น และอีก 2 ชั้นเป็นแบเรียม ทั้ง 10 ชั้นแบ่งได้เป็น 4 บล็อก โดยมีคิวบิก 2 บล็อก และเฮกซะโกนอล 2 บล็อก ในคิวบิกการเรียงตัวของออกซิเจนเป็นรูปทรงสี่หน้า และรูปทรงแปดหน้าเหมือนกับในคิวบิกสปินเนล โดยในแต่ละบล็อกของเฮกซะโกนอลไอออนแบเรียมจะแทนที่ไอออนออกซิเจนในชั้นกลางของทั้ง 3 ส่วนของ คิวบิก และเฮกซะโกนอลจะซ้อนทับกัน ดังนั้น 4 ชั้นที่มีแบเรียมที่มีการเรียงเป็นคิวบิก และ 5 ชั้นที่มีไอออนแบเรียมอยู่ตรงกลางมีการเรียงแบบเฮกซะโกนอล (รูปที่ 2.12)

แบเรียมเฟอร์ไรท์มีเฉพาะ Fe^{3+} เป็นไอออนแม่เหล็กเท่านั้น โดยแต่ละไอออนมีโมเมนต์แม่เหล็กเท่ากับ $5 \mu_B$ มีโครงสร้างถึง 3 แบบใน Site ที่ต่าง ๆ กันคือ รูปทรงสี่หน้า รูปทรงแปดหน้า และ เฮกซะอีตรอล (เป็น Site ที่ล้อมรอบไปด้วยออกซิเจนถึง 5 อะตอม โดยมีการจัดวางตัวที่มุมของพีรามิดคู่ (Bipyramid) ทั้งหมดของ Site เกิดในชั้นที่มีแบเรียมบรรจุอยู่) ส่วน Fe^{3+} จะมีโมเมนต์แม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบของชั้นออกซิเจน ด้วยเหตุนี้จะขนาน หรือ สอนทางกับแกน $+c$ ของ Hexagonal Cell มีทิศทาง $<0001>$ ไอออน $Fe^{3+} 24$ ไอออนต่อ 1 เซลล์ มี 4 ไอออนเป็นรูปทรงสี่หน้า 18 ไอออนเป็น รูปทรงแปดหน้า และ 2 ไอออนเป็น Hexahedral Site โดยเริ่มจากรูทิศทางมุมของ Fe^{3+} ไอออนในส่วนของลูกบาศก์ของเซลล์ โดยประยุกต์ใช้พื้นฐานของแรงแลกเปลี่ยนพิเศษ (Super Exchange Force) ซึ่งสามารถกระทำจากไอออนต่อไอออนทะลุผ่านเซลล์ และทำนายทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก เช่น ระนาบ $[0001]$ หรือ ระนาบ $[000\bar{1}]$ วิธีนี้ใช้ทำนายปริมาณต่อเซลล์ของ 16 ไอออนที่หมุนใน 1 ทิศทาง และ 8 ไอออนที่หมุนในทิศทางอื่น ๆ การทำนายโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment) ต่อเซลล์ประมาณ $(16 - 8) 5 = 40 \mu_B$ ต่อเซลล์ และ $20 \mu_B$ ต่อโมเลกุลของ $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ปริมาณที่เหมือนกันถึง 100 emu/g และตรงกับปริมาณการวิเคราะห์ของการทำให้เป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ค่าต่าง ๆ ของ σ_s ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.13 ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าจะลดลงถึง 72 emu/g ($M_s = 380 \text{ emu/cm}^3$) และอุณหภูมิคูรี คือ 450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.13 อุณหภูมิต่าง ๆ ของความอิ่มตัวในการทำให้เป็นแม่เหล็กของแบเรียมเฟอร์ไรท์ [15]

ออกไซด์ของเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic Oxide) อื่น ๆ ที่มีโครงสร้างเป็น Hexagonal ประกอบด้วย $BaO \cdot 2MO \cdot 8Fe_2O_3$, $2(BaO \cdot MO \cdot 3Fe_2O_3)$ และ $3BaO \cdot 2MO \cdot 12Fe_2O_3$ เมื่อ M เป็นไอออนที่มีประจุสองบวก

2.3.6 การทำให้สารเฟอร์ริเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation Magnetization)

[15]

ในการคำนวณหาค่าการทำให้สารเฟอร์ริเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวที่ 0 องศาเคลวิน จะต้องทราบค่าต่อไปนี้คือ

1. โมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละไอออน

2. การกระจายตัวของไอออนระหว่าง A และ B Site

3. อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน (Exchange Interaction) ระหว่าง A และ B Site เป็นลบ เช่น อันตรกิริยา AA AB และ BB ที่มักจะเป็นลบ แต่จะไม่เป็นลบในเวลาเดียวกัน ส่วนใหญ่อันตรกิริยา AB จะมีความแรงมากที่สุดทำให้โมเมนต์ A ขนานกัน และสวนทางกับโมเมนต์ของ B ทิศทางของโมเมนต์เหล่านี้จะอยู่ในรูปแบบของ $\langle 111 \rangle$ คือขนานกับเส้นทแยงมุม (Body Diagonal) ของหน่วยเซลล์ ยกเว้นโคบอลต์เฟอร์ไรท์

ในตารางที่ 2.3 แสดงการคำนวณนิเกิลเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอินเวอร์ส โดยมี Ni^{2+} ทั้งหมดเป็น B Site และ Fe^{3+} เป็น A และ B Site ในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นจึงไม่มีโมเมนต์ ของ Fe^{3+} และโมเมนต์สุทธิของ Ni^{2+} ไอออนคือ $2 \mu_B$ จึงง่ายในการพิจารณาความอิ่มตัวในการทำให้เป็นแม่เหล็กของทุก ๆ อินเวอร์สเฟอร์ไรท์ จากโมเมนต์ของไอออนที่มีประจุบวกสองจะนำไปสู่การคำนวณปริมาณ ใน μ_B ต่อโมเลกุล สำหรับอนุกรมของเฟอร์ไรท์จาก แมงกานีสถึงซิงค์ (Mn-Zn) ดังตารางที่ 2.4 แมงกานีสเฟอร์ไรท์ (Mn Ferrite) มีรูปร่างที่ไม่เป็นอินเวอร์ส แต่การคำนวณโมเมนต์สุทธิ ยังคงมีค่า $5 \mu_B$ ต่อโมเลกุล ความจริงแล้ว Mn^{2+} และ Fe^{3+} ต่างมีโมเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น $5 \mu_B$ แต่การกระจายตัวของ A และ B Site ทำให้โมเมนต์สุทธิเป็น $5 \mu_B$ ไอออน และการกระจายตัวของ การหมุนของซิงค์เฟอร์ไรท์ แสดงในตัวอย่างที่ 2 ในตารางที่ 2.3 เฟอร์ไรท์มีโครงสร้างแบบนอร์มอล และ Zn^{2+} มีโมเมนต์ใน A Site เป็น 0 จึงไม่มีอันตรกิริยา AB ทำให้ต้องพิจารณาถึงอันตรกิริยา BB ที่เป็นลบด้วย Fe^{3+} ใน B Site มีแนวโน้มที่จะเป็นโมเมนต์ที่สวนทางกัน (Anti-Parallel Moment) และจะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิดังนั้นคาดว่าซิงค์เฟอร์ไรท์จะเป็นแอนติ-เฟอร์โรแมกเนติกเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 9 องศาเซลเซียสเท่านั้น โดยความเป็นพาราแมกเนติกจะลดลงถึงอุณหภูมินี้ เพราะอันตรกิริยา BB ที่เป็นลบมีค่าน้อย แม้ว่าจะให้พลังงานความร้อนเพียงเล็กน้อย ก็ไม่สามารถทำให้รักษาทิศทางของโมเมนต์ให้สวนทางกันได้ รูปที่ 2.14 เป็นการเปรียบเทียบกราฟของโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณเฟอร์ไรท์ชนิดต่างๆ

ค่าที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจาก

1. โมเมนต์แม่เหล็กของออร์บิทัล อาจจะไม่เป็นไปตามทฤษฎี นอกเหนือจากโมเมนต์แม่เหล็กการหมุน (คิดเฉพาะ Co^{2+} Ions)
2. โครงสร้างอาจไม่เป็นแบบย้อนกลับ (Inverse) อย่างสมบูรณ์ และปริมาณการย้อนกลับ (Inversion) จะเปลี่ยนแปลงโดยการปรับปรุงด้วยความร้อน (Heat Treatment) โดยการทำให้เป็นแม่เหล็กอ้อมตัวซึ่งขึ้นกับสมบัติของโครงสร้าง

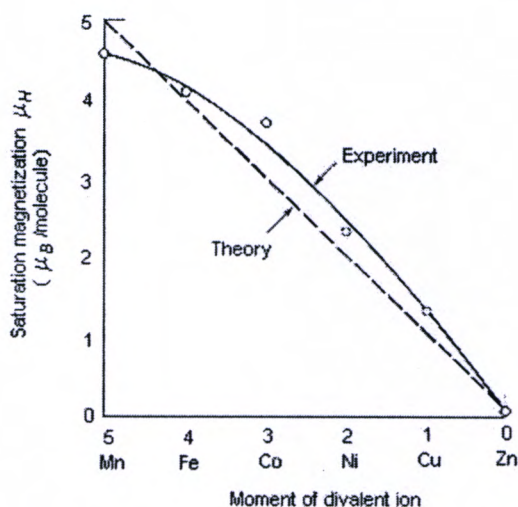
ตารางที่ 2.3 การกระจายไอออน และผลลัพธ์ของโมเมนต์ต่อโมเลกุลของเฟอร์ไรท์บางชนิด [15]

ตัวอย่าง	สาร	โครงสร้าง	รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) A Sites	รูปทรงแปดหน้า (Octahedral) B Sites	ผลลัพธ์ของโมเมนต์ (μ_B /Molecule)
1	$NiO \cdot Fe_2O_3$	Inverse	Fe^{3+} 5 →	Ni^{2+} , Fe^{3+} ← 2 ← 5	2
2	$ZnO \cdot Fe_2O_3$	Normal	Zn^{2+} 0	Fe^{3+} , Fe^{3+} ← 5 5 →	0
3	$0.9NiO \cdot Fe_2O_3$	Inverse	Fe^{3+} 4.5 →	Ni^{2+} , Fe^{3+} ← 1.8 ← 4.5	2.8
	$0.1ZnO \cdot Fe_2O_3$	Normal	Zn^{2+} 0	Fe^{3+} , Fe^{3+} ← 0.5 ← 0.5	
			4.5 →	← 7.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กจากการคำนวณ และการวัด [15]

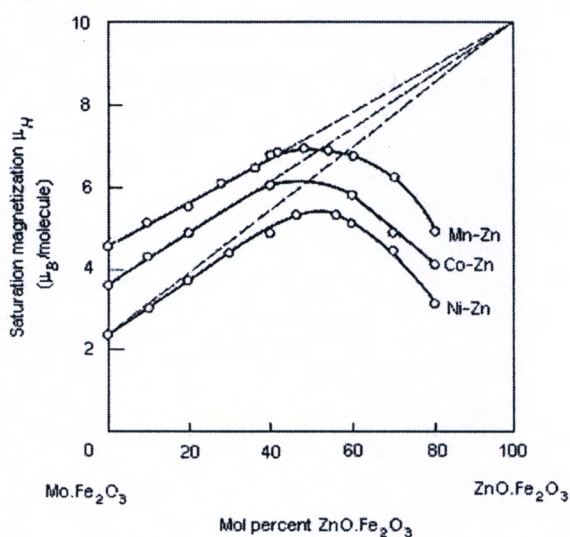
เฟอร์ไรท์ (Ferrite)	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
โมเมนต์แม่เหล็กจากการคำนวณ (μ_H)	5	4	3	2	1	0
โมเมนต์แม่เหล็กจากการวัด (μ_H)	4.6	4.1	3.7	2.3	1.3	0



รูปที่ 2.14 การทำให้เป็นแม่เหล็กอ้อมตัวที่ 0 องศาเคลวิน [15]

เฟอร์ไรท์ผสม (Mixed Ferrite) ที่ประกอบด้วย Zn^{2+} ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Non-Magnetic) แต่ทำให้ค่าการทำให้เป็นแม่เหล็กอ้อมตัวเพิ่มขึ้น เช่นในตัวอย่างที่ 3 จากตารางที่ 2.3 ผลลัพธ์ของโมเมนต์แม่เหล็กของเฟอร์ไรท์ผสมที่มี 10 โมเลกุลเปอร์เซ็นต์ซึ่งคเฟอร์ไรท์อยู่ในนิกเกิลเฟอร์ไรท์โดยที่ Zn^{2+} มีโมเมนต์เท่ากับ 0 เมื่ออยู่ใน A Site ของซึ่งคเฟอร์ไรท์บริสุทธิ์ โมเมนต์ของ Fe^{3+} ใน A Site จากนิกเกิลเฟอร์ไรท์ทำให้โมเมนต์ใน B Site ขนานกัน เพราะว่ามันตรึง AB ที่แรง โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิควรจะเพิ่มขึ้นจาก $2.0 \mu_B$ ในนิกเกิลเฟอร์ไรท์บริสุทธิ์ ไปเป็น $2.8 \mu_B$ สำหรับในของผสม ถ้าเพิ่มขึ้น $0.8 \mu_B$ ต่อ 10 โมเลกุลของเปอร์เซ็นต์ซึ่งคเฟอร์ไรท์ คาดว่าซึ่งคเฟอร์ไรท์บริสุทธิ์ จะมีโมเมนต์ $10 \mu_B$ แต่ไม่เป็นเช่นนั้นเพราะ A โมเมนต์ จะมีค่าอ่อนต่อ B โมเมนต์ รูปที่ 2.14 เป็นข้อมูลของเส้นกราฟของเฟอร์ไรท์ผสมจากการทดลองซึ่งจะแยกออกจากเส้นตรง (ทฤษฎี) ผลลัพธ์ของโมเมนต์ต้องลดลงอย่างช้า ๆ อย่างไม่รู้ก็ตามเส้นกราฟจากการทดลอง ในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียงกับในทฤษฎีมาก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ผลกระทบของความอึดตัวของกาทำให้เป็นแม่เหล็กที่ 0 องศาเคลวินเมื่อเติมซิงค์เฟอร์ไรท์

[15]

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลของเฟอร์ไรท์ชนิดต่าง ๆ [15]

สาร	Lattice Parameter a(Å)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	0 องศาเคลวิน		20 องศาเซลเซียส		T _c (°C)
			σ ₀ (emu/g)	M ₀ (emu/cm ³)	σ _s (emu/g)	M _s (emu/cm ³)	
MnO.Fe ₂ O ₃	8.50	5.00	112	560	80	400	300
FeO.Fe ₂ O ₃	8.39	5.24	98	510	92	480	585
NiO.Fe ₂ O ₃	8.34	5.38	56	300	50	270	585
BaO.6 Fe ₂ O ₃	a = 5.88 c = 23.2	5.28	100	530	72	380	450
Fe	2.87	7.87	222	1747	218	1714	770

2.3.7 สารแม่เหล็กชนิดอื่นๆ

แม่เหล็กแรเอิร์ธ (Rare Earth Magnetic)

แม่เหล็กแรเอิร์ธเป็นวัสดุแม่เหล็กสมัยใหม่ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กสูง โดยมีค่าพลังงานสูงสุดในการผลิต (Maximum Energy Product; BH_{max}) มากกว่า 14.0 MGOe มีค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (Intrinsic Coercivity; H_{ci}) ประมาณ 14.0 kOe สูตรทั่วไปคือ RE_{1-x}(TM_{1-y}B_y)_x โดย RE คือธาตุแรเอิร์ธที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำๆ เช่น Nd หรือ Pr และ TM คือโลหะทรานซิชัน เช่น Fe Cr หรือ Mn ส่วน B คือ โบรอน แม่เหล็กแรเอิร์ธที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมจะมีสมบัติทางแม่เหล็กสูงมาก เช่น นีโอไดเมียมไอออนโบรอน (Nd₂Fe₁₄B) ซึ่งแบ่งการผลิตได้ 2 วิธีคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วิธีความหนาแน่นเต็ม (Fully Dense) โดยการนำส่วนผสมต่าง ๆ เช่น Fe Nd Cr และ FeB บดให้เป็นผง นำไปอัดขึ้นรูปภายใต้สนามแม่เหล็ก แล้วนำไปอบที่ 1,400 องศาเซลเซียส จะได้แม่เหล็กนีโอติเมียมไอออนโบรอนที่มีค่าพลังงานสูงสุดในการผลิตสูงมาก แต่แม่เหล็กจะเปราะทำให้มีข้อจำกัดในการผลิตเป็นรูปร่างต่างๆ

2. วิธีแม่เหล็กพันธะ (Bonded Magnet) โดยการนำส่วนผสมต่างๆ ไปหลอมแล้วเทน้ำโลหะลงบนลูกกลิ้งหล่อเย็นเพื่อทำให้น้ำโลหะแข็งตัว นำแม่เหล็กที่ได้ไปบดให้เป็นผง แล้วเคลือบผงแม่เหล็กด้วยอีพอกซีเรซินแล้วอัดขึ้นรูป จากนั้นนำแม่เหล็กที่ได้ไปบ่มเพื่อให้อีพอกซีเรซินแข็งตัวยึดผงแม่เหล็กไว้ แม่เหล็กประเภทนี้จะมีค่าพลังงานสูงสุดในการผลิตต่ำกว่าแม่เหล็กประเภทแรก แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีจึงสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ได้

แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4) [14]

มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4)



แมกนีไทต์จะไม่เสถียรโดยจะเปลี่ยนเป็นฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) เมื่อมีอุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส ฮีมาไทต์มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) มีสมบัติเป็นสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โมเมนต์แม่เหล็กของแมกนีไทต์เกิดจากอะตอมของเหล็ก การกระจายตัวใน A และ B Site ในหน่วยเซลล์ของฮีมาไทต์ทำให้มีสมบัติเป็นสารเฟอร์ริแมกเนติก ซึ่งจะได้ว่า

$$\text{A Site} = 8 \times 3 = 24 \mu_B \quad (2.8)$$

$$\text{B Site} = (16 \times 3) - 8 = 40 \mu_B \quad (2.9)$$

ในแต่ละไอออนจะมีโมเมนต์แม่เหล็ก $5 \mu_B$ ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิคือ $(40 - 24)(5) = 80 \mu_B$ ต่อหน่วยเซลล์ หรือ $2.5 \mu_B$ ต่อโมเลกุลของฮีมาไทต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ($2.39 \mu_B$ ต่อโมเลกุล หรือ 83.5 emu/g ที่ 20 องศาเซลเซียส และค่าการทำให้เป็นแม่เหล็กอิ่มตัว 76.0 emu/g)

2.3.8 การวัดสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ [14]

สมบัติของแม่เหล็กที่สำคัญอธิบายได้ด้วยลักษณะของวงจรมแม่เหล็ก (Hysteresis-Loop) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก ด้วยค่าการเหนี่ยวนำ (Induction หรือ Flux Density; B) เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก H (Magnetizing Field) ที่มีทั้งการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization) และการลบล้างสภาพแม่เหล็ก (Demagnetization) สมบัติที่สำคัญซึ่งได้จากวงจรมแม่เหล็ก ได้แก่ สนามแม่เหล็กตกค้าง (Remanence หรือ Residual Flux Density; B_r) แรงลบล้างแม่เหล็ก (Coercive Force; H_c) แรงลบล้างแม่เหล็กภายใน (Intrinsic Coercive Force; H_{ci}) และพลังงานสูงสุด (Maximum Energy Product; BH_{max}) เป็นต้น วิธีการศึกษาเกี่ยวกับการทำให้เป็นแม่เหล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ในสนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.16 แสดงวิธีวิเคราะห์โดยพันขดลวดอย่างที่เป็นรูปวงแหวนด้วยขดลวดที่มีฉนวน เชื่อมต่อกับสวิตช์ แอมมิเตอร์ และแบตเตอรี่ เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) หรือเรียกว่า ขดลวดการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizing Winding) โดยขดลวดจะให้สนามแม่เหล็กแบบปิดดังสมการ 2.10

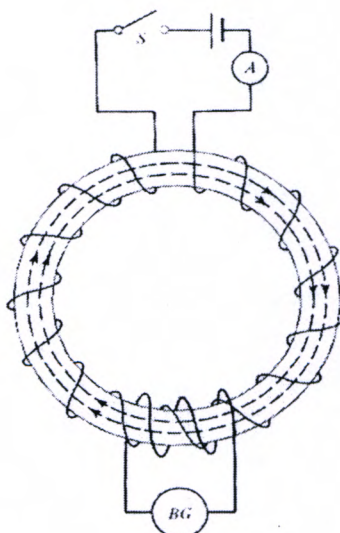
$$H = 4\pi ni/10L = 1.257ni/L \text{ (Oe)} \quad (2.10)$$

เมื่อ H คือ สนามแม่เหล็กจากภายนอก (Oe)

n คือ จำนวนขดลวด

i คือ กระแสไฟฟ้า (A)

L คือ ความหนาของขดลวด (m)



รูปที่ 2.16 วงจรสำหรับการทำให้เป็นแม่เหล็กตัวอย่างวงแหวน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเรียงตัวของอนุภาคภายในขดลวดทำให้เกิดการทำให้เป็นแม่เหล็กที่ปราศจากขั้วขดลวดอื่น ๆ เรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (Second Winding) หรือ ขดลวดค้นหา (Search Coil) ซึ่งมีเพียงขั้วขดลวดในวงแหวน และจะเชื่อมต่อกับบอลลิสติกกัลวานอมิเตอร์ (Ballistic Galvanometer; BG) สมมุติว่าวงแหวนไม่มีส่วนที่เป็นสูญญากาศเลย เมื่อสวิตช์ (S) ปิด กระแสจะไหลภายในขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (H; Oersted's หรือ H; maxwells/cm²) ภายในวงแหวน ถ้าพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนเป็น A (cm²) แล้วจำนวนเส้นแรงแบบภายในวงแหวนเท่ากับ $HA = \phi$ (Maxwell) ซึ่งเรียกว่า ฟลักซ์ (Flux) การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ ($\Delta\phi$) ภายในขดลวดค้นหาจากศูนย์ถึงฟลักซ์ (0- ϕ) ทำให้เพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดค้นหาซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ถ้าภายในวงแหวนมีสารอยู่ทำให้เพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กให้กับสนาม H ความสัมพันธ์ของค่า ϕ (ที่วัดได้) และ ϕ (กระแส) ทำให้สามารถจัดประเภทสารทั้งหมดได้ตามพฤติกรรมทางแม่เหล็กคือ

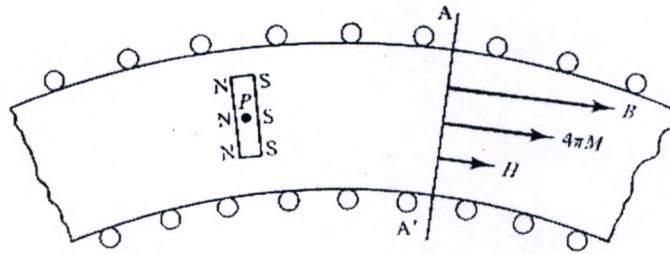
ϕ (ที่วัดได้) < ϕ (กระแส) จัดเป็นสารไดอะแมกเนติก (เช่น Cu, He)

ϕ (ที่วัดได้) > ϕ (กระแส) จัดเป็นสารพาราแมกเนติก (เช่น Na, Al) หรือ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (เช่น MnO, FeO)

ϕ (ที่วัดได้) \gg ϕ (กระแส) จัดเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (เช่น Fe, Co, Ni) หรือ เฟอร์ริแมกเนติก (เช่น Fe₃O₄)

มีสารบริสุทธิ์บางส่วนเท่านั้นที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยที่สารไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก และแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เป็นสารที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (Non-Magnetic) สารพาราแมกเนติกจะมีค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้มากกว่าสนามที่ได้จากกระแสประมาณ 0.02% ของวิธีการดังกล่าวซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องเมื่อมีความแตกต่างของค่าฟลักซ์เล็กน้อยในสารเฟอร์โรแมกเนติกและเฟอร์ริแมกเนติกเป็นสารที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก โดยค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสพันเท่าถึงล้านเท่า

วัสดุวงแหวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กได้ ถ้าพิจารณาถึงสนามที่เกิดขึ้นภายในวงแหวนโดยจินตนาการว่าได้ตัดเชิวงแหวนดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาคตัดขวางของวงแหวนโรว์แลนด์ (Rowland Ring)[15]

เมื่อ H (เส้นแรงต่อพื้นที่) ที่ตัดผ่านช่องว่างนี้เกิดจากสนามของกระแสในขดลวดแม่เหล็กตามสมการที่ 2.6 สนามแม่เหล็กภายนอกกระทำจากทางซ้ายไปถึงทางขวาเกิดการทำให้เป็นแม่เหล็กและเกิดขั้วเหนือและขั้วใต้อยู่บนผิวของช่องว่าง (Cavity) ดังนั้นขั้วแม่เหล็กจะเกิดตรงบริเวณปลายของแท่งแม่เหล็ก ถ้าเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกขั้วเหนือจะเกิดทางด้านซ้ายมือ และขั้วใต้จะเกิดทางด้านขวามือ ถ้าความเข้มของการทำให้เป็นแม่เหล็กคือ M ดังนั้นในแต่ละตารางเซนติเมตรของพื้นผิวของช่องว่างจะมีความแรงของขั้ว M และเกิดเส้นแรง $4\pi M$ ออกจากเนื้อสาร หรือเรียกว่าเส้นแรงของการทำให้เป็นแม่เหล็ก เส้นแรงนี้จะรวมกับเส้นแรงของสนามแม่เหล็กภายนอก เรียกว่าเส้นแรงของการเหนี่ยวนำ (Line of Induction) จำนวนเส้นแรงการเหนี่ยวนำต่อตารางเซนติเมตร เรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Induction) ดังนั้นจึงเขียนสมการได้ดังนี้

$$B = H + 4\pi M \quad (2.11)$$

เมื่อ H คือ สนามแม่เหล็กจากภายนอก (Oe)

B คือ ค่าการเหนี่ยวนำ (Induction หรือ Flux Density; G)

M คือ ค่าการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization; emu/cm³)

เส้นแรง B เป็นเส้นแรงต่อเนื่องได้จากสารที่อยู่ภายนอกช่องว่างของวงแหวนด้วย ค่า B H และ M เป็นเวกเตอร์ที่มีทิศขนานกันตลอด จึงสามารถคิดคำนวณในปริมาณสเกลลาร์ได้ โดยจะแสดงตามรูปที่ 2.17 โดยประมาณค่า B เป็น 3 เท่าของ H ได้ ดังนั้น B H และ M จะต้องมีหน่วยที่เหมือนกัน (เส้นแรง หรือแมกเวลต่อตารางเซนติเมตร) ในทางการคำนวณของ B เรียกว่าเกาส์ (Gauss; G) H มีหน่วยเป็นเออร์สเต็ด (Oe) และ M มีหน่วยเป็น emu/cm³ แต่บางครั้งอาจพบว่า H และ M มีหน่วยเป็นเกาส์ อัตราส่วนของ M ต่อ H นั้น เรียกว่า อัตราการเป็นแม่เหล็ก (Susceptibility, K) หน่วยเป็น emu/cm³ M คือโมเมนต์แม่เหล็กต่อปริมาตร K มีหน่วยเป็น

ปริมาตร บางทีจะเรียกว่า อัตราการเป็นแม่เหล็กโดยปริมาตร (Volume Susceptibility) การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของสารแม่เหล็กสามารถกำหนดค่าอัตราความเป็นแม่เหล็กแบบอื่น ๆ ได้ดังนี้

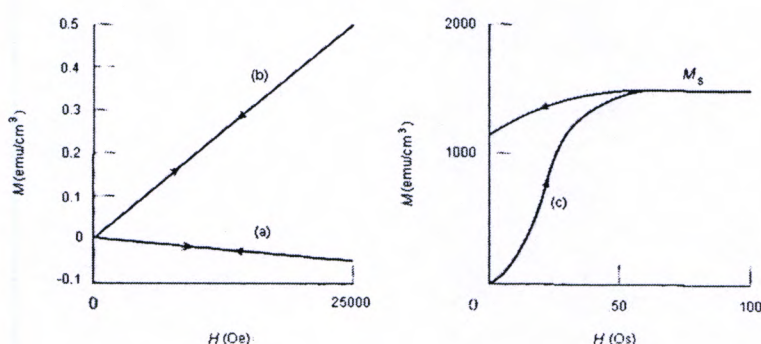
$$\chi = \kappa/\rho \text{ อัตราความเป็นแม่เหล็กโดยมวล (Mass Susceptibility; emu/g Oe)}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น

$\chi_A = \chi A$ อัตราความเป็นแม่เหล็กโดยอะตอม (Atom Susceptibility; emu/g Atom Oe) เมื่อ A คือ เลขอะตอม

$\chi_M = \chi M'$ อัตราความเป็นแม่เหล็กโดยโมเลกุล (Molecule Susceptibility; emu/g Mole Oe) เมื่อ M' คือ น้ำหนักโมเลกุล

เส้นกราฟระหว่าง M และ H เรียกว่ากราฟการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization Curve) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟการทำให้เป็นแม่เหล็กของ (a) ไดอะแมกเนติก (b) พารา และแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (c) เฟอร์โร และเฟอร์ริแมกเนติก [15]

เส้น a และ b แสดงถึงสารที่มีอัตราความเป็นแม่เหล็กโดยปริมาตรเท่ากับ -2×10^{-6} (emu/cm³) และ $+20 \times 10^{-6}$ (emu/cm³) ตามลำดับ สารเหล่านี้ (ไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก และ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก) จะมีเส้นกราฟ MH เป็นเส้นตรง เส้นกราฟ c จะเป็นสารเฟอร์โร และ เฟอร์ริแมกเนติก จะมีเส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรงโดยค่าความเป็นแม่เหล็กโดยปริมาตรจะขึ้นกับ H จากเส้นกราฟ c มีค่ามากที่สุดประมาณ 40 ซึ่งจะเห็นว่ามีปรากฏการณ์ 2 อย่างที่เกิดขึ้นคือ

1. การอิ่มตัว (Saturation) ค่า H มีค่ามาก ๆ แล้ว M มีค่าคงที่ ที่ M_s
2. ฮิสเทอเรซิส (Hysteresis หรือ Irreversibility) หลังจากอิ่มตัวแล้วลดสนาม H จนเป็น 0 ค่า M จะไม่ลดลงเป็น 0 ซึ่งเป็นสมบัติของสารเฟอร์โร และเฟอร์ริแมกเนติกที่เหมาะสมในการทำเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง M กับ H สามารถใช้หาชนิดของสารได้ในอีกมุมหนึ่งสารเฟอร์โร และเฟอร์ริแมกเนติกมีความสัมพันธ์ของค่า B (จำนวนความหนาแน่นเส้นแรงทั้งหมด) กับ H หรือเรียกว่า BH curve โดยอัตราส่วนของ B ต่อ H เรียกว่า ความสามารถในการแผ่สนามของอำนาจแม่เหล็ก (Permeability; μ) ดังสมการที่ (2.12) ถึง (2.13)

$$\mu = B/H \quad (2.12)$$

แต่ $B = H + 4\pi M$ ดังนั้น

$$B/H = 1 + 4\pi(M/H) \quad (2.13)$$

$$\mu = 1 + 4\pi K \quad (2.14)$$

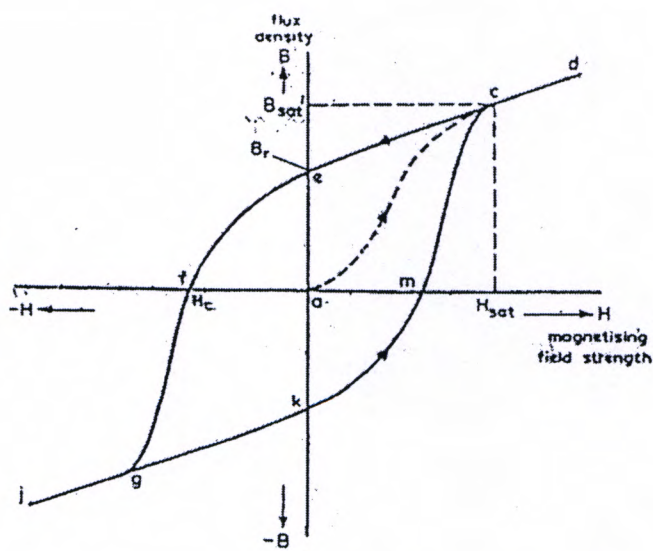
จึงสามารถแยกพฤติกรรมของสารชนิดต่าง ๆ ได้จากค่า K และ μ ดังนี้

1. สุญญากาศ $K = 0$, $\mu = 1$
2. ไดอะแมกเนติก K มีค่าเป็นลบที่น้อยมากและ μ มีค่าน้อยกว่า 1 เล็กน้อย
3. พารา และแอนติเฟอร์โรแมกเนติก K มีค่าเป็นบวกที่น้อยมากและ μ มีค่ามากกว่า 1 เล็กน้อย
4. เฟอร์โร และเฟอร์ริแมกเนติก ทั้ง K และ μ มีค่าเป็นบวกมาก ๆ และเป็นฟังก์ชันกับ H

ค่าความสามารถในการแผ่สนามของอำนาจแม่เหล็กของอากาศเท่ากับ 1.00000037 มีความแตกต่างกับความสามารถในการแผ่สนามของอำนาจแม่เหล็กของสุญญากาศ (1.0) น้อยมากทำให้ในการวัดความสามารถในการแผ่สนามของอำนาจแม่เหล็กของสารเฟอร์โร และเฟอร์โรแมกเนติกที่มีค่ามาก ๆ (มากกว่าอากาศ 1,000–1,000,000 เท่า) ค่าความผิดพลาดในการวัดความสามารถในการแผ่สนามของอำนาจแม่เหล็กของสารเฟอร์โร และเฟอร์ริแมกเนติกในอากาศจึงมีค่าน้อยมาก ๆ

2.3.9 กราฟการทำให้เป็นแม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็ก (Magnetization Curve and Hysteresis Loop) [16]

สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของแม่เหล็ก ซึ่งจะบอกถึงคุณภาพของแม่เหล็กนั้น ๆ ได้คือ วงจรแม่เหล็ก รูปที่ 2.19 ได้จากการทำให้เป็นแม่เหล็ก และการลบล้างสภาพแม่เหล็ก ของสารแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก จากเดิมสารแม่เหล็กที่ยังไม่ได้แสดงสมบัติทางแม่เหล็ก (จุด a) เมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก H โดยการเพิ่มสนามอย่างสม่ำเสมอ จะเห็นว่าความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กแสดงด้วยค่า B (Induction หรือ Flux Density) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเส้นประ ac และเมื่อค่า H และ B เพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงเริ่มเป็นเส้นตรง cd ณ จุด c หมายความว่า ความเป็นแม่เหล็กอยู่ในสภาวะอิ่มตัว เมื่อมีการลดค่าสนาม H ลงเรื่อย ๆ ค่า B จะลดลงตามเส้น ce จนกระทั่ง H เป็นศูนย์ พบว่าจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ค่า B_r (Remanent หรือ Residual Flux Density) มีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss; G) เมื่อมีการให้สนามเหนี่ยวนำ H ในทิศทางตรงข้าม (Demagnetising Field) และเพิ่มสนามขึ้นเรื่อย ๆ จะพบว่าค่า B จะค่อย ๆ ลดลง เรียกว่าการลบล้างสภาพแม่เหล็ก จนกระทั่งค่า B เป็นศูนย์ ณ จุด f ค่าสนามแม่เหล็ก H ที่ใช้ เรียกว่าแรงลบล้างแม่เหล็ก (Coercive Force; H_c) มีหน่วยเป็นเออร์สเตด (Oe) เมื่อมีการเพิ่มค่าสนาม H ต่อไปจะทำให้เป็นแม่เหล็กอีกครั้ง แต่ความเป็นแม่เหล็ก B จะเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้าม ตามเส้น fg และจะอิ่มตัว จากนั้นเมื่อเริ่มลดค่าสนาม H จนเป็นศูนย์ค่า B จะลดลงเหลืออยู่จุด k หรือแสดงค่า $-B_r$ เมื่อมีการให้สนามต่อไปในทิศทางตรงข้ามอีกครั้งจนเกิดเป็นการลบล้างสภาพแม่เหล็กตามเส้น km จุด m จะแสดงค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก ($+H_c$) และความเป็นแม่เหล็กจะสอดคล้องตามเส้น mc และครบวงจรเกิดเป็นรูปของวงจรแม่เหล็ก (Hysteresis Loop) แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B [16]

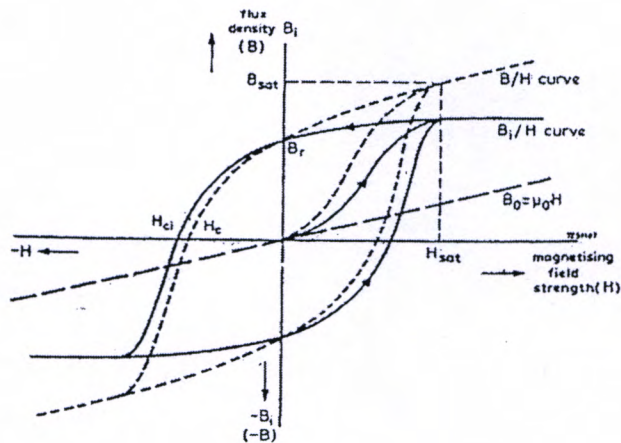
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมแม่เหล็กที่กล่าวมามีค่า B ได้จากผลรวมของค่าฟลักซ์ที่มาจากสารแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นเส้นแรงภายใน (Intrinsic Flux Density; B_i) และค่าฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กภายนอก มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.15

$$B_i = B - H \quad (2.15)$$

ดังนั้นวงจรมแม่เหล็กในรูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของค่า B_i กับค่า H (เส้นทึบ) คือเมื่อสารถูกเหนี่ยวนำถึงจุดอิ่มตัวแล้วค่า B_i จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงได้กราฟ B_i/H ขนานกับแกน H และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กที่ได้จากวงจรมแม่เหล็กนี้คือ H_{ci} จะเป็นแรงลบล้างสนามแม่เหล็กภายในเมื่อเปรียบเทียบกับรูป 2.19 (หรือเส้นไขปลารูป 2.20) ค่า B หลังจากอิ่มตัวแล้วจะได้กราฟ B/H มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงไปตามกราฟของ $B_0 = \mu_0 H$ เนื่องจากค่า B_i คงที่ ตามสมการ 2.15

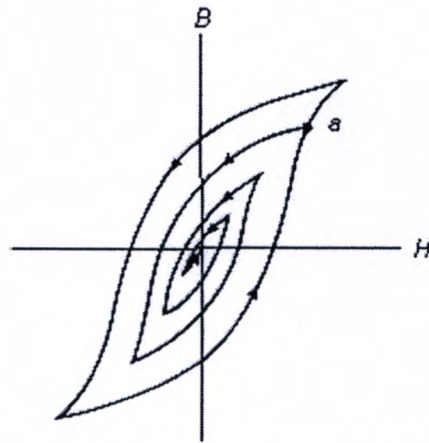
ชิ้นงานแม่เหล็กหลังจากถูกนำไปอัดสนามแม่เหล็กที่อิ่มตัวแล้ว สนามแม่เหล็กที่ค้างอยู่ในแม่เหล็ก B_r จะถูกนำไปใช้งาน ในการใช้งานของแม่เหล็กหรือพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์พิจารณาได้จากสมบัติของการลบล้างสภาพแม่เหล็ก (อยู่ในจุดภาคที่ 2 ของวงจรมแม่เหล็ก) จากรูปที่ 2.20 พลังงานที่ได้ขึ้นกับค่า B และค่า H จะเห็นว่าที่ B_0 และ H_0 จะเป็นจุดที่ให้พลังงานสูงสุด BH_{max} (Maximum Energy Product) ค่าพลังงานเป็นหน่วยเป็น kJ/m^3 (MGOe) แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรมแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นเส้นแรงภายใน (Intrinsic Flux Density; B_i) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

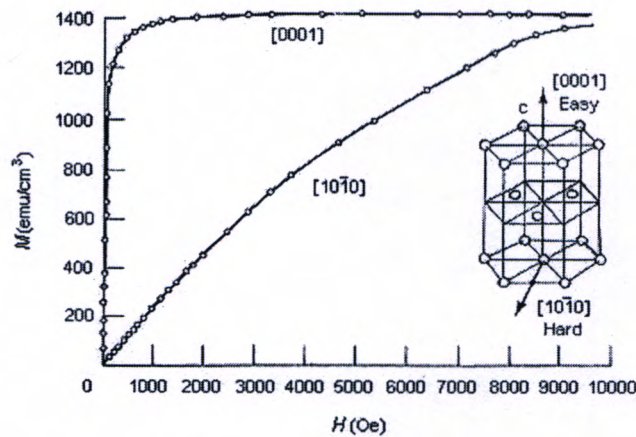
การลบล้างสภาพแม่เหล็กทำโดยการขีดขวางวงจรถูกที่บางจุด เช่นจุด a ในรูป 2.21 โดยการลดขนาดของสนามในวงจรถูกเพียงเล็กน้อยอย่างกะทันหันในแต่ละวงจรถูก ทำให้เกิดวงจรการเดินของการเหนี่ยวนำที่เล็กลงและมีวงจรถูกที่เล็กลงจนกระทั่งสุดท้ายจะไปปรากฏที่จุดกำเนิด การลบล้างสภาพแม่เหล็กด้วยวิธีอื่นของสารเฟอร์โรแมกเนติก หรือเฟอร์ริแมกเนติกโดยให้ความร้อนมากกว่าจุดคูรี (Curie Point) เหนืออุณหภูมินี้วัสดุทั้งสองชนิดจะกลายเป็นสารพาราแมกเนติก และถ้าถูกทำให้เย็นโดยปราศจากการให้สนามจะเหมือนกับการลบล้างสภาพแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.21 การลบล้างสภาพแม่เหล็กโดยการลดแอมพลิจูดเป็นวงจรถูก [15]

2.3.10 สมบัติแอนไอโซโทรปิกของโครงผลึกเฮกซะโกนอล (Anisotropy in Hexagonal Crystals) [15]

โดยทั่ว ๆ ไปสมบัติทางแม่เหล็กของสารจะมีหลายทิศทาง โดยพิจารณาถึงทิศทางของผลึกเดี่ยว (Single Crystal) เช่น โคบอลต์ที่มีโครงผลึกแบบเฮกซะโกนอลมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การทำให้เป็นแม่เหล็กผลึกเดี่ยวของโคบอลต์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าทิศทางของผลึกมีผลต่อการทำให้เป็นแม่เหล็ก ผลึกจึงแสดงสมบัติแอนไอโซโทรปิก สามารถอธิบายได้ในเทอมของค่าคงที่แอนไอโซโทรปิก (Anisotropy Constants; K) แกน c ของโครงผลึกเป็นทิศทางที่ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็ก และทิศทางต่าง ๆ ของระนาบอื่น ๆ พบว่ายากต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กเท่า ๆ กันทำให้พลังงานแอนไอโซโทรปี (Anisotropy Energy; E) จะขึ้นกับมุม $\theta + K'_1 \cos^2 \theta$ ระหว่าง เวกเตอร์ M_s และ แกน c ดังนั้นจะได้ว่า

$$E = K'_0 + K'_1 \cos^2 \theta + K'_2 \cos^4 \theta + \dots \quad (2.16)$$

อย่างไรก็ตามสามารถเขียนสมการในรูปของ $\sin \theta$ โดยแทนค่า $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ ในสมการ 2.17 จะได้

$$E = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots \quad (2.17)$$

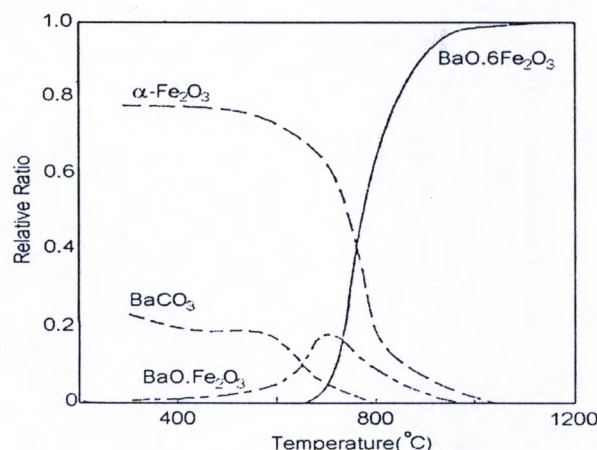
ค่า K_0, K_1, K_2, \dots เป็นค่าคงที่ของสารมีหน่วยเป็น ergs/cm³ บางกรณี K_2 มีค่าน้อยมากจึงไม่พิจารณาในสมการ ค่า K_0 เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับมุมจึงไม่นำมาพิจารณา เพราะจะสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงพลังงานแอนไอโซโทรปิกเมื่อเวกเตอร์ของโมเมนต์แม่เหล็กอ้อมตัวจากทิศทางหนึ่งเป็นทิศทางอื่น ๆ เมื่อ k_1 เป็นบวก และ $k_2 > -k_1$ พลังงานจะมีค่าน้อยที่สุดที่ $\theta = 0$ และแกน c คือแกนที่ง่าย (Easy Axis) ในการทำให้เป็นแม่เหล็ก พบว่าเป็นสภาวะที่พบในโครงผลึกของโคบอลต์ และแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มีเพียงแกนที่ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กเพียง 1 แกน โดยมีโครงสร้างโดเมนทิศทางขึ้นลงสลับกัน เหมือนในโครงผลึกแกนเดียว (Uniaxial Crystal)

2.3.11 กระบวนการผลิตแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ [16]

2.3.10.1 เซรามิก (Ceramic Process) [16]

การเตรียมแบบเซรามิก โดยการผสมผงแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และผงเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ด้วยเครื่องผสมแบบเปียก นำของผสมที่ได้ไปเผา (Calcinations) การเผาเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่สมบูรณ์ เป็นการลดข้อบกพร่องต่าง ๆ ในโครงผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์ โดยแบเรียมเฟอร์ไรท์จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาระหว่าง 600-1,000 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.23 เพื่อให้ได้ผงเฟอร์ไรท์ที่สมบูรณ์จึงเลือกการเผาในช่วงอุณหภูมิ 1,000-1,350 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเผาแล้วจึงนำแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ได้ไปบดเป็นผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ปริมาณการเกิดแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [16]

2.3.10.2 วิธีแบบเปียก (Wet Method) หรือการตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation)[16]

เนื่องจากการเตรียมผงแบเรียมเฟอร์ไรท์โดยวิธีเซรามิกมักจะมีปัญหาคือ ผงเฟอร์ไรท์จะหยาบ และค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะกว้าง ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีเตรียมแบบเปียก หรือเรียกว่าวิธีการตกตะกอนร่วมซึ่งเป็นการเตรียมผงแบเรียมเฟอร์ไรท์จากปฏิกิริยาเคมี โดยการนำสารละลายแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) มาทำการตกตะกอนร่วมโดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) นำตะกอนที่ได้ไปเผาโดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการเผาแบบวิธีเซรามิก

2.3.10.3 วิธีเตรียมแบบอื่น ๆ [16]

1. สังเคราะห์จากของหลอมเหลว (Synthesis from Melts) [16]

ออกไซด์ฟลักซ์ใช้ในการเตรียมผลึกเดี่ยวของ $BaFe_{12}O_{19}$ จาก BaO และ Fe_2O_3 ซึ่งปกติจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,540 องศาเซลเซียส โดยวิธีออกไซด์ฟลักซ์สามารถเตรียมได้จาก $BaO-Na_2O-Fe_2O_3$ หลอมเหลว ณ อุณหภูมิต่ำที่ 1,250 องศาเซลเซียส หรือ $BaO-B_2O_3-Fe_2O_3$ หลอมเหลว แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ได้จากวิธีนี้นำไปใช้ประโยชน์ด้านไมโครเวฟและเครื่องบันทึก

2. หลอมเหลวเกลือ (Salt Melts) [16]

สำหรับเตรียมผลึกแบเรียมเฟอร์ไรท์ เตรียมโดยวิธีหลอมเหลวเกลือ เช่น การหลอม Fe_2O_3 กับ $BaCl_2$ หรือ BaF_2 ที่อุณหภูมิ 1,200-1,300 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเจนจะได้ผลึกขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร วิธีหลอมเหลวเกลือยังสามารถเตรียมผงเฟอร์ไรท์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเตรียม เช่น การหลอม BaCO_3 กับ Fe_2O_3 ผสมเกลือของโลหะอัลคาไลด์ เช่น NaCl - KCl ในเกลือ Na_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 950°C แต่ข้อเสียคือ เกลือของ BaSO_4 ที่เกิดจากปริมาณ Ba ที่มากเกินไปจะละลายได้ยาก จึงทำให้ลำบากในการกำจัด BaSO_4 ที่เหลือ

3. การสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Synthesis) [16]

เตรียมจาก Fe_2O_3 หรือ FeOOH และสารละลายเบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) มากเกินไป ที่อุณหภูมิ $200\text{-}300^\circ\text{C}$ หรือเตรียมจาก $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2\text{-Fe}(\text{NO}_3)_3$ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มากเกินไป ที่อุณหภูมิ $150\text{-}180^\circ\text{C}$ การเตรียมวิธีการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลสามารถควบคุมสมบัติทางแม่เหล็กและขนาดของผงเบเรียมเฟอร์ไรท์ได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารอัลคาไลด์ไฮดรอกไซด์ บางครั้งมักจะพบว่าการเตรียมสารเฟอร์ไรท์จะมีสารปนเปื้อน ที่มีสูตรโมเลกุลข้างเคียงเกิดขึ้นพร้อมกันด้วย เช่น $\text{BaO}\cdot 4.5\text{Fe}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ จากกระบวนการผลิตแบบต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมด ในปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังใช้วิธีการเตรียมแบบเซรามิก เนื่องจากขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ประหยัดพลังงานและลงทุนต่ำ แต่สำหรับการเตรียมที่ต้องการแม่เหล็กที่มีคุณภาพดีมากๆ การเตรียมแบบ ตกตะกอนร่วม จะได้ผงเฟอร์ไรท์ที่ดี แต่การลงทุนค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการนำสารละลายบางตัวกลับมาใช้อีกวิธีผลิตแบบการตกตะกอนร่วมนี้กำลังพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลดาวัลย์ โชติมงคล และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการเตรียมผงแม่เหล็กเบเรียมเฟอร์ไรท์เพื่อใช้เป็นแม่เหล็กลำโพงจากกระบวนการทางเซรามิกโดยผสมผง Fe_2O_3 กับ BaCO_3 ในอัตราส่วน 5.5 ต่อ 1 ทำการเผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ $1,100$ องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากการศึกษาโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) พบว่าได้เบเรียมเฟอร์ไรท์ 98 เปอร์เซ็นต์ นำเบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ได้ไปบดให้เป็นผงโดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ไมโครเมตร ผงที่ได้ถูกนำไปขึ้นรูปเป็นแม่เหล็กลำโพงโดยการอัดแบบด้วยความดัน 2 ตันต่อตารางนิ้วพบว่าแม่เหล็กที่ได้มีสมบัติทางแม่เหล็กดังนี้ สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) $2,378$ เกาส์ พลังงานสูงสุดในการผลิต 2.66 MGOe และค่า H_c $2,600$ เออร์สเต็ดต์

ศิริกาญจนา ทงมี [17] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปในเบเรียมเฟอร์ไรท์ โดยผสมผงอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ กันในเบเรียมเฟอร์ไรท์ โดยนำของผสมที่ได้ไปบดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยนำไปเผาครั้งแรกที่อุณหภูมิ $1,300$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 4 องศาเซลเซียสต่อนาทีภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน จากนั้นนำสารที่ได้ไปบดเป็นเวลา 7 ชั่วโมงได้ผงแม่เหล็กมีขนาดประมาณ 1 ไมครอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผงที่ได้ไปอัดเป็นเม็ด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายใน อากาศ แล้วทำการศึกษาลักษณะแม่เหล็ก พบว่าค่าความอิ่มตัวของความเป็นแม่เหล็ก (M_s) ลดลง อย่างสม่ำเสมอเมื่อปริมาณของอลูมิเนียมในแบเรียมเฟอร์ไรท์มากขึ้น เนื่องจากอลูมิเนียมไม่มี สมบัติทางด้านแม่เหล็ก (Non-Magnetic)

Strail และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาลักษณะแม่เหล็กและการปรับปรุงความทนทาน ต่อไอโซน ไอน้ำ น้ำมัน และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมระหว่างผง แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียมเหล็กโบรอน ($NbFeB$) กับยางไนไตรล์ (Highly Saturation Nitrile Rubber; HSN) โดยผสมผงแม่เหล็กในอัตราส่วน 50-70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรด้วยเครื่องผสม แบบสองลูกกลิ้ง แล้วจึงนำมาอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดียว โดยขณะอัดรีดจะทำให้ เป็นแม่เหล็กโดยให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก 12,000 เฮอร์สเติตต์ ในบริเวณหัวตาย แล้วจึง ทำการเชื่อมโยงยางโดยใช้ล้าอิเล็กตรอนพลังงานสูง 3,000,000 อิเล็กตรอนโวลต์ พบว่ายาง แม่เหล็กที่ได้มีสมบัติแม่เหล็ก คือ สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) 3,400 เกาส์ พลังงานสูงสุดในการ ผลิต 2.5 MGOe และค่า H_c 2,900 เฮอร์สเติตต์ แต่ค่าที่ได้ยังต่ำมากเมื่อเทียบกับสมบัติทาง แม่เหล็กของผงแม่เหล็กที่ใช้ในการผสม โดยมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) 11,750 เกาส์ พลังงาน สูงสุดในการผลิต 32.0 MGOe และค่า H_c 13,000 เฮอร์สเติตต์

Strail และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาลักษณะแม่เหล็กและการปรับปรุงความทนทาน ต่อไอโซน ไอน้ำ น้ำมัน และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมระหว่างผง แม่เหล็กชนิด แบเรียมสตรอนเตียมเฟอร์ไรท์ ($BaSrOFe_2O_3$) กับยางไนไตรล์ (HSN) โดยผสมผง แม่เหล็กในอัตราส่วน 55-65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วจึง นำมาอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดียว โดยขณะอัดรีดทำให้เป็นแม่เหล็กโดยให้สนาม แม่เหล็กจากภายนอก 12,000 เฮอร์สเติตต์ ในบริเวณหัวตาย แล้วจึงทำการเชื่อมโยงยางโดยใช้ ล้าอิเล็กตรอนพลังงานสูง 3,000,000 อิเล็กตรอนโวลต์ พบว่ายางแม่เหล็กที่ได้มีสมบัติแม่เหล็กที่ สูงมากคือมีค่า สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) เท่ากับ 2,000 เกาส์ พลังงานสูงสุดในการผลิต เท่ากับ 1.0 MGOe และค่า H_c เท่ากับ 2,000 เฮอร์สเติตต์

Tada และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาลักษณะแม่เหล็กและการปรับปรุงสมบัติทาง แม่เหล็กของผงแม่เหล็กก่อนทำการผสม โดยทำการเผาผงแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ผสมกับ ผงเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในอัตราส่วน 1/5.6 โมล ที่ 1,300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำแม่เหล็กที่ได้ไปบดให้อนุภาคมีขนาด 1-1.5 ไมโครเมตร นำอนุภาคแม่เหล็กไปทำการอบที่ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง การอบจะเป็นการลดความผิดพลาดของโครงสร้างทำให้ สมบัติทางแม่เหล็กดีขึ้น ทำการผสมโดยผสมผงแม่เหล็กชนิดแบเรียมสตรอนเตียมเฟอร์ไรท์ ($BaSrOFe_2O_3$) 1,840 กรัม เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) 148 กรัมโดยใช้เครื่องผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสองลูกกิ้ง แล้วจึงนำมาอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว พบว่าสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่ได้มีค่าสูงมากโดยมีค่า สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) 2,780 เกาส์ พลังงานสูงสุดในการผลิต 1.92 MGOe และค่า H_c 2,920 เออร์สเต็ดต์

Sawa และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กโดยทำการผสมผงแม่เหล็ก BaSrO₆Fe₂O₃ 88-91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เอทิลีนเมทาคริลิกแอซิดโคพอลิเมอร์ และ SmC₅ (R = Sm Pr Y La หรือ Ce) 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เอทิลีนเมทาคริลิกแอซิดโคพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดแบบชนิดฉีด พร้อมกับทำให้เป็นแม่เหล็กขณะทำการฉีดขึ้นรูป พบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้ขึ้นกับปริมาณการจัดเรียงตัวของผงแม่เหล็ก และปริมาณของผงแม่เหล็กในยางแม่เหล็ก โดยที่ปริมาณการจัดเรียงตัวและปริมาณผงแม่เหล็กที่มากส่งผลให้สนามที่แรง แต่ปริมาณการจัดเรียงตัวขึ้นกับความหนืดของยางแม่เหล็กโดยถ้าความหนืดสูงปริมาณการจัดเรียงตัวลดลง ปริมาณของผงแม่เหล็กที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดสูงขึ้น และความหนืดของยางแม่เหล็กลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่ได้มีค่าสูง โดยที่ BaSrO₆Fe₂O₃ 88-91 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เอทิลีนเมทาคริลิกแอซิดโคพอลิเมอร์ พบว่า สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) 2,680 เกาส์ พลังงานสูงสุดในการผลิต 1.71 MGOe และค่า H_c 2,400 เออร์สเต็ดต์ และ SmC₅ (R = Sm Pr Y La หรือ Ce) 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เอทิลีนเมทาคริลิกแอซิดโคพอลิเมอร์ สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) 6,800 เกาส์ พลังงานสูงสุดในการผลิต 9.8 MGOe และค่า H_c 4,500 เออร์สเต็ดต์ ยางแม่เหล็กที่ได้มีการจัดเรียงตัวสูงมากถึง 95 เปอร์เซ็นต์

Flament และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการใช้ยางแม่เหล็กในการบำบัดโรค (Therapeutic) โดยการใช้ยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมยางซิลิโคน (Silicone Rubber) กับผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนในอัตราส่วนผสม 40–60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงแม่เหล็กที่ใช้มีค่าสนามแม่เหล็กตกค้างไม่ต่ำกว่า 0.8 เทสลา (Tesla) และใช้สนามแม่เหล็กในการทำให้เป็นแม่เหล็ก 2.5 เทสลา พบว่ายางแม่เหล็กที่ได้มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) 200 เปอร์เซ็นต์

Poh และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ และยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวทาได-อิน โดยใช้เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่ 0 ถึง 40 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูงขึ้นเมื่อปริมาณเขม่าดำ และซิลิกาสูงขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ

แคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อ เขม่าดำ และซิลิกาสูงขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น

Vinod และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียสภาพของยางธรรมชาติผสมกับผงอลูมิเนียมจากความร้อน ไอโซน และรังสีพลังงานสูง โดยผสมผงอลูมิเนียมที่ 0-40 phr โดยใช้โคบอลต์แคปทาเนตเป็นสารคู่ควบ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมสูงขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมสูงขึ้น

บวร โรจนภรณ์ และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมยิปซัมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยเติมยิปซัมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ 0-60 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณยิปซัมสูงขึ้น ความแข็งแรง และมอดุลัสสูงขึ้นเมื่อปริมาณยิปซัมสูงขึ้น โดยยิปซัมขนาดเล็กให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงกว่ายิปซัมที่มีขนาดใหญ่

พลชีพ ลัมพงษ์ และคณะ [25] ได้ทำการศึกษสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมพบว่า ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS-2) ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตร และสหกรณ์
2. ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ จากบริษัทโอบอ้อมอุตสาหกรรม จำกัด
3. ผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$; Small Powder) บริษัท แอดแวนซ์-แมกเนติก ประเทศไทย จำกัด
4. กำมะถัน (Sulfur) เกรดการค้า
5. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd.
6. สารเร่งไตเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (MBTS) เกรดการค้า
7. สารเร่งเตตระเมทิลไทูแรมโมโนซัลไฟด์ (TMTM) เกรดการค้า
8. น้ำมันแนฟทานิก (Naphthanic oil) เกรดการค้า
9. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า
10. ขี้ผึ้ง (Wax) เกรดการค้า
11. สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant agent) Wingstay[®] 22CP 46 เกรดการค้า
12. PEG-4000 เกรดการค้า

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill): Lab Technology Engineering Company Ltd.
2. เครื่องวัดการบ่มตัวของยาง (Curelometer[®]): Nichigo Shoji รุ่น IIF 150
3. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine): Llyod Instrument Ltd. รุ่น LR-30K
4. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine): Lab Technology Engineering Company Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอว์ดี (Hardness tester, shore D): Yasuda Seiki Seisakusho Ltd. รุ่น DXT-3
6. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
7. เครื่องทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizer): Walker Scientific INC รุ่น DCM 20
8. เครื่องสร้างกราฟฮีสเทอรีซิส (Hysteresisgraph): Walker Scientific INC รุ่น AMH 10
9. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney Viscometer): Shimazu Automatic รุ่น SMV-201
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) LEO รุ่น 1455VP
11. เครื่องตัดชิ้นงาน (Cutting Machine) รุ่น CEAST 6052
12. เครื่องชั่ง : Denver Instrument รุ่น TR-6101

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1. การเตรียมผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา

นำผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ยังไม่ผ่านการเผาไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,285 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศปกติ (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โอบอ้อมอุตสาหกรรม) บดผงแม่เหล็กด้วยเครื่องบด Ball-Mill เป็นเวลา 30 นาที บดผงแม่เหล็กที่ได้จากการบดเพื่อลดความเครียดตกค้างที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีภายใต้บรรยากาศปกติ

3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) โดยใช้ผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่ผ่านการเผา และผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผาแล้ว เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์หลังผ่านการเผา

3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงแม่เหล็ก

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา และผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนโดยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer X โดยใช้ น้ำเป็นตัวพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรปิก

3.3.4.1. การผสมยางแม่เหล็ก

1. ชั่งยางธรรมชาติ ผงแม่เหล็ก (ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา) และสารเติมแต่งในอัตราส่วนโดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยสูตรที่ผสมประกอบไปด้วย 5 สูตรโดยแปรค่าผงแม่เหล็กเป็น 100 150 233 400 และ 900 phr ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมยางแม่เหล็ก

สารเคมี	สูตร 1 (100 phr)	สูตร 2 (150 phr)	สูตร 3 (233 phr)	สูตร 4 (400 phr)	สูตร 5 (900 phr)
ยาง (กรัม)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ผงแม่เหล็ก (กรัม)	100.00	150.00	233.33	400.00	900.00
กำมะถัน (กรัม)	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
ZnO (กรัม)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
MBTS (กรัม)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
TMTM (กรัม)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
PEG-4000 (กรัม)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Wax (กรัม)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Stearic Acid (กรัม)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Napthanic Oil (กรัม)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Antioxidant (กรัม)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

2. นำยางธรรมชาติบดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติม กรดสเตียริก สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และซีฟี่ผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

3. ผสมผงแม่เหล็ก สลับกับน้ำมันแนพทานิกเพื่อช่วยให้การผสมง่ายขึ้นจนรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 20 นาที)

4. ผสมกำมะถัน ซิงค์ออกไซด์ MBTS และ TMTM เป็นลำดับสุดท้ายเพื่อป้องกันการเชื่อมโยงระหว่างการผสม (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 5 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2. หาเวลาในการเชื่อมโยงของยางแม่เหล็ก (Curing Time)

นำตัวอย่างยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมโดยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งใส่ในเครื่องวัดการบ่มตัวของยาง (Curelasterometer[®]) โดยตั้งสภาวะของเครื่องไว้ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ตัวบน และตัวล่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สันที่มุม ± 3 องศา หาเวลาเชื่อมโยงของยาง t_{90} จากกราฟที่ได้จากเครื่อง [25]

3.3.4.3. หาความหนืดของยางแม่เหล็ก

นำยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมโดยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งหลังเติมสารเชื่อมโยงแล้วใส่ในเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้ โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ และตั้งสภาวะของเครื่องที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 125 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 1 นาที และใช้เวลาในการวัดอีก 4 นาที [26]

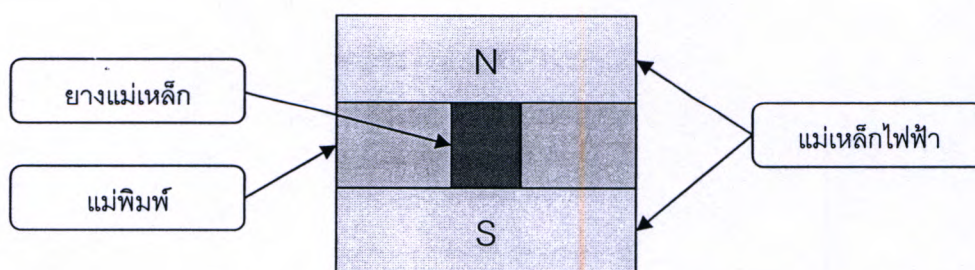
3.3.4.4. การขึ้นรูปยางแม่เหล็ก

นำยางแม่เหล็กไปอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine) โดยตั้งสภาวะของเครื่องที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอัดร้อนเป็น 1.2 เท่าของเวลา t_{90} ที่ได้จากข้อมูลของเครื่องวัดการบ่มตัวของยาง โดยทำการขึ้นรูปขึ้นงานเป็นทรงกระบอกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และมีความสูง 8 มิลลิเมตรเพื่อนำไปใช้ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็ก และขึ้นรูปเป็นแผ่นความหนา 3 มิลลิเมตร นำแผ่นยางที่ได้ตัดเป็นรูปดัมเบลล์ โดยมีระยะเกจ 25 มิลลิเมตรเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.5 การเตรียมยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดแอนไอโซโทรปิก

3.3.5.1. การเตรียมสารละลายยางแม่เหล็ก

ละลายยางแม่เหล็กจากข้อที่ 3.3.4.1 ด้วยคลอโรฟอร์ม นำสารละลายยางแม่เหล็กที่ได้ไปหล่อใส่แม่พิมพ์ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และมีความสูง 8 มิลลิเมตร ให้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กไฟฟ้าขณะทำการหล่อ เพื่อทำให้อนุภาคแม่เหล็กเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวแกนของทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเตรียมยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.2. การขึ้นรูปยางแม่เหล็ก

นำแม่พิมพ์ที่มียางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยตั้งสภาวะของเครื่องที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอัดร้อนเป็น 1.2 เท่าของ เวลา t_{90} ที่ได้จากข้อมูลของเครื่องวัดการบ่มตัวของยาง (จากข้อ 3.3.4.2)

3.3.6 การเตรียมยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน

เตรียมยางแม่เหล็กเช่นเดียวกับข้อ 3.3.4 โดยใช้ผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนแทน ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์

3.4 การทดสอบ

3.4.1. การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็ก (Mechanical Properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ อเนกประสงค์ (Universal Testing Machine): Llyod Instrument Ltd. รุ่น LR-30K ตามมาตรฐาน ASTM D-412 ตั้งสภาวะในการทดสอบคือ ระยะเกจ (Gage Length) 25 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึงยึด 500 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง [28]

2. เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ทดสอบด้วยเครื่อง ทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine): Llyod Instrument Ltd. รุ่น LR-30K ตาม มาตรฐาน ASTM D-412 ตั้งสภาวะในการทดสอบคือ ระยะเกจ (Gage Length) 25 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึงยึด 500 มิลลิเมตรต่อนาทีใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง [28]

3. ความแข็งกด (Hardness) ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งกดแบบชอร์เอ และชอร์ดี (Hardness Tester, Shore A, Shore D): Yasuda Seiki Seisakusho Ltd. รุ่น DXT-3 ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D-2240 โดยอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องใช้ ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง [29]

4. ความหนาแน่น (Density) โดยคำนวณจากน้ำหนักของยางแม่เหล็กต่อปริมาตร ของยางแม่เหล็กในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อ ตัวอย่าง

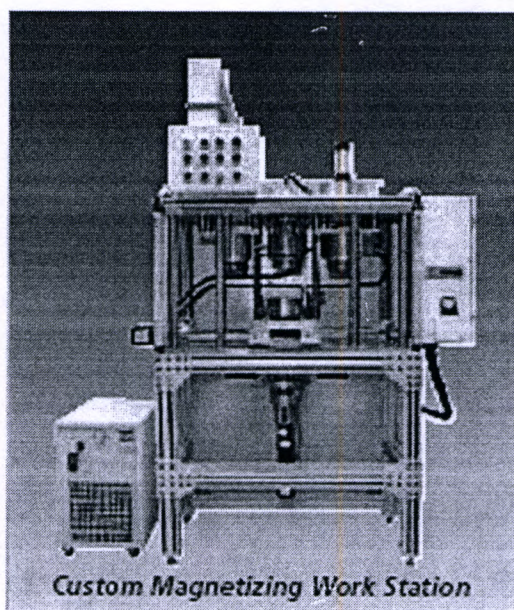
3.4.2. การทดสอบสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Properties)

การทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็ก จะทำการวัดค่าพลังงานสูงสุดของ ผลิตภัณฑ์ (BH_{max}) สนามแม่เหล็กคงค้าง (B_r) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (H_c) และแรงลบล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแม่เหล็กภายใน (H_c) ด้วยเครื่องทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizer) และเครื่องสร้างกราฟ ฮีสเทอรีซิส (Hysteresisgraph) ตามมาตรฐาน ASTM A 773 [30] ตามขั้นตอนดังนี้

1. เหนี่ยวนำยางแม่เหล็กให้มีสภาพทางแม่เหล็ก (Magnetite) ด้วยเครื่องทำให้เป็นแม่เหล็กโดยนำยางแม่เหล็กที่เตรียมให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกใส่ในช่องใส่ตัวอย่างในแนวตั้งเพื่อทำให้เป็นแม่เหล็กในทิศทางขนานกับแนวแกนของทรงกระบอก ในแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเหนี่ยวนำยางแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการจ่ายกระแสที่มีความต่างศักย์ 3,000 โวลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่ามากเกินไปที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นยางแม่เหล็กที่อึดตัว



รูปที่ 3.2 เครื่องทำให้เป็นแม่เหล็ก [31]

2. วัดค่าสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่มีสภาพทางแม่เหล็กในข้างต้นด้วยเครื่องสร้างกราฟฮีสเทอรีซิส โดยนำยางแม่เหล็กที่มีสภาพทางแม่เหล็กใส่ชุดลวดค้นหา (Search Coil) ที่อยู่ในเครื่องสร้างกราฟฮีสเทอรีซิส ปรับให้แกนเหล็กสัมผัสกับยางแม่เหล็กพอดี โดยในการวัดเครื่องจะให้สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กของชิ้นยางโดยจะทำการให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เครื่องจะแสดงค่าพลังงานสูงสุดของผลิตภัณฑ์ (BH_{max}) สนามแม่เหล็กคงค้าง (B_r) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (H_c) และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (H_{ci}) เป็นตัวเลข บันทึกค่าเหล่านี้ไว้เพื่อใช้ประมวลผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องสร้างกราฟฮีสเทอรีซิส (Hysteresisgraph) [31]

3.4.3. การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็ก

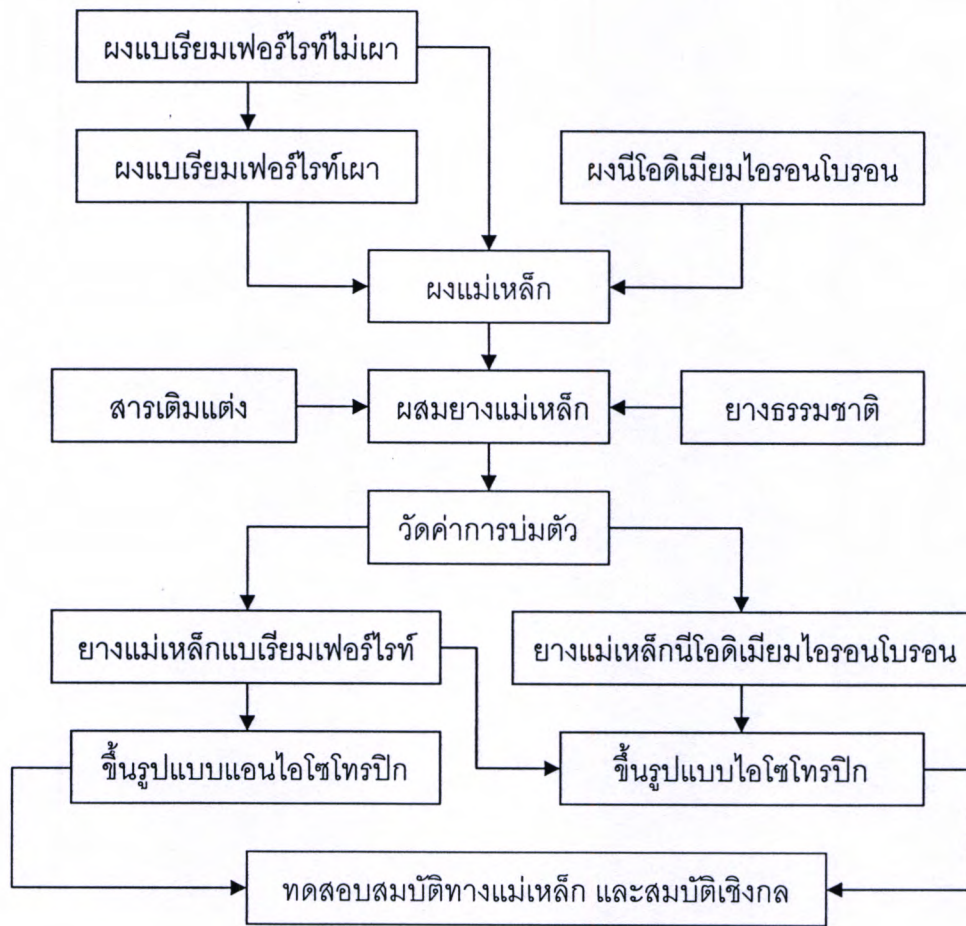
การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการศึกษาถึงการกระจายตัว ขนาดผงแม่เหล็ก และยางแม่เหล็กในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

3.5 ตัวแปรสำคัญในงานวิจัย

1. อัตราส่วนผสมของผงแม่เหล็กต่อยางธรรมชาติที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็ก โดยเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็กในอัตราส่วนต่าง ๆ กันของผงแม่เหล็ก
2. สมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่เตรียมจากผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา และไม่ผ่านการเผา โดยเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่ได้ในแต่ละอัตราส่วน
3. การจัดเรียงตัวของอนุภาคแม่เหล็กในเนื้อยางแม่เหล็กที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มีการจัดเรียงอนุภาค และไม่มีการจัดเรียงอนุภาค
4. ชนิดของผงแม่เหล็กที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็ก ได้แก่ยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ และยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมผงนีโอไดเมียมไอออนโบรอน
5. สมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กที่เตรียมได้
6. โครงผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา เปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการเผา
7. สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็ก และยางแม่เหล็กที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาได้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรสำคัญในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติ กับผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา ผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรอปิก และยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดแอนไอโซโทรอปิก แล้วทำการศึกษสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กที่ผลิตได้ในอัตราส่วนต่าง ๆ ผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 ขนาดของผงแม่เหล็ก

จากการวัดขนาดของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา และผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer X โดยใช้น้ำเป็นตัวพา พบว่าผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีขนาดผงเฉลี่ยใหญ่กว่าผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีขนาดผงใหญ่ที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดผงแม่เหล็ก

$BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ไม่เผา (μm)	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$ เผา (μm)	$Nd_2Fe_{14}B$ (μm)
26.60	37.89	74.05

4.2 เวลาบ่มตัวยาง (Cure Time)

เวลาในการบ่มตัวของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงแม่เหล็กนำความร้อนได้ดีกว่ายาง เมื่อผสมผงแม่เหล็กในยางทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของยางผสมสูงขึ้น การกระจายความร้อนในยางสม่ำเสมอ และเร็วขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการบ่มตัวยางสั้นลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เวลาในการบ่มตัวอย่างแม่เหล็ก

สูตรที่	ปริมาณผงแม่เหล็ก (phr)	BaO.6Fe ₂ O ₃ ไม่เผา (min)	BaO.6Fe ₂ O ₃ เผา (min)	Nd ₂ Fe ₁₄ B (min)
1	100	4.12	3.35	4.45
2	150	4.09	3.10	4.27
3	233	3.34	3.09	3.45
4	400	3.18	2.57	2.57
5	900	2.45	2.59	1.40

4.3 ค่าความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney Viscosity)

ความหนืดแบบมูนนี่ (ML 1+4 (125°C)) ของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงแม่เหล็ก เนื่องจากผงแม่เหล็กจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ยาง ยิ่งผงแม่เหล็กมีปริมาณมาก ส่งผลทำให้ยางมีความหนืดสูงมากขึ้น ยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าความหนืดต่ำกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ทั้งที่ไม่เผา และที่เผา เนื่องจากเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีปริมาณผงแม่เหล็กที่ต่ำกว่า อีกทั้งมีขนาดผงที่ใหญ่กว่า ทำให้มีแรงเฉือนที่ต่ำกว่าความหนืดจึงต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.3

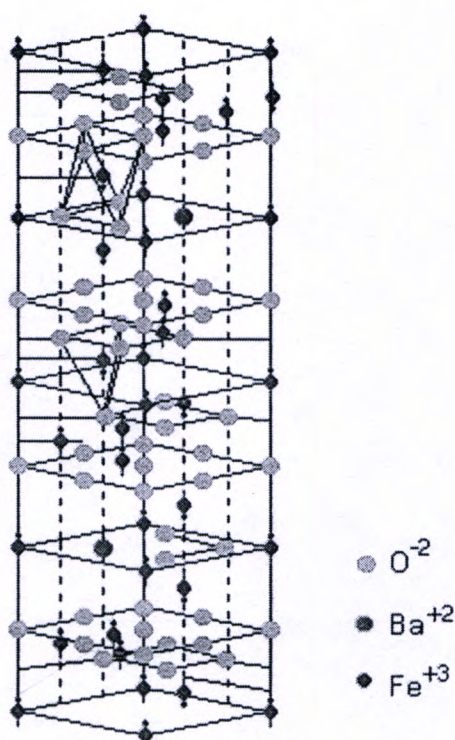
ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดแบบมูนนี่

สูตรที่	ปริมาณผงแม่เหล็ก (phr)	BaO.6Fe ₂ O ₃ ไม่เผา (Mooney Viscosity)	BaO.6Fe ₂ O ₃ เผา (Mooney Viscosity)	Nd ₂ Fe ₁₄ B (Mooney Viscosity)
1	100	24.20	19.95	14.50
2	150	25.90	25.65	16.80
3	233	38.80	35.10	18.50
4	400	70.10	62.12	20.70
5	900	124.25	117.70	33.20

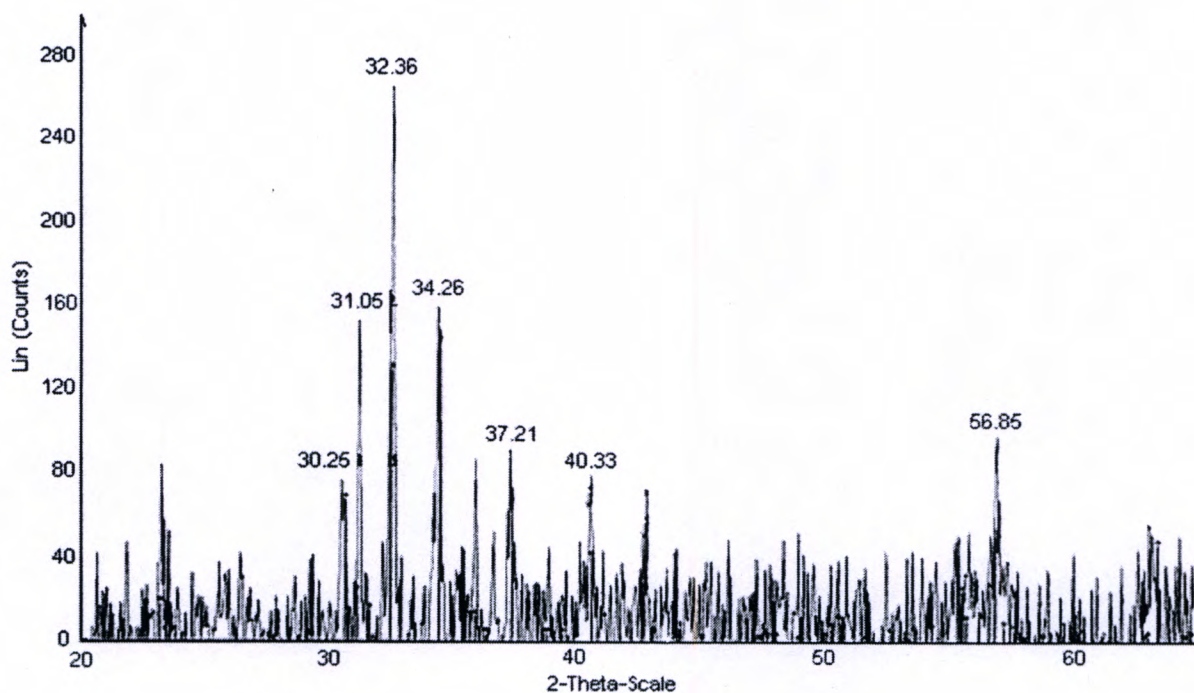
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 โครงสร้างผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรท์

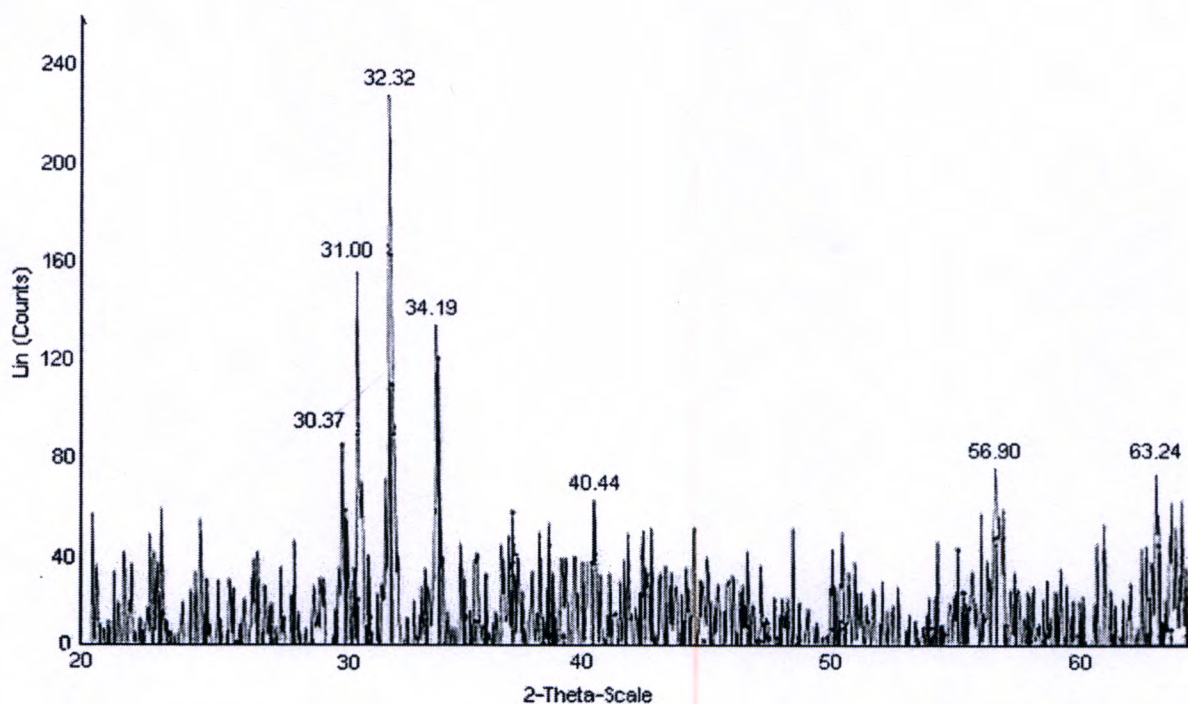
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าทั้งแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา มีโครงสร้างที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากในตำแหน่งฟลักที่มุม 30.25 31.05 32.36 34.26 40.33 และ 56.85 องศาของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา อยู่ในตำแหน่งตรงกับผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผาที่ตำแหน่ง 30.37 31.00 32.32 34.19 40.44 และ 56.90 องศาตามลำดับ โดยในแต่ละคู่มีความเข้มฟลักที่ใกล้เคียงกันซึ่งหมายถึงปริมาณของผลึกที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้โดยประมาณว่าผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา มีโครงสร้างผลึกเหมือนกับผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่ผ่านการเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 หน่วยเซลล์ของแบเรียมเฟอร์ไรท์ (Unit Cell of Barium Ferrite) [32]



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD Pattern) ของแบเรียมเพอร์ไรท์ที่ไม่เผา



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD Pattern) ของแบเรียมเพอร์ไรท์ที่เผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สมบัติทางแม่เหล็ก

จากการศึกษาการเตรียมยางแม่เหล็กในอัตราส่วนต่าง ๆ สามารถเปรียบเทียบปริมาณผงแม่เหล็กในยางแม่เหล็กในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณผงแม่เหล็กในหน่วยต่าง ๆ

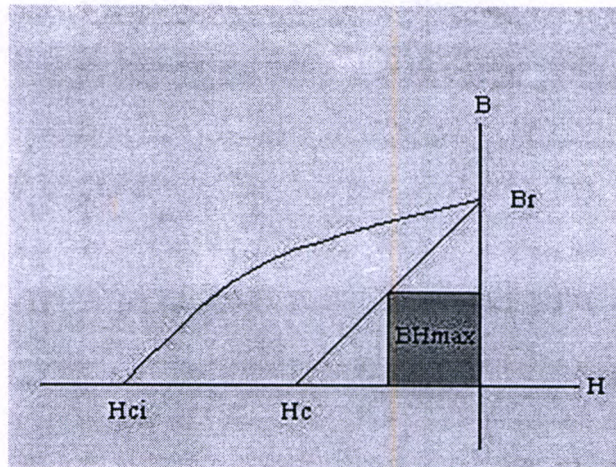
phr	%w	%v(BaO.6Fe ₂ O ₃)	%v(Nd ₂ Fe ₁₄ B)
100	44.7	14.7	9.4
150	54.8	20.6	16.5
233	65.4	28.7	19.6
400	76.4	40.8	29.4
900	87.9	60.8	48.4

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางแม่เหล็กของผงแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

ผงแม่เหล็ก	B _r (G)	H _c (Oe)	H _{ci} (Oe)	BH _{max} (MGOe)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
Ba ไม่เผา	1,349	946	1,395	0.368	4.50
Ba เผา	1,218	780	1,321	0.282	4.50
Nd	7,510	5,560	12,200	10.50	7.45

สมบัติทางแม่เหล็กวัดโดยเครื่องสร้างกราฟฮีสเทรีซิส (Hysteresisgraph) ตามมาตรฐาน ASTM A773 ค่าที่วัดได้แก่สนามแม่เหล็กตกค้าง (B_r) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (H_c) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (H_{ci}) และพลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก (BH_{max}) โดยเครื่องจะแสดงกราฟ BH และ MH ในกราฟเดียวกันในจุดภาคที่ 2 (2nd quadrant) และแสดงค่าที่วัดได้เป็นตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟฮีสเทอรีซิสของตัวอย่างในจุดภาคที่ 2 (2nd quadrant)

4.5.1 ผลของปริมาณผงแม่เหล็กต่อสมบัติทางแม่เหล็ก

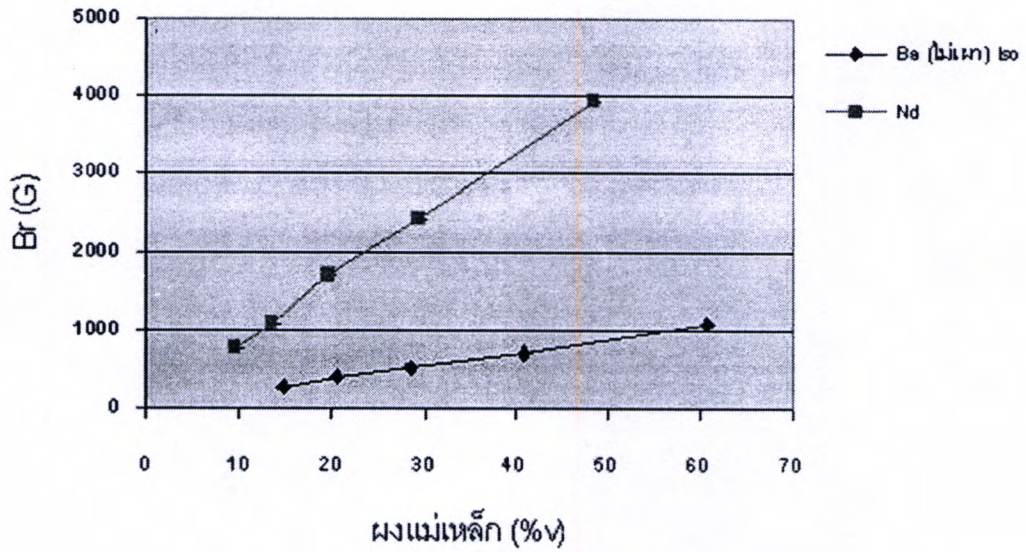
จากการศึกษาปริมาณผงแม่เหล็กต่อสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่ได้จากการผสมผงแม่เหล็ก ในอัตราส่วน 100 150 223 400 และ 900 phr หรือ 14.7 20.6 28.7 40.8 และ 60.8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก และที่ 9.4 13.5 19.6 29.4 และ 48.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน พบว่าสมบัติทางแม่เหล็กเป็นดังนี้

4.5.1.1 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux Density; B_r) และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (Coercive Force; H_c)

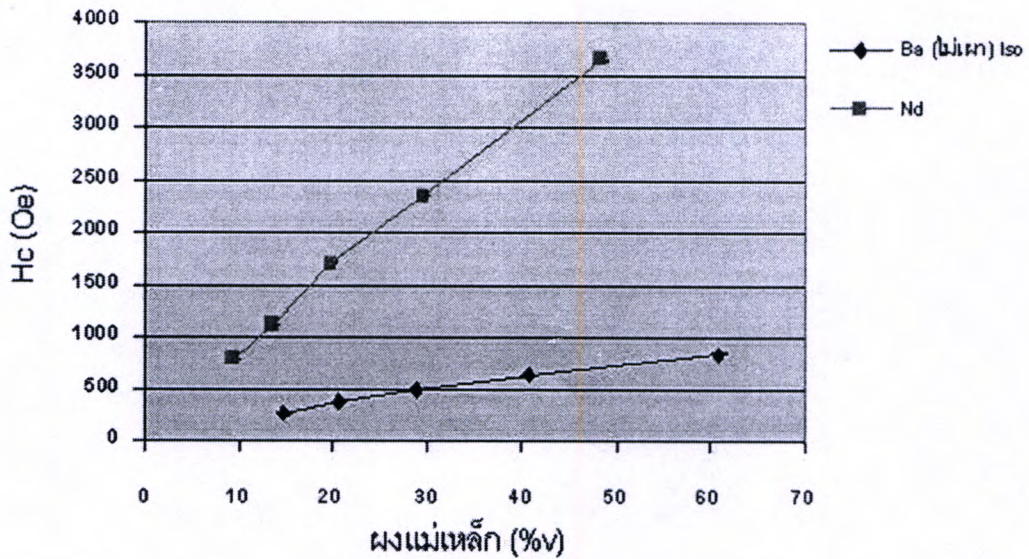
เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงทั้งในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก และยางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 เนื่องจากยางธรรมชาติไม่จัดเป็นสารแม่เหล็ก (Non-Magnetic Material) ดังนั้นสมบัติทางแม่เหล็กจึงมาจากผงแม่เหล็กเท่านั้น ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กเป็นสมบัติที่ขึ้นกับมวล ดังนั้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณผงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น จากรูปทั้งสองพบว่ายางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมีสนามแม่เหล็กตกค้าง และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ผงแม่เหล็กที่เท่า ๆ กันทั้งนี้เนื่องมาจากผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนที่ใช้เป็นผงแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง มีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (B_r 7,510 G และ H_c 5,560 Oe) สูงกว่าผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก (B_r 1,349G และ H_c 946 Oe)



รูปที่ 4.5 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก

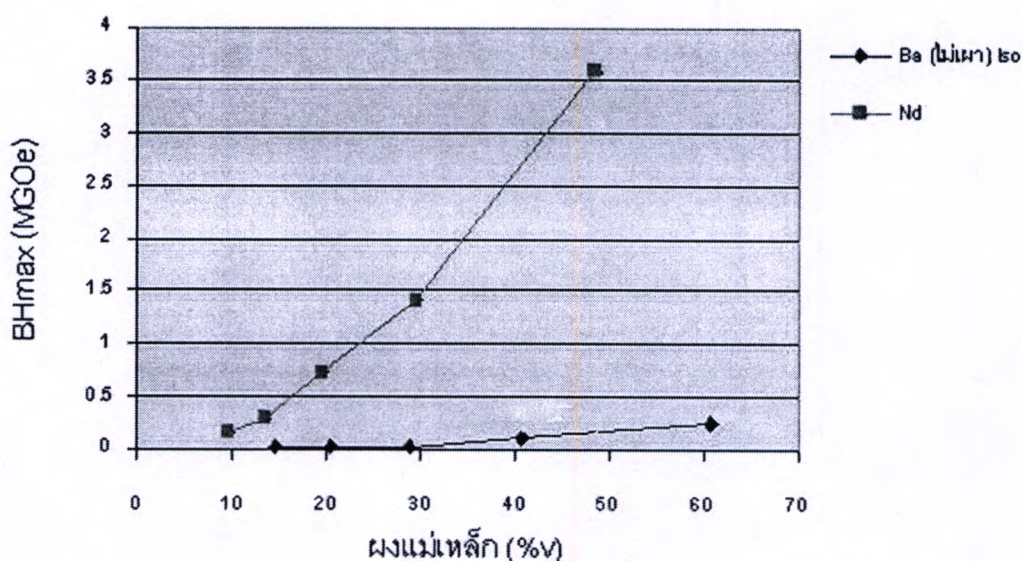


รูปที่ 4.6 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1.2 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก (Maximum Energy Product; BH_{max})

เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั้งในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ และยางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กหาได้จากกราฟ BH (BH Curve) โดยคำนวณจากจุดบนกราฟในจุดภาคที่ 2 (2^{nd} Quadrant) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่ทำให้ผลคูณของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากทั้งค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งด้วย เช่นเดียวกันยางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมีค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ทั้งนี้เป็นเพราะผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงกว่าผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์

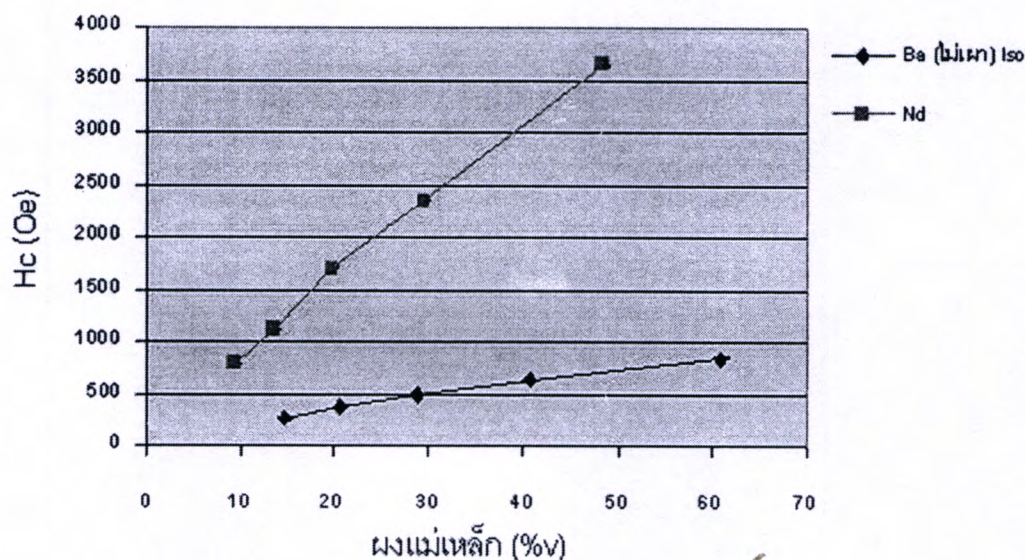


รูปที่ 4.7 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

4.5.1.3 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (Intrinsic Coercive Force; H_c)

เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยการลดลงมีแนวโน้มคงที่เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในเป็นค่าคงที่เฉพาะของสารแม่เหล็กไม่ขึ้นกับมวล ในขณะที่ปริมาณผงแม่เหล็กมีค่าต่ำ ๆ จะมีค่าสูง เนื่องจากระยะห่างระหว่างผงแม่เหล็กมีมากแสดงดังในรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4.26–4.38 ทำให้การส่งผ่านเส้นแรงแม่เหล็กทำได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ดี จึงต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงกว่าอย่างแม่เหล็กที่มีปริมาณผงแม่เหล็กสูง เพื่อลดล้างทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กให้สมบูรณ์ และจากรูปที่ 4.8 แนวโน้มของอย่างแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าลดลงมากกว่าอย่างแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะอย่างแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์มีค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (H_{ci} 1,395 Oe) ต่ำกว่าผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน (H_{ci} 12,200 Oe) มากทำให้แนวโน้มการลดลงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอย่างแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนเห็นการลดลงที่ชัดเจนกว่า



รูปที่ 4.8 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก

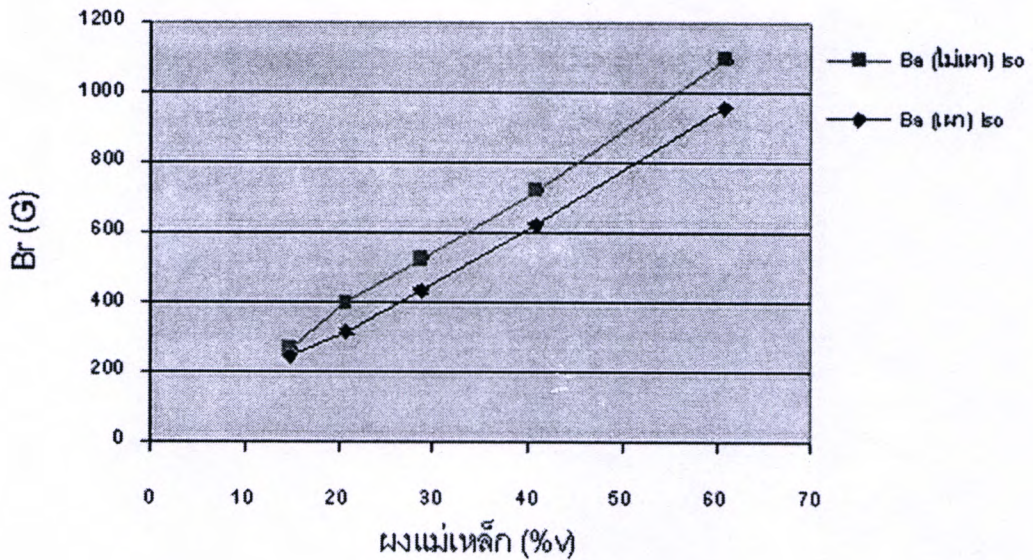
4.5.2 ผลของการเผาผงแบเรียมเฟอร์ไรท์

จากการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของอย่างแม่เหล็กที่ได้จากผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก และผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า

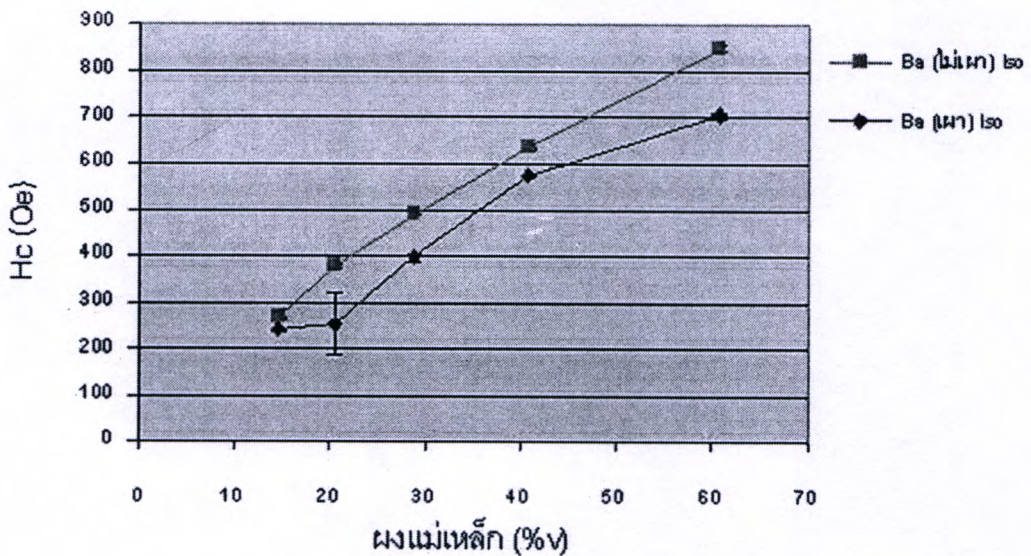
4.5.2.1 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก

อย่างแม่เหล็กที่ได้จากผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก และผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก จะมีแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น โดยที่อย่างแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก มีแนวโน้มค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงกว่าอย่างแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากการเผาผงแม่เหล็กที่อุณหภูมิสูง (1,285 องศาเซลเซียส) และใช้เวลาในการเผา (30 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง) จะทำให้โครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรต์มีความสมบูรณ์มากขึ้น แม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่เผาจึงมีสมบัติแอนไอโซโทรปิกมากขึ้น ทำให้เมื่อขึ้นรูปแบบไอโซโทรปิกที่ทิศทางของโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random Orientation) ทำให้มีการทำให้เป็นแม่เหล็กในทิศทางของแกนที่ยากในการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Hard Axis) ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบด่างสภาพแม่เหล็กจึงมีค่าต่ำกว่าของแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่ไม่เผาที่มีสมบัติแอนไอโซโทรปิกต่ำกว่า



รูปที่ 4.9 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก

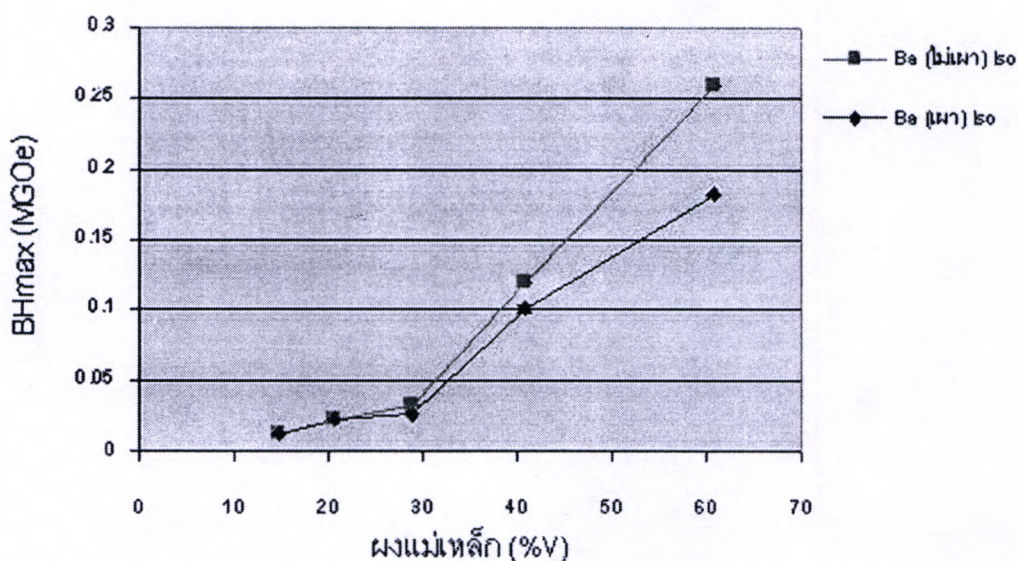


รูปที่ 4.10 ค่าแรงลบด่างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.2 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก

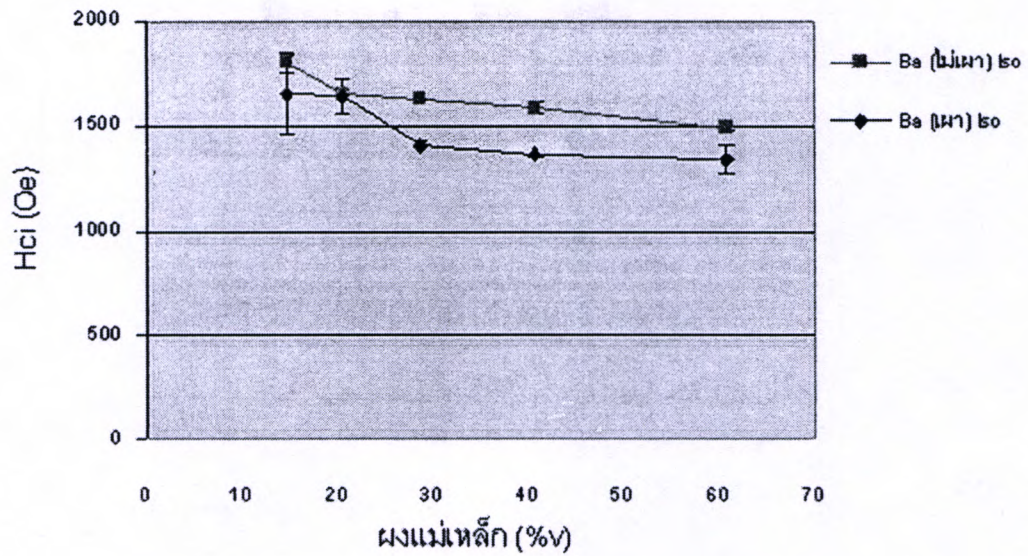
เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นทั้งยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทโรปิก และยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทโรปิก ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กหาได้จากกราฟ BH (BH Curve) โดยคำนวณจากจุดบนกราฟในจุดภาคที่ 2 (2nd Quadrant) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่ทำให้ผลคูณของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากทั้งค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งด้วย โดยที่ยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทโรปิกมีแนวโน้มที่สูงกว่ายางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทโรปิก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากมีแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4.11 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

4.5.2.3 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน

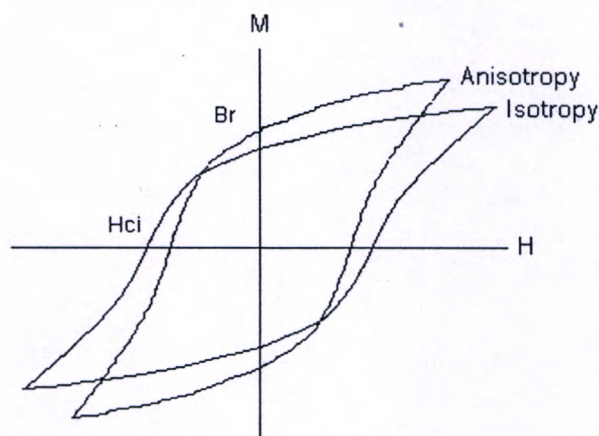
เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทโรปิก และยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทโรปิกมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าคงที่ โดยที่ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทโรปิก มีค่าต่ำกว่ายางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทโรปิก ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก

4.5.3 ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรปิก และแอนไอโซโทรปิก

สมบัติแอนไอโซโทรปิกทางแม่เหล็กเป็นสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของโครงสร้างผลึก กล่าวคือ สารแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกที่แน่นอน เช่น แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล มีแกน c ที่เป็นแกนที่ง่ายในการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Easy Axis) คือใช้สนามภายนอกเพียงเล็กน้อย ได้แม่เหล็กที่อิ่มตัว และทิศทางที่ตั้งฉากกับแกน c เป็นแกนที่ยากในการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Hard Axis) คือต้องใช้สนามภายนอกที่สูงถึงได้แม่เหล็กที่อิ่มตัว โดยกราฟวงจรมแม่เหล็กของการทำให้เป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิกแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรแม่เหล็กของสารชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิก

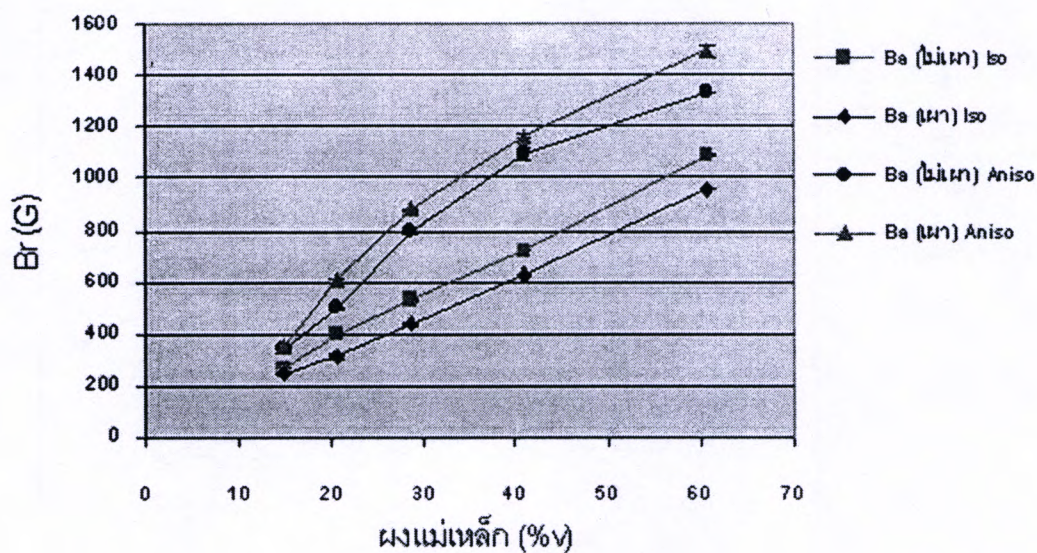
จากการศึกษาอย่างแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์แบบแอนไอโซโทรปิกที่เตรียมได้จากการนำ
 ยางแม่เหล็กผสมสูตรที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปไปละลายด้วยคลอโรฟอร์ม แล้วหล่อใส่แม่พิมพ์โดยให้
 สนามแม่เหล็กขณะทำการหล่อ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิก ให้ผลดังนี้

4.5.3.1 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก

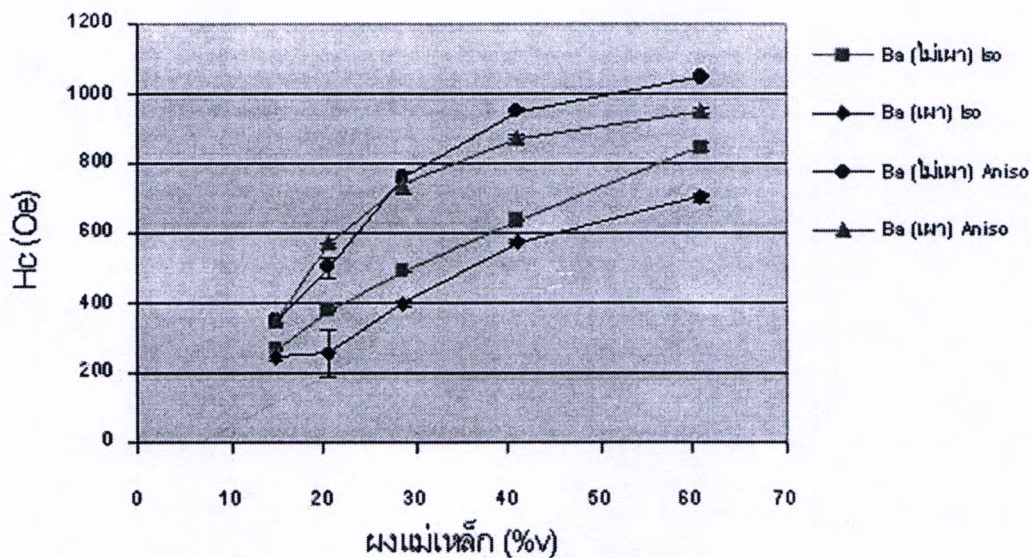
ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิกมี
 แนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กสูงขึ้นเมื่อปริมาณผง
 แม่เหล็กสูงขึ้น ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา และที่ไม่เผามีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และ
 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กของยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกสูงกว่าชนิดไอโซโทรปิก ดัง
 แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 เนื่องจากผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์มีสมบัติทางแม่เหล็กแอนไอโซ-
 โทรปิก เมื่อทำให้มีการจัดเรียงอนุภาคผงแม่เหล็กให้มีโครงสร้างในทิศทางเดียวทำให้ง่ายต่อการทำ
 ให้เป็นแม่เหล็ก ทำให้ยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้างที่สูงกว่ายาง
 แม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิกที่ไม่มีการจัดเรียงอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แรงลบล้างสภาพ
 แม่เหล็กของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผานชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็ก
 แบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผานชนิดแอนไอโซโทรปิก เนื่องจากในการวัดค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กจะทำ
 การให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศทางสวนกับสนามแม่เหล็กในขั้นตอนการทำให้เป็น
 แม่เหล็ก (Magnetization) หรือคือการให้สนามในทิศทางที่ขนานกับแกน c (Easy Axis) เมื่อการ
 ทำให้เป็นแม่เหล็กทำได้ง่าย ในทางกลับกันการลบล้างสภาพแม่เหล็กก็ทำได้ง่ายเช่นกัน ยาง
 แม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผานชนิดแอนไอโซโทรปิกมีสมบัติแอนไอโซโทรปิกที่ดีกว่ายางแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเรียบเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก สนามแม่เหล็กภายนอกเพียงเล็กน้อยอาจทำให้โมเมนต์แม่เหล็กกลับทิศได้ ค่าแรงลบข้างสภาพแม่เหล็กจึงต่ำกว่า



รูปที่ 4.14 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างกับปริมาณผงแม่เหล็ก

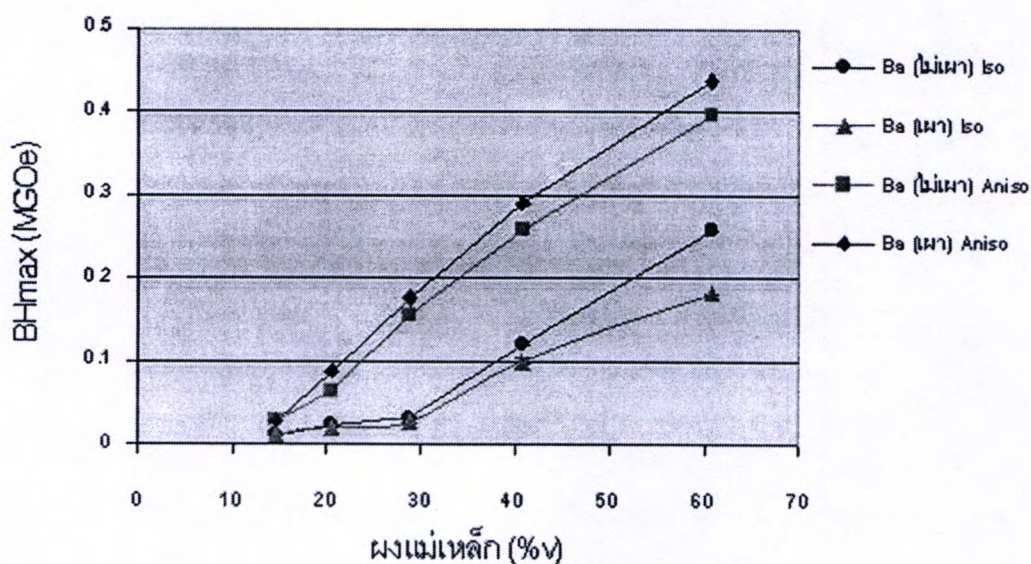


รูปที่ 4.15 แรงลบข้างสภาพแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2 ค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก

ทั้งในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิกมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้น แนวโน้มที่สูงขึ้นเนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงต้านสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้น ยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกมีแนวโน้มของค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิก เพราะยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงต้านสนามแม่เหล็กสูงกว่ายางแม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิก ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีแนวโน้มที่สูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก เนื่องจากมีแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง และค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.16

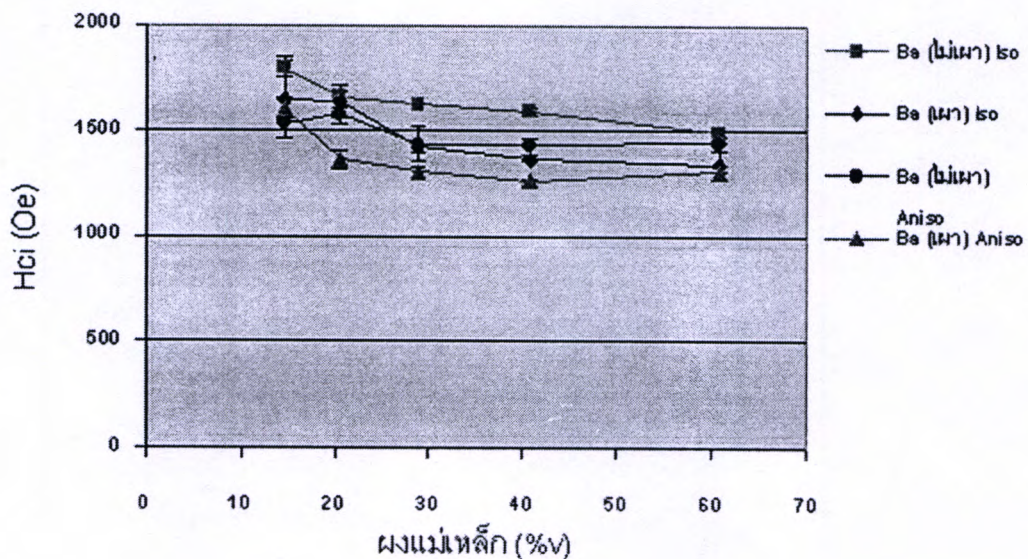


รูปที่ 4.16 พลังงานสูงสุดของแม่เหล็กกับปริมาณผงแม่เหล็ก

4.5.3.3 ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน

เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของทั้งยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผามีแนวโน้มลดลงจนมีค่าคงที่ที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ โดยที่ค่าแรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดแอนไอโซโทรปิกที่ไม่เผามีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กที่ได้จากผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ชนิดแอนไอโซโทรปิกที่เผา ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เนื่องจากการเผาผงแม่เหล็กทำให้มีการจัดเรียงผลึกได้สมบูรณ์ขึ้น เมื่อผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันทำให้ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็ก ในทางตรงกันข้ามเป็นการง่ายต่อ

การลดล้างสภาพแม่เหล็กเช่นกัน ทำให้แรงลดล้างสภาพแม่เหล็กภายในมีค่าต่ำกว่าอย่างแม่เหล็กชนิดไอโซโทรปิก



รูปที่ 4.17 แรงลดล้างสภาพแม่เหล็กภายในกับปริมาณผงแม่เหล็ก

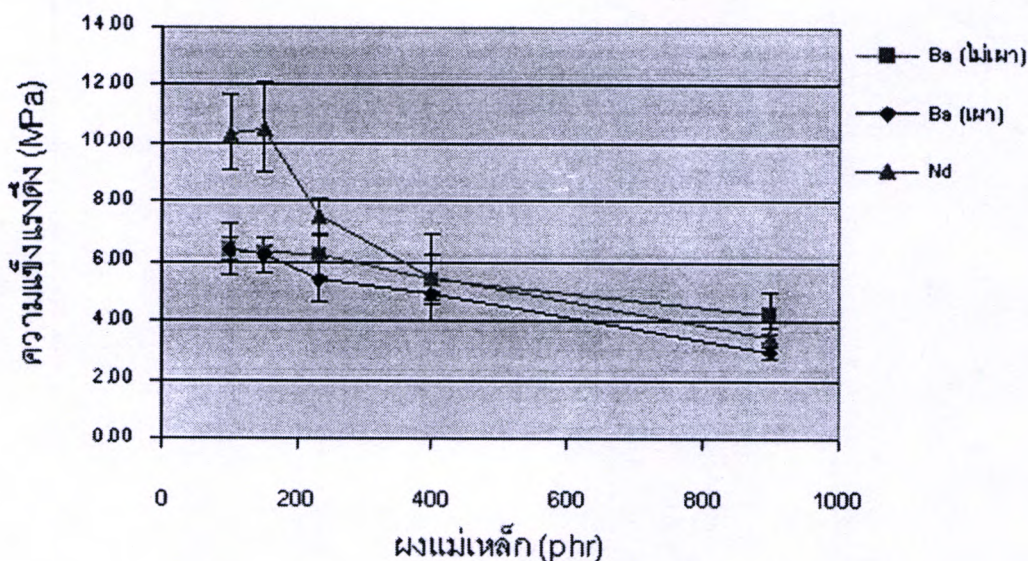
4.6 สมบัติเชิงกล

4.6.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของผงแม่เหล็กสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 เนื่องจากยางธรรมชาติทำหน้าที่เป็นเพียงตัวประสาน (Binder) ผงแม่เหล็กเท่านั้น เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับแรง และส่วนที่ยึดผงแม่เหล็กได้แก่ยางลดลง เมื่อให้แรงกระทำแก่ยางแม่เหล็กทำให้เกิดความเครียดในจุดที่รับแรง ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของยางแม่เหล็กมีค่าลดลง ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่ผ่านการเผามีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผ่านการเผา เนื่องจากการเผาผงแม่เหล็กทำให้ผงแม่เหล็กเกิดการหลอมติดกันขนาดผงแม่เหล็กจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของผงแม่เหล็กลดลง ทำให้แรงกระทำระหว่างพื้นผิวน้อยลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ส่วนยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ในช่วงที่ปริมาณผงแม่เหล็กต่ำ (100-233 phr) เนื่องจากความหนาแน่นของผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน (7.45 g/cm^3) มีค่ามากกว่าความหนาแน่นของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ (4.5 g/cm^3) ที่ปริมาณผงแม่เหล็กเท่ากัน ผงแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีปริมาตรน้อยกว่า ทำให้พื้นที่รับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

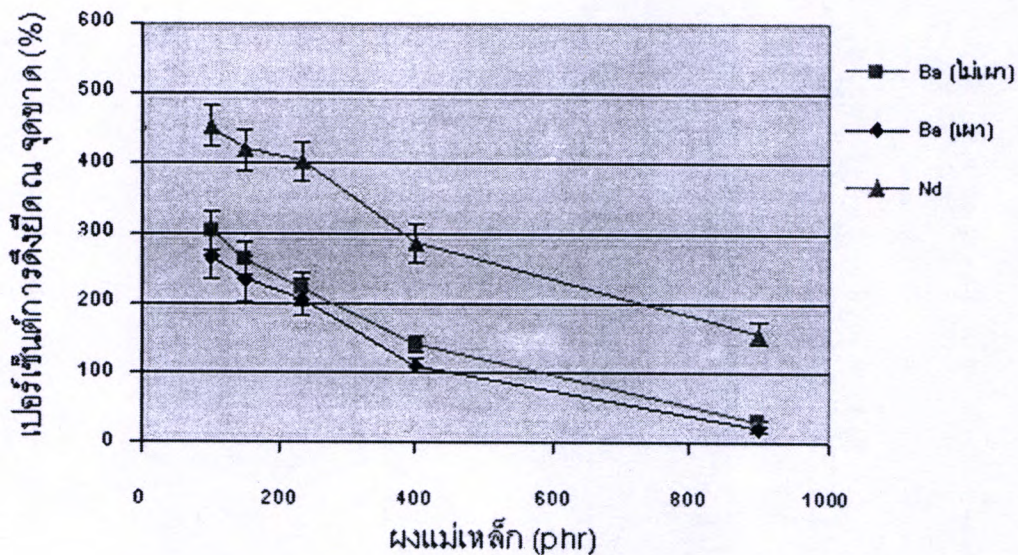
กระทำของยางมีมากกว่าค่าความแข็งแรงดึงจึงมากกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ ที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง (400-900 phr) แรงกระทำระหว่างพื้นผิวผงแม่เหล็กมีน้อยเนื่องจากผงนีโอติเมียม-ไฮรอนโบรอนมีขนาด (แสดงดังรูปที่ 4.23-4.25) ที่ใหญ่กว่าของแบเรียมเฟอร์ไรท์ [22]



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงดึง

4.6.2 เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)

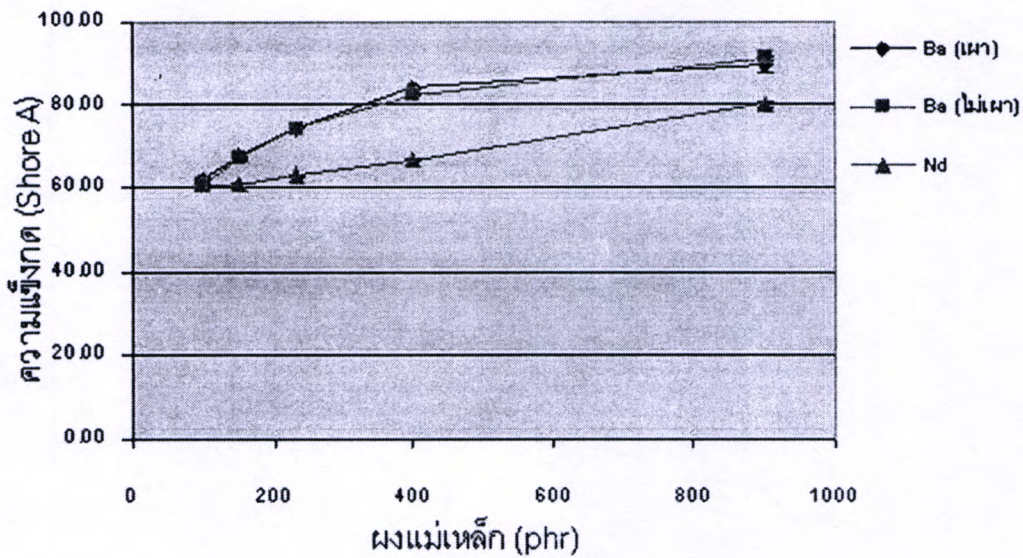
ทั้งยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไฮรอนโบรอนมีแนวโน้มค่าเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากปริมาณผงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางที่เป็นส่วนที่รับแรง ส่วนที่ส่งผ่านแรง และส่วนที่ยืดผงแม่เหล็กลดลง [9] ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีค่ามากกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา เนื่องจากการเผาทำให้ผงแม่เหล็กเกิดการหลอมติดกันจึงมีขนาดใหญ่กว่าผงที่ไม่ได้เผา ยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไฮรอนโบรอนจะมีค่าเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ด้วยเหตุผลเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.19



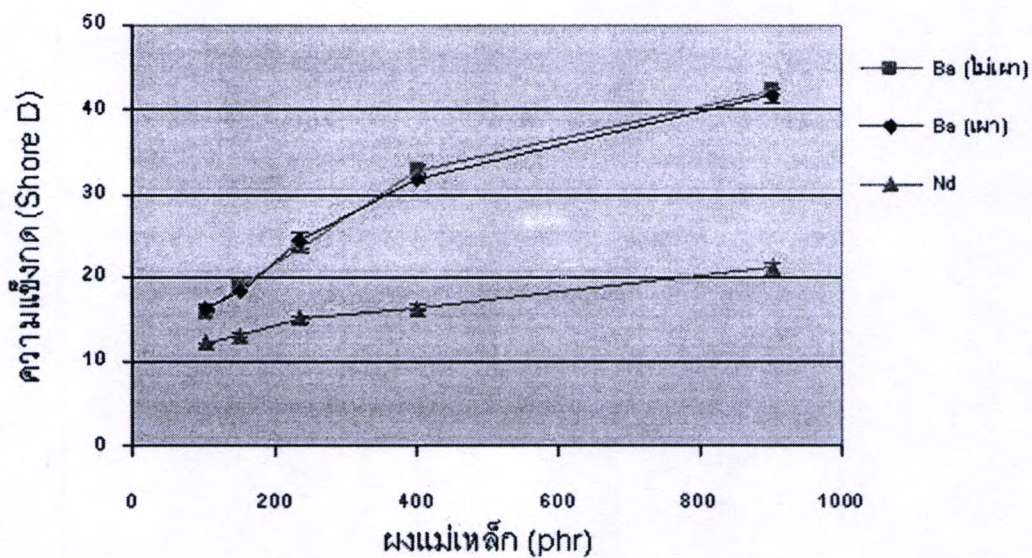
รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด

4.6.3 ความแข็งกด

ความแข็งกดเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของผิววัสดุเนื่องจากแรงกด โดยความแข็งกดของยางแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นทั้งในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน โดยค่าที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งการทดสอบแบบซอร์ A และ ซอร์ D ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 เนื่องจากผงแม่เหล็กเป็นของแข็งที่มีความแข็งสูงกว่ายาง เมื่อผสมผงแม่เหล็กในยางสูงขึ้นทำให้ส่วนที่อ่อนนุ่มได้แก่ยางมีปริมาณลดลงค่าความแข็งกดจึงสูงขึ้น ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีค่าความแข็งใกล้เคียงกับยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา ยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าความแข็งน้อยกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ เนื่องจากผงนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีความหนาแน่นมากกว่าทำให้มีปริมาตรผงแม่เหล็กต่ำกว่า ส่วนที่อ่อนนุ่มได้แก่ยางจึงมีมากกว่า



รูปที่ 4.20 ความแข็งกต (Shore A) ของยางแม่เหล็ก

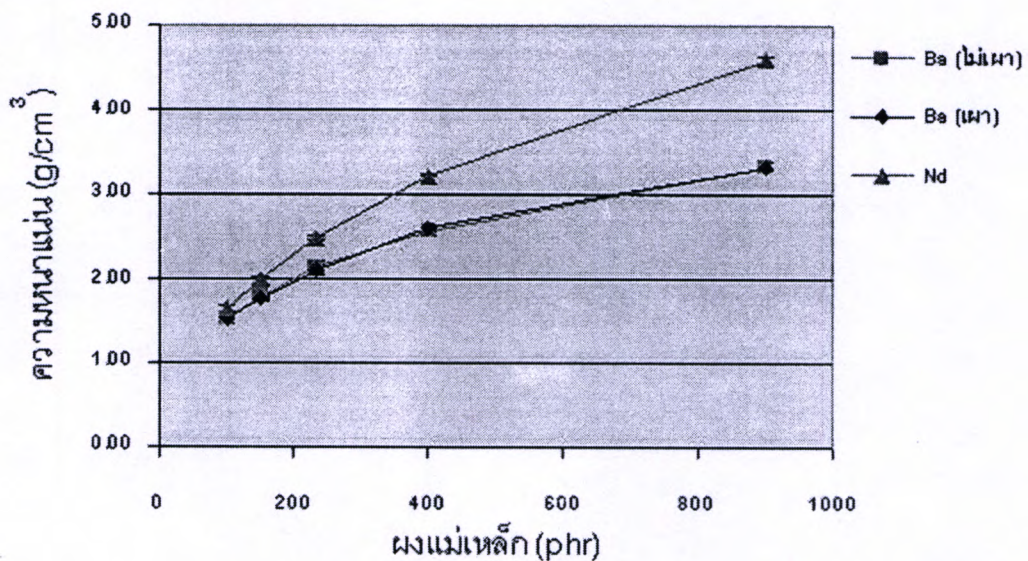


รูปที่ 4.21 ความแข็งกต (Shore D) ของยางแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของยางแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ทั้งในยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา และยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน เนื่องจากความหนาแน่นของผงแม่เหล็กมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ เมื่อปริมาณผงแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของยางผสมมีค่าสูงขึ้น ผงแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน (7.45 g/cm^3) มีความหนาแน่นสูงกว่าผงแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ (4.5 g/cm^3) ทำให้ยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอนมีความหนาแน่นมากกว่ายางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีค่าเท่ากับยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา เนื่องจากผงแม่เหล็กมีความหนาแน่นเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22



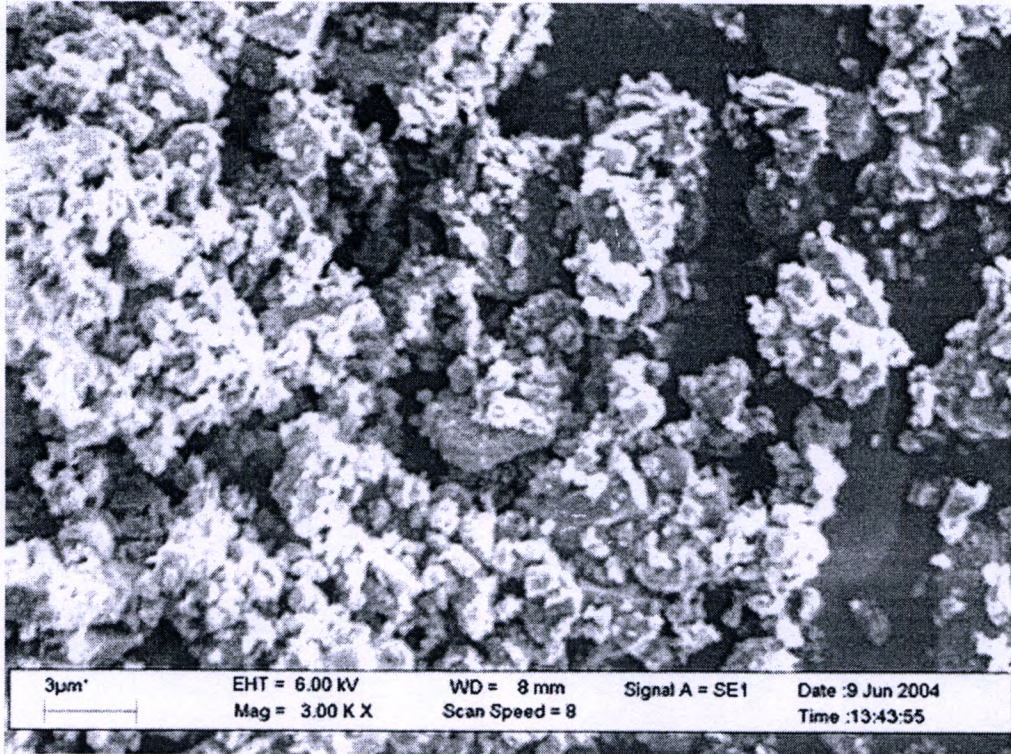
รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของยางแม่เหล็ก

4.7 สันฐานวิทยาของยางแม่เหล็ก

จากการศึกษาสันฐานวิทยาของผงแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา ผงแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน และยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ที่เผา ยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอนพบว่าผงแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา ($1.50-15.00 \mu\text{m}$) มีขนาดใหญ่กว่า ผงแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา ($0.25-4.00 \mu\text{m}$) เนื่องจากการเผาทำให้ผงแม่เหล็กเกิดการหลอมติดกัน โดยผงแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน ($30-120 \mu\text{m}$) มีขนาดใหญ่ที่สุด และจะเห็นได้ว่าผงแบบเรียมเฟอร์ไรท์ทั้งที่ไม่เผา และที่เผามีลักษณะของผงที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีการ

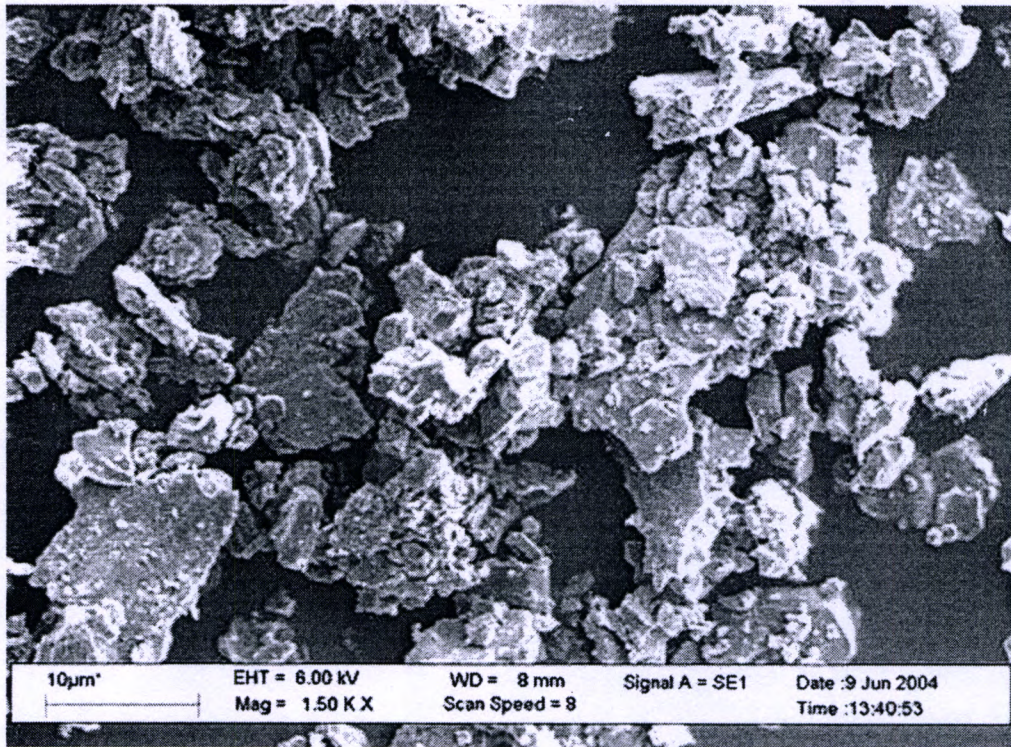
กระจายขนาดผงแม่เหล็กสูง โดยผงมีลักษณะเป็นแผ่นของโครงผลึกเรียงซ้อนเป็นชั้น ดังแสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.23-4.25 ในยางแม่เหล็กทั้งสามชนิดพบว่าที่ปริมาณผงแม่เหล็กต่ำ ๆ ผงแม่เหล็กมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีการเกาะกลุ่มของผงแม่เหล็ก โดยเฉพาะยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา ที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ ยางแม่เหล็กทั้งสามชนิดมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอว่าทั้งนี้เนื่องจากปริมาณผงแม่เหล็กที่สูง โดยในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผาจะมีผงแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นแผ่นผสมอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากในการผสมยางแม่เหล็กที่มีปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ จะทำให้เกิดแรงเฉือนที่สูงทำให้ชั้นของโครงผลึกแบเรียมเฟอร์ไรท์แยกออกจากกันเป็นแผ่น

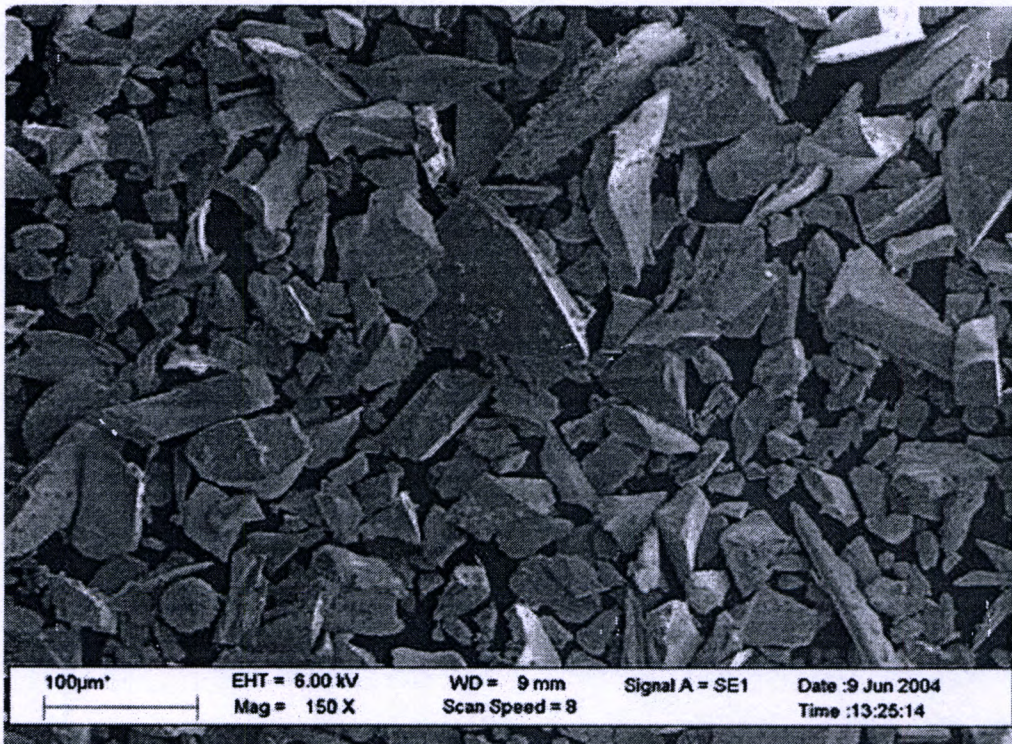


รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

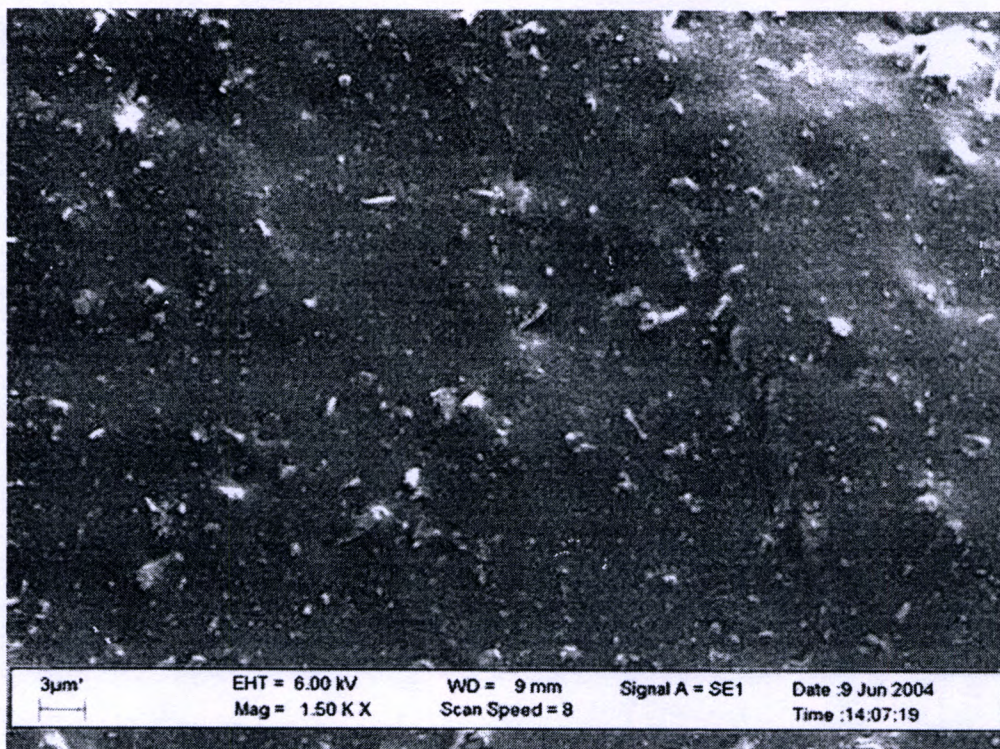


รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา

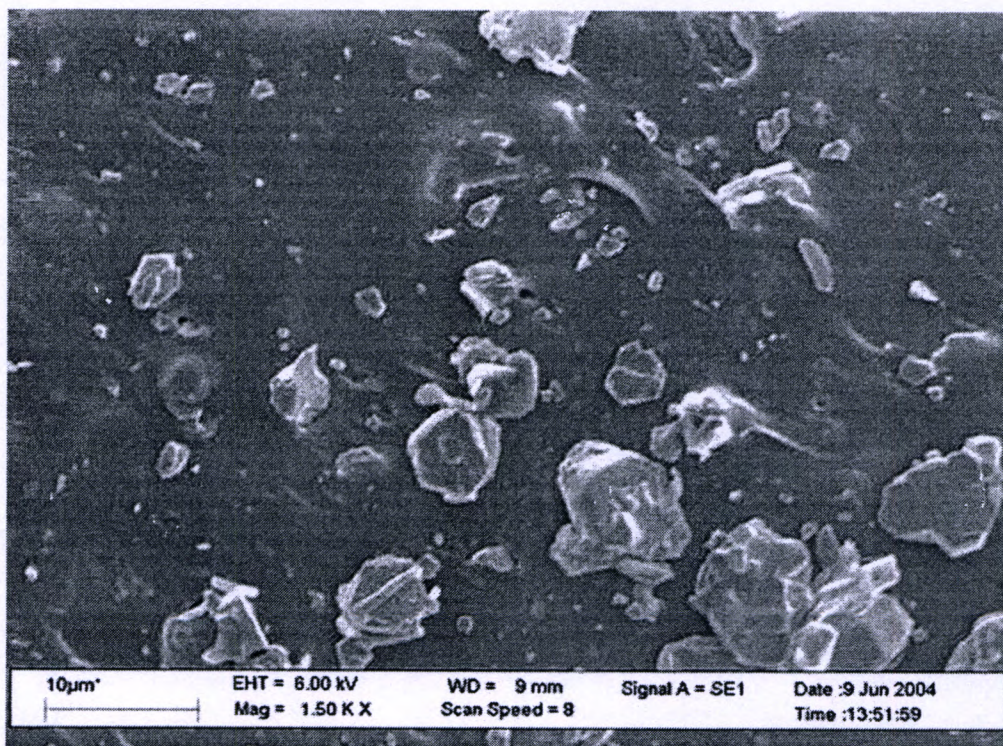


รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

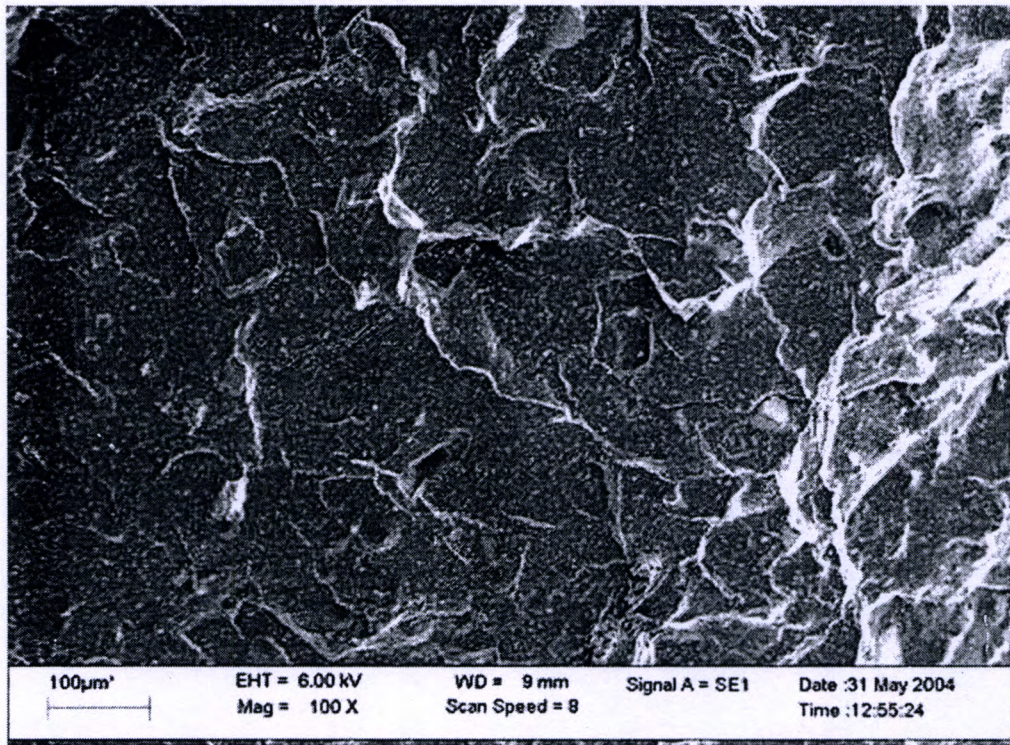


รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ที่ไม่เผา 100 phr

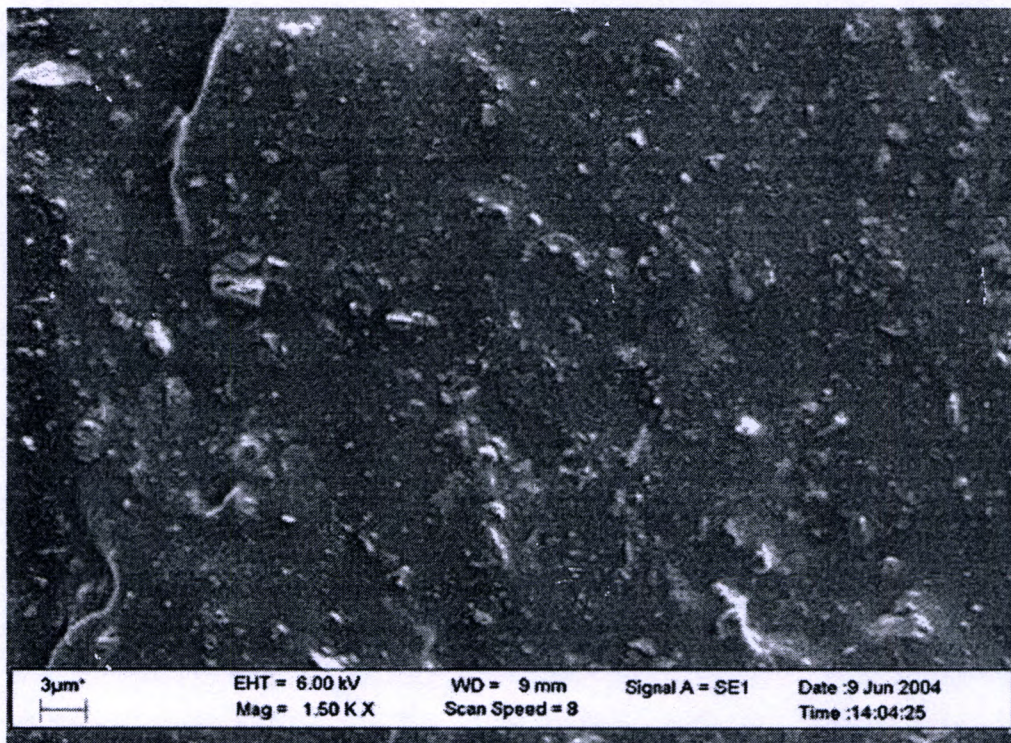


รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ที่เผา 100 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

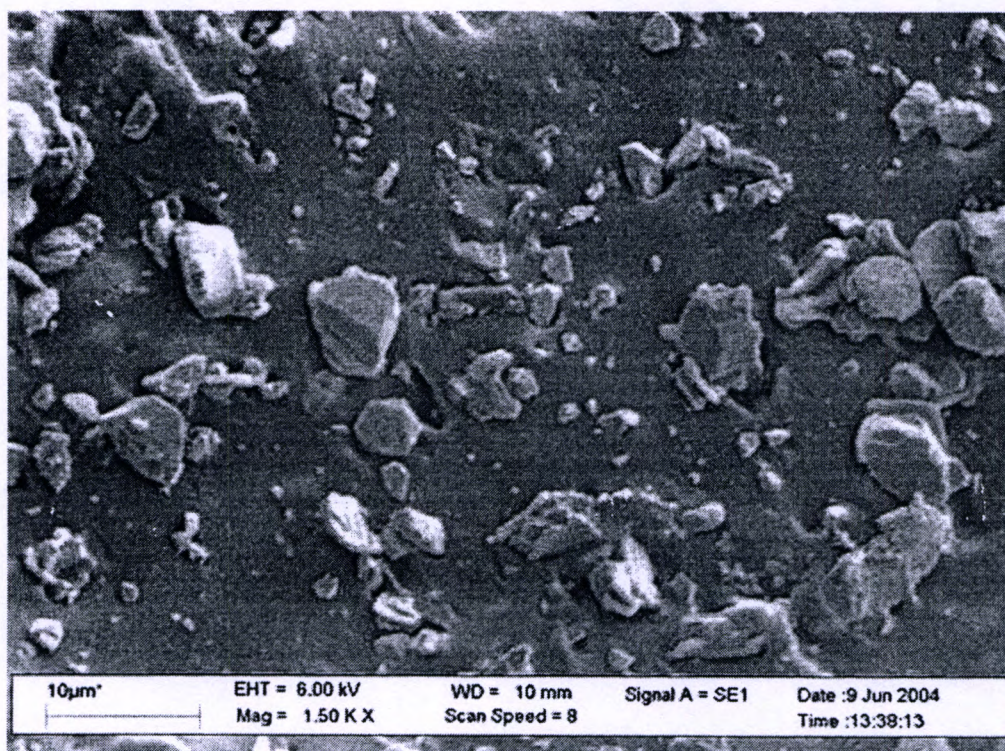


รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอน 100 phr

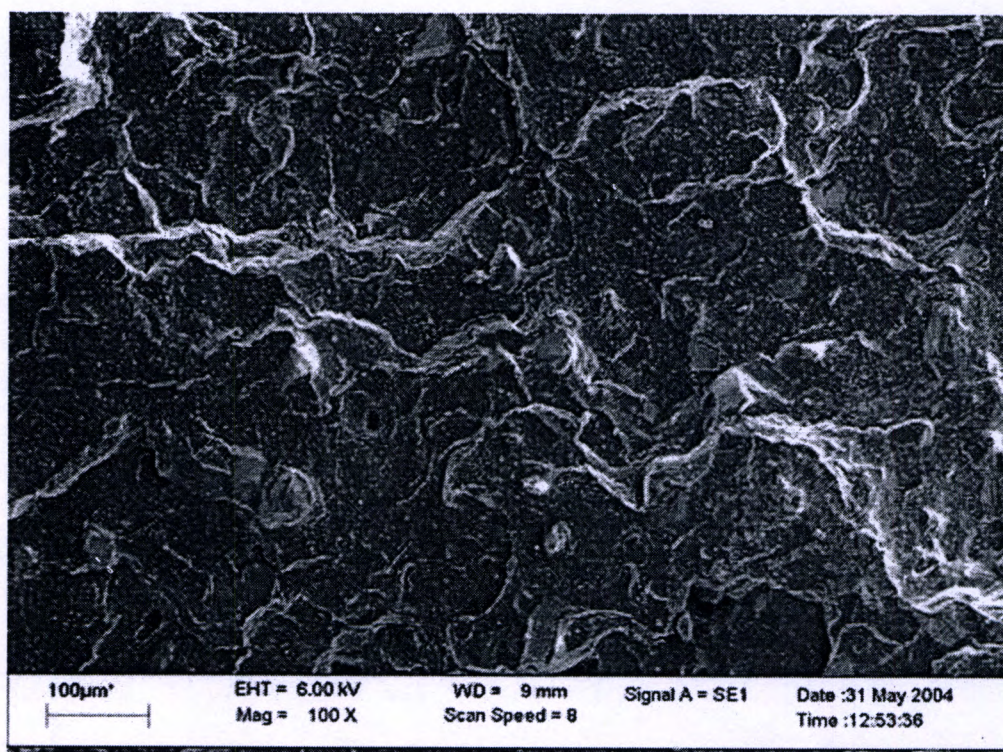


รูปที่ 4.29 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอโรไรท์ที่ไม่เผา 150 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

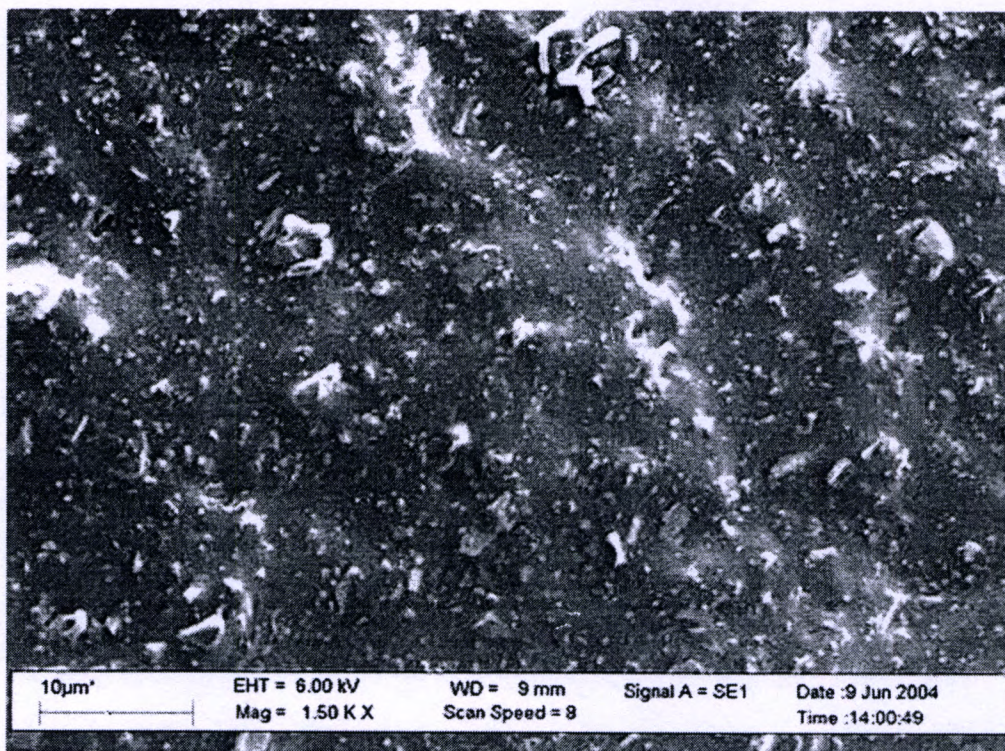


รูปที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 150 phr

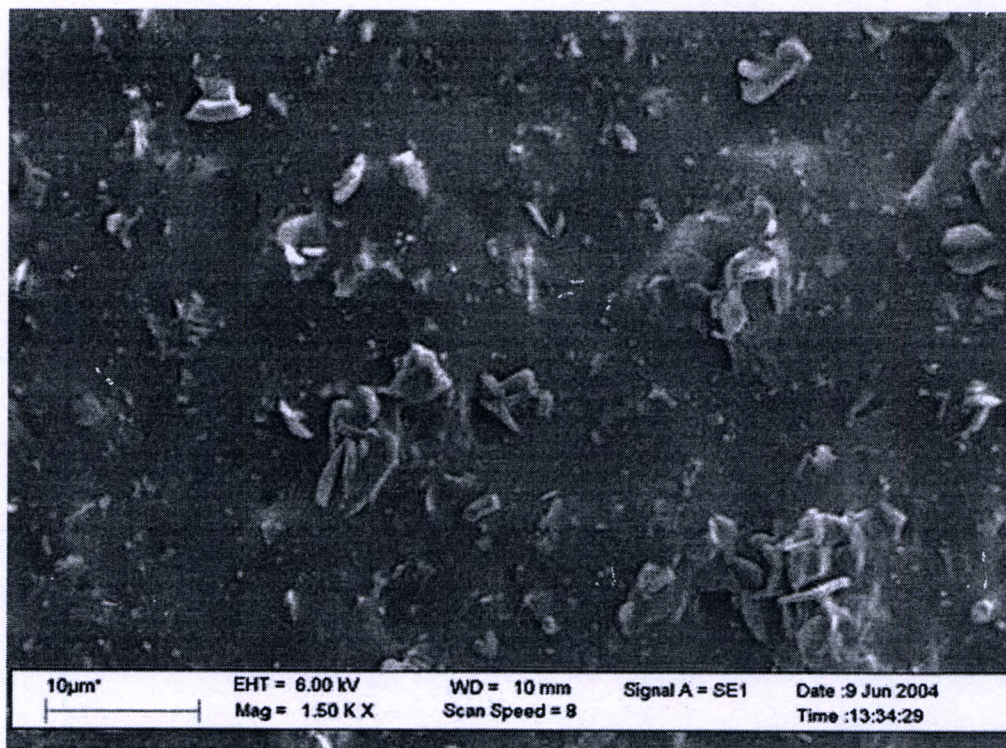


รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กนิโอดีเมียมไอออนโบรอน 150 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

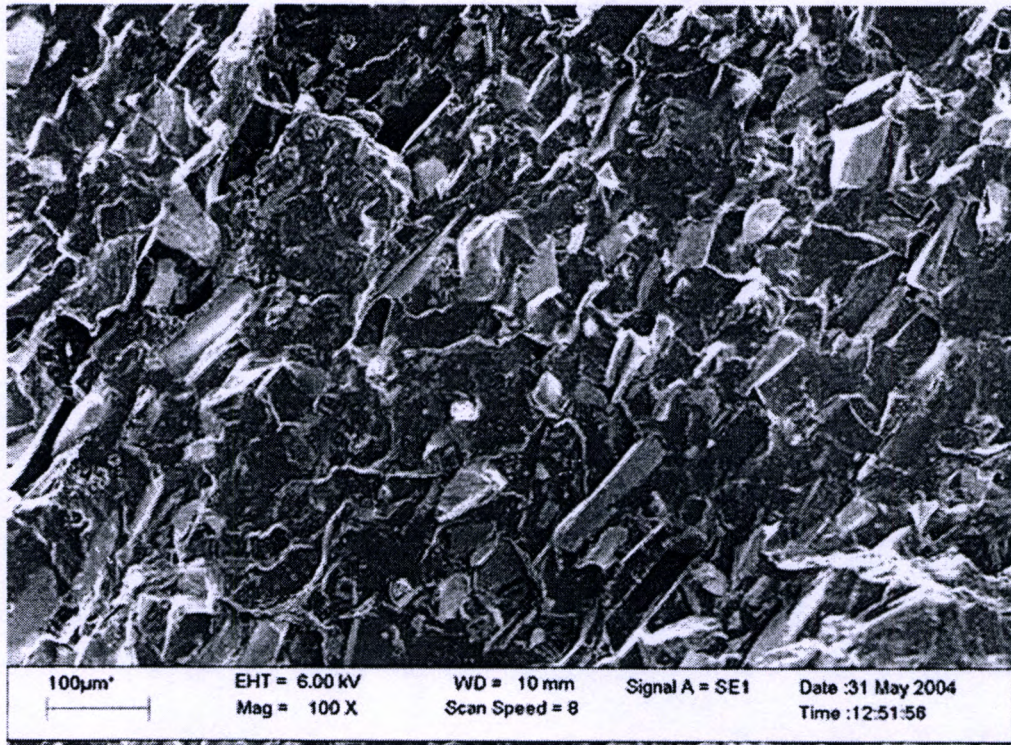


รูปที่ 4.32 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ที่ไม่เผา 233 phr

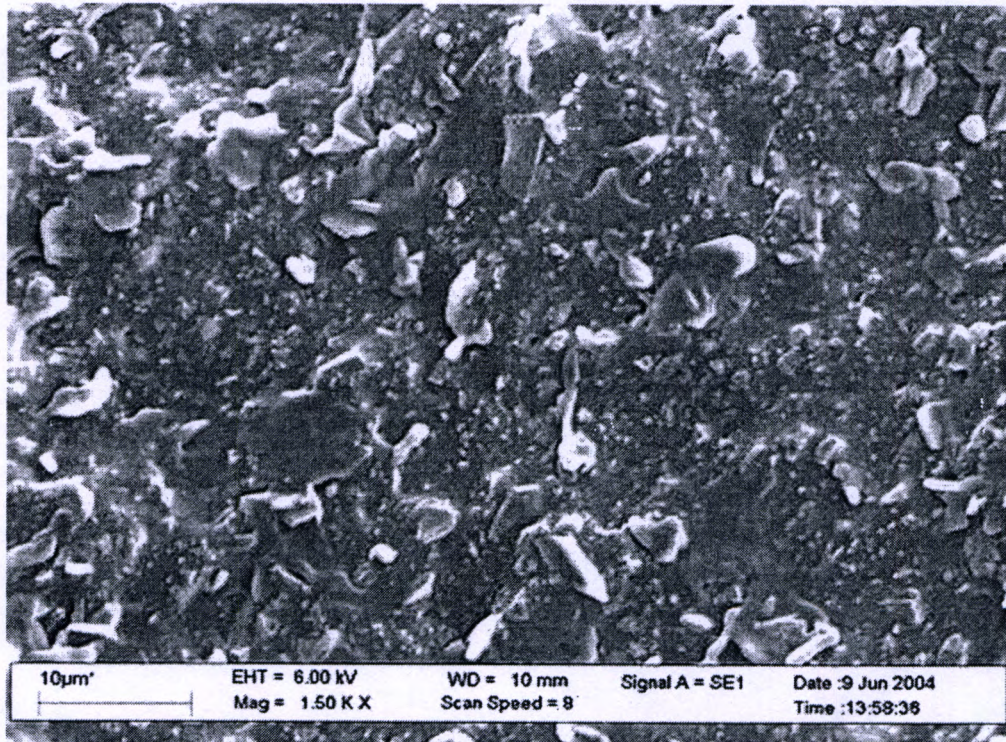


รูปที่ 4.33 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอไรท์ที่เผา 233 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

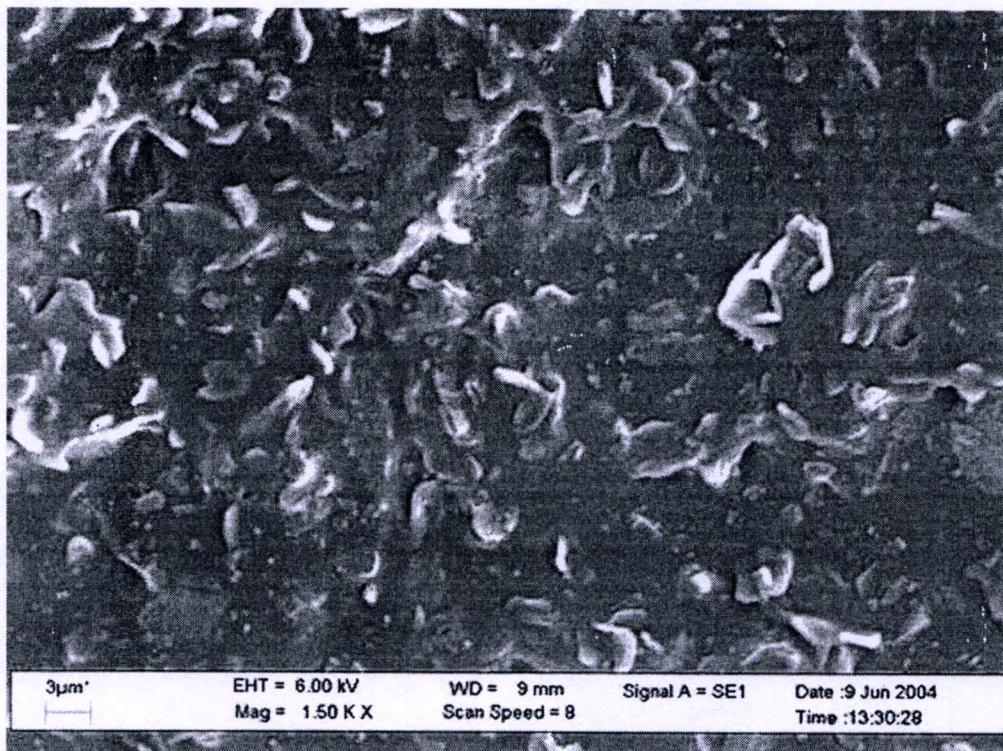


รูปที่ 4.34 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กนิโอติเมียมไอรอนโบรอน 233 phr

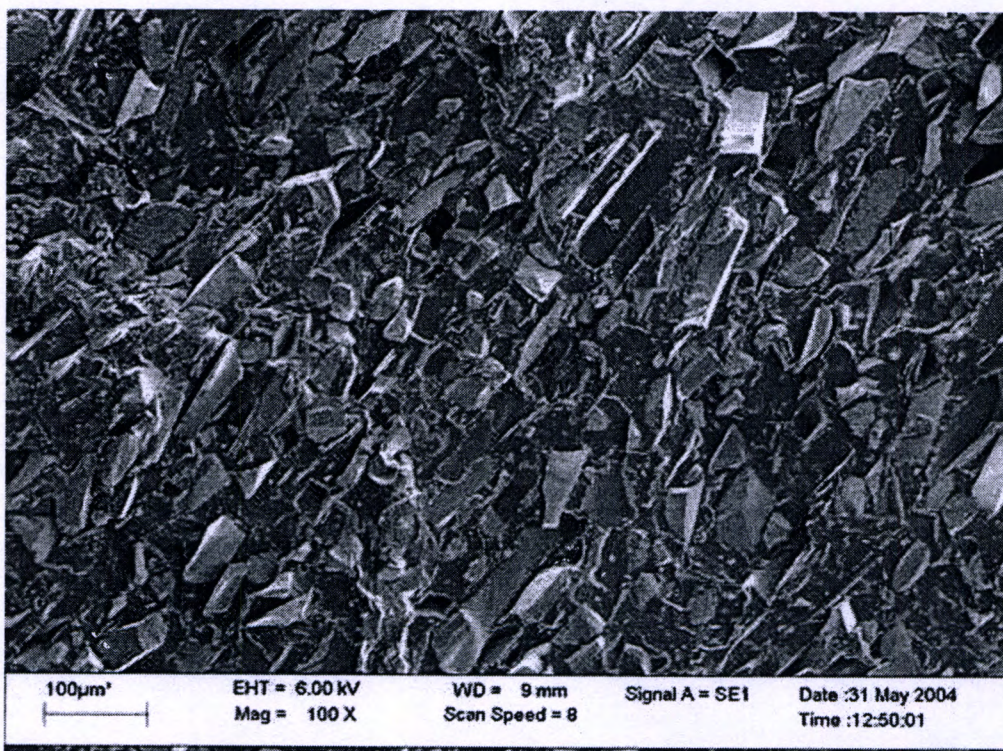


รูปที่ 4.35 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา 400 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

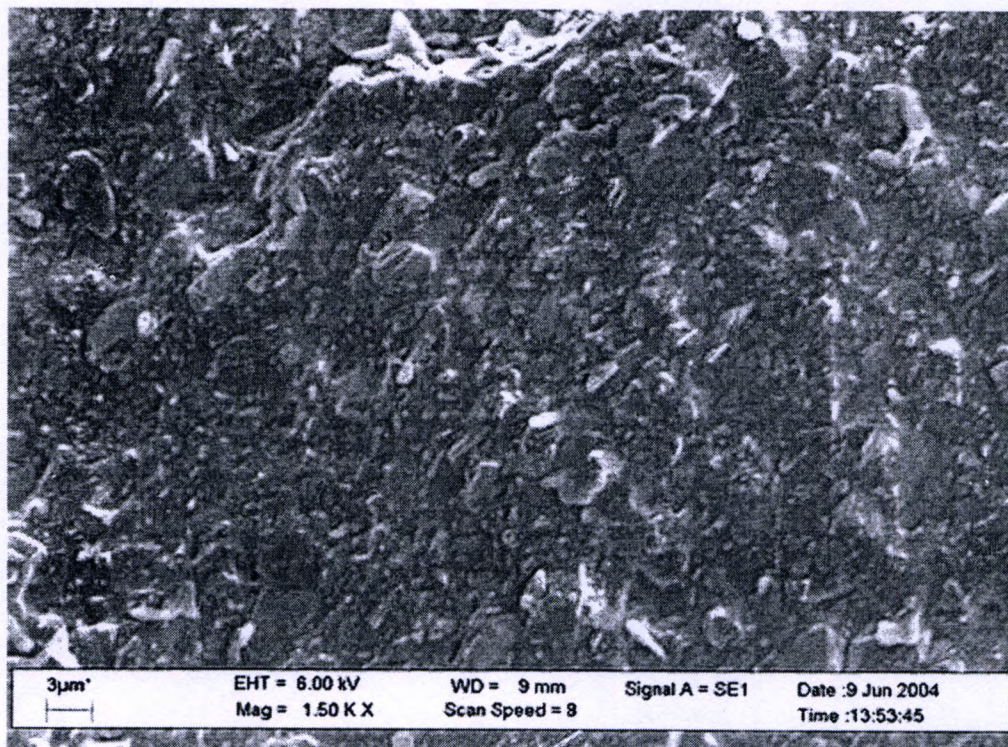


รูปที่ 4.36 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา 400 phr

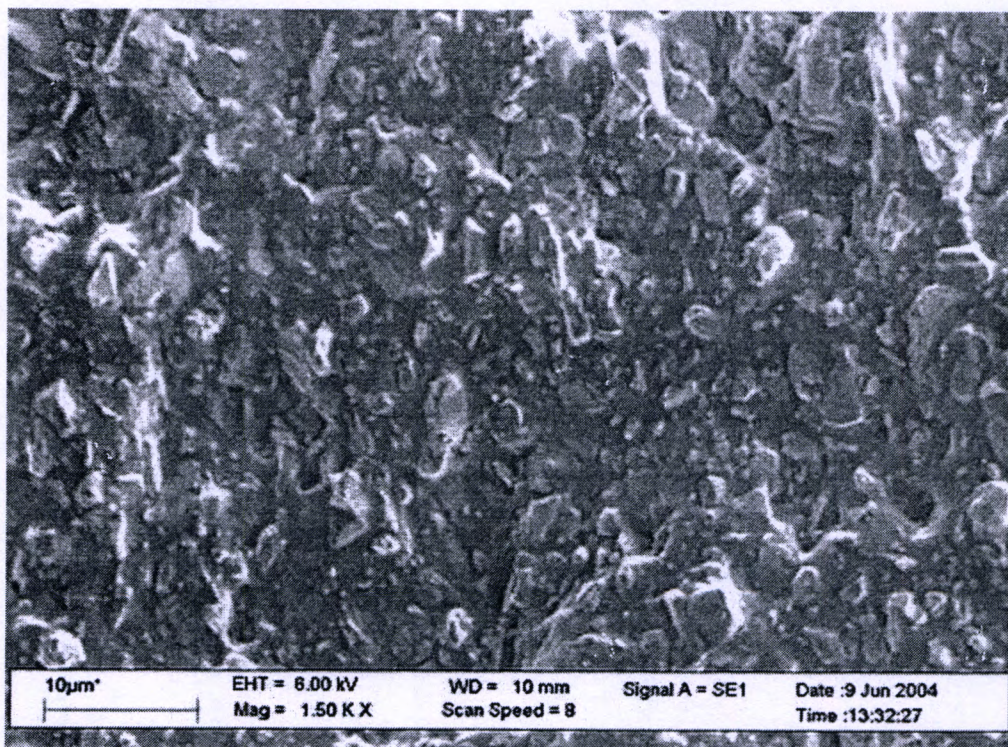


รูปที่ 4.37 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กนิโอติเมียมไอรอนโบรอน 400 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

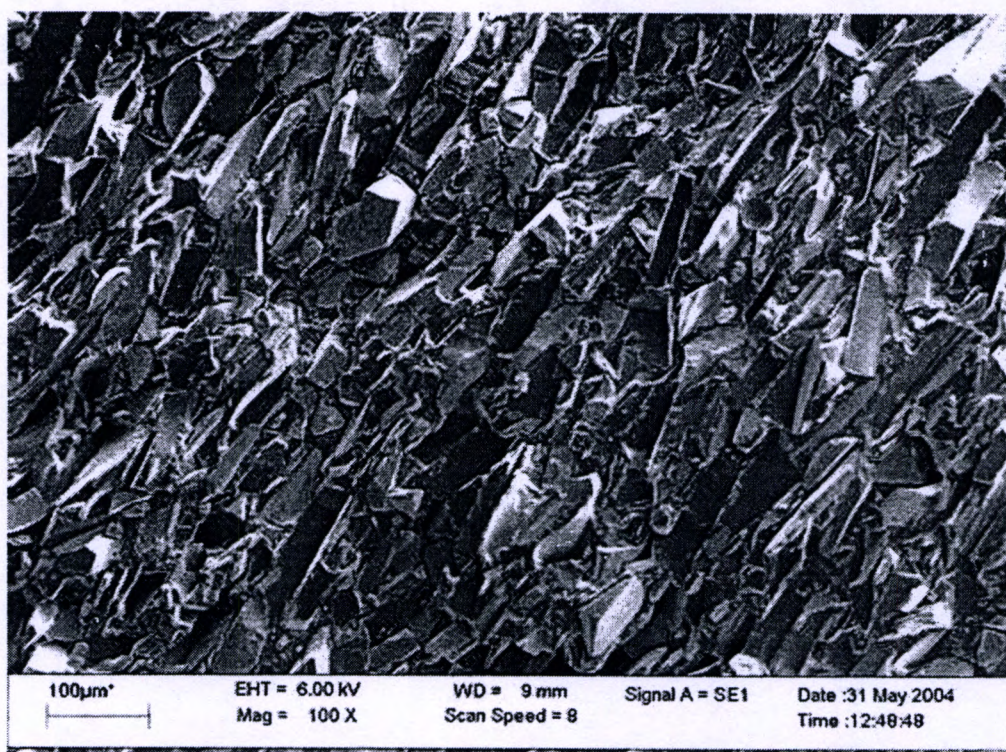


รูปที่ 4.38 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เฝ้า 900 phr



รูปที่ 4.39 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เฝ้า 900 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 สัณฐานวิทยาของยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน 900 phr

4.8 เปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กทางการค้า [1-7, 33-38]

สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กขึ้นกับปริมาณ และคุณภาพของผงแม่เหล็กที่ใช้ในการผสมโดยตรง กล่าวคือถ้าใช้ผงแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูงยางแม่เหล็กที่ได้มีสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีถึงแม้ใช้ผงแม่เหล็กในปริมาณต่ำ ๆ ทำให้สมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กดีตามไปด้วย แต่ถ้าใช้ผงแม่เหล็กที่มีคุณภาพต่ำต้องใช้ผงแม่เหล็กปริมาณสูงถึงได้ยางแม่เหล็กที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี แต่สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นยางแม่เหล็กในทางการค้าจึงมีสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลในช่วงกว้าง เนื่องจากใช้ผงแม่เหล็กที่มีคุณภาพ และปริมาณที่แตกต่างกันออกไปในการผลิต ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กทางการค้า กับยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ และยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนจากการทดลอง โดยในกลุ่มยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์จากการทดลอง ทั้งชนิดที่ไม่เผา ชนิดที่เผา ชนิดไอโซโทรปิก และชนิดแอนไอโซโทรปิกเลือกค่าที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบ โดยแสดงการเปรียบเทียบยางแม่เหล็กที่อัตราส่วนผสม 100 และ 900 phr ในส่วนของยางแม่เหล็กทางการค้าใช้ยางแม่เหล็กสำหรับอุปกรณ์สำนักงาน [6,34] ไมโครมอเตอร์ [6,34] เครื่องใช้ในบ้าน [6,34] และยางแม่เหล็กทั่วไปในการเปรียบเทียบ [1-7,33-38]

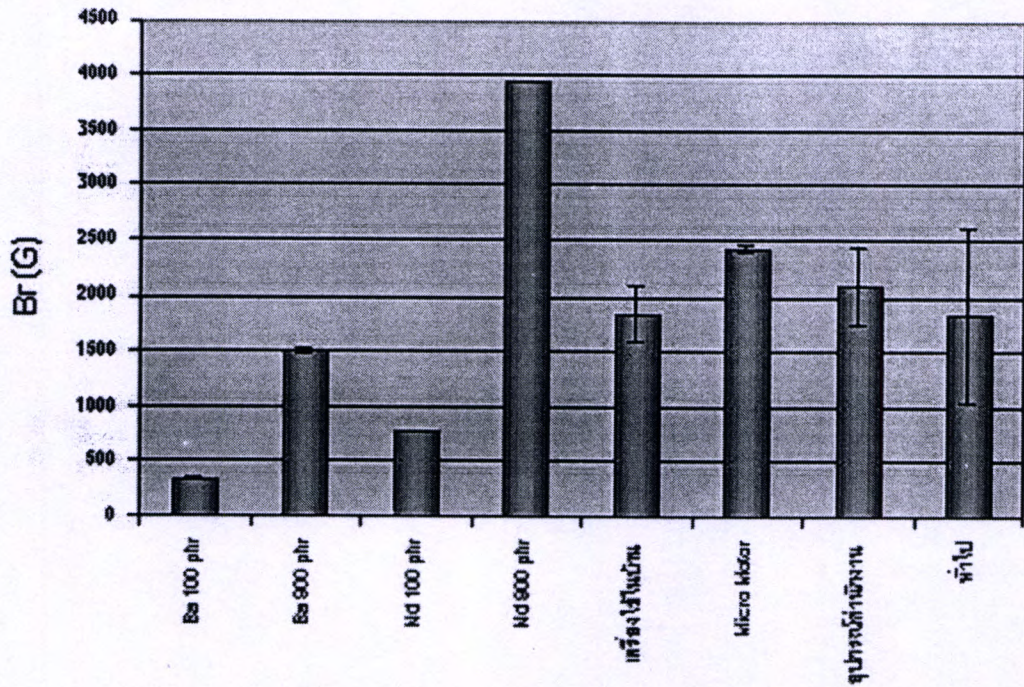
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางแม่เหล็กของผงแม่เหล็กในการทดลอง และทางการค้า [5,39-40]

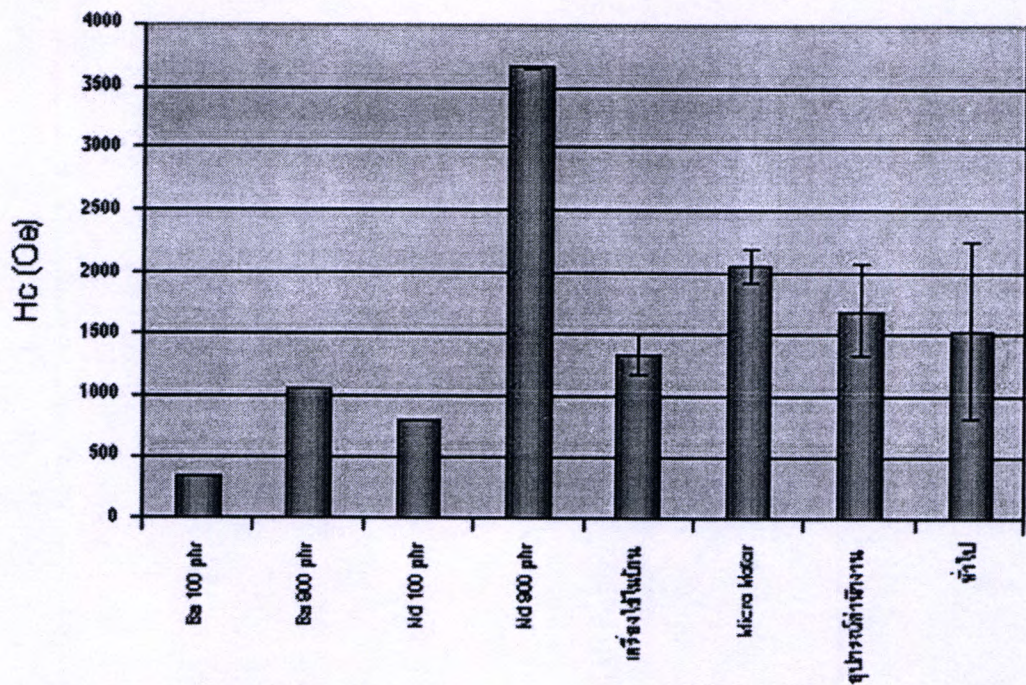
ผงแม่เหล็ก	B_r (G)	H_c (Oe)	H_{ci} (Oe)	BH_{max} (MGOe)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
Ba ไม่เผา	1,349	946	1,395	0.368	4.50
Ba เผา	1,218	780	1,321	0.282	4.50
Nd	7,510	5,560	12,200	10.50	7.45
ทางการค้า	2,000-4,300	1,600-2,900	1,700-4,200	0.7-4.4	4.5-5.4

4.8.1 สมบัติทางแม่เหล็ก

ยางแม่เหล็กแบบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผลิตได้มีค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (245.6-1494.5 G) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก (240.7-1048.5 Oe) แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน (1641-1490.5 Oe) และพลังงานสูงสุดของแม่เหล็ก (0.0126-0.4375 MGOe) ไม่ดีเท่ายางแม่เหล็กทางการค้าทั่วไป (สนามแม่เหล็กตกค้างเท่ากับ 1650-2600 G แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กเท่ากับ 1125-2000 Oe แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน เท่ากับ 1500-3800 Oe และพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กเท่ากับ 0.4-1.6 MGOe) เนื่องจากผงแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองมีสมบัติทางแม่เหล็กไม่ดีเท่าผงแบบเรียมเฟอร์ไรท์ทางการค้า และในการทดลองได้ทำการศึกษาในอัตราส่วนปริมาณผงแม่เหล็กต่ำ ๆ (100 150 และ 233 phr) ผลการทดลองที่ได้จึงมีค่าต่ำ ส่วนยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์โบรอนมีค่าสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงกว่ายางแม่เหล็กทางการค้า เนื่องจากผงแม่เหล็กที่ใช้มีสมบัติที่สูงกว่ามาก โดยแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็กของยางแม่เหล็กที่ใช้ในบ้าน เครื่องใช้สำนักงาน มอเตอร์ และยางแม่เหล็กทั่ว ๆ ไป ดังแสดงในรูปที่ 4.41-4.44

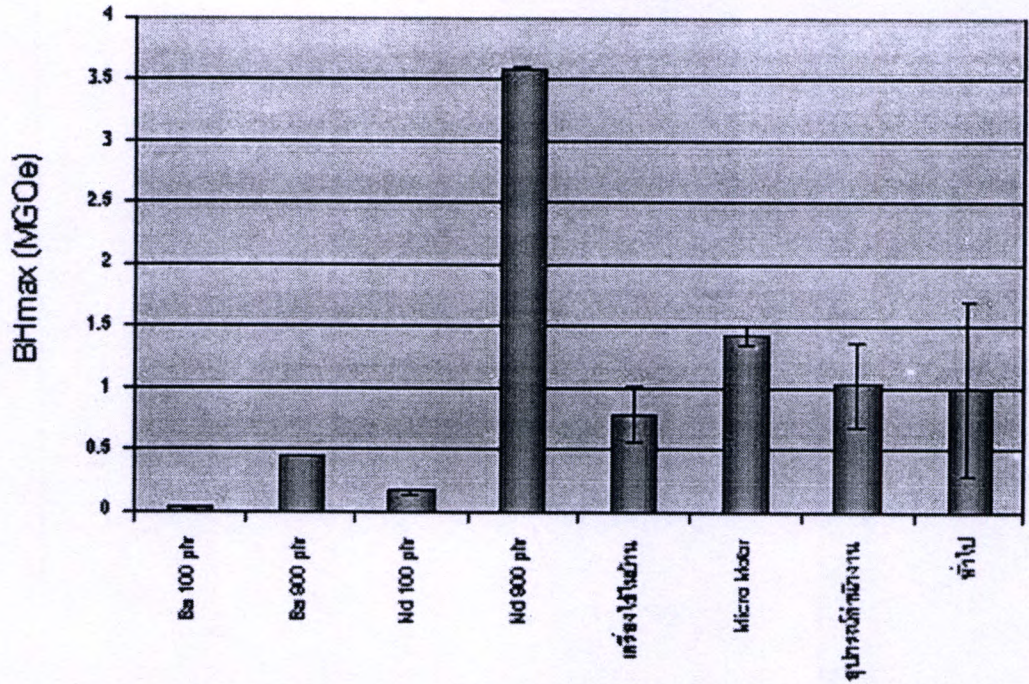


รูปที่ 4.41 สนามแม่เหล็กตกค้างของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

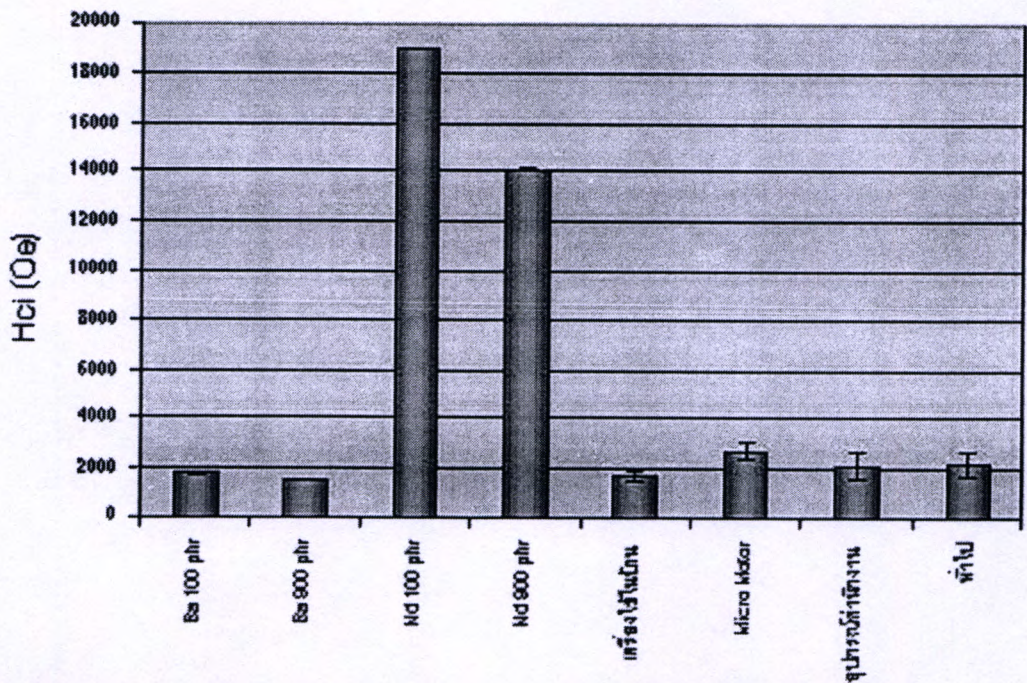


รูปที่ 4.42 แรงลบไล่งสภาพแม่เหล็กของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 พลังงานสูงสุดของแม่เหล็กของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

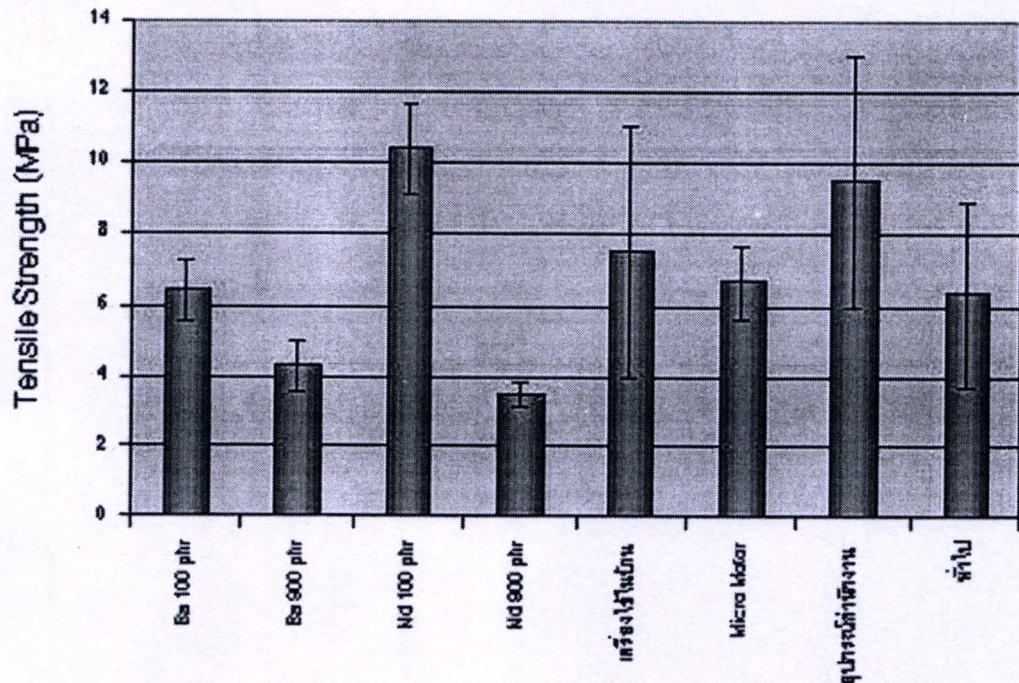


รูปที่ 4.44 แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

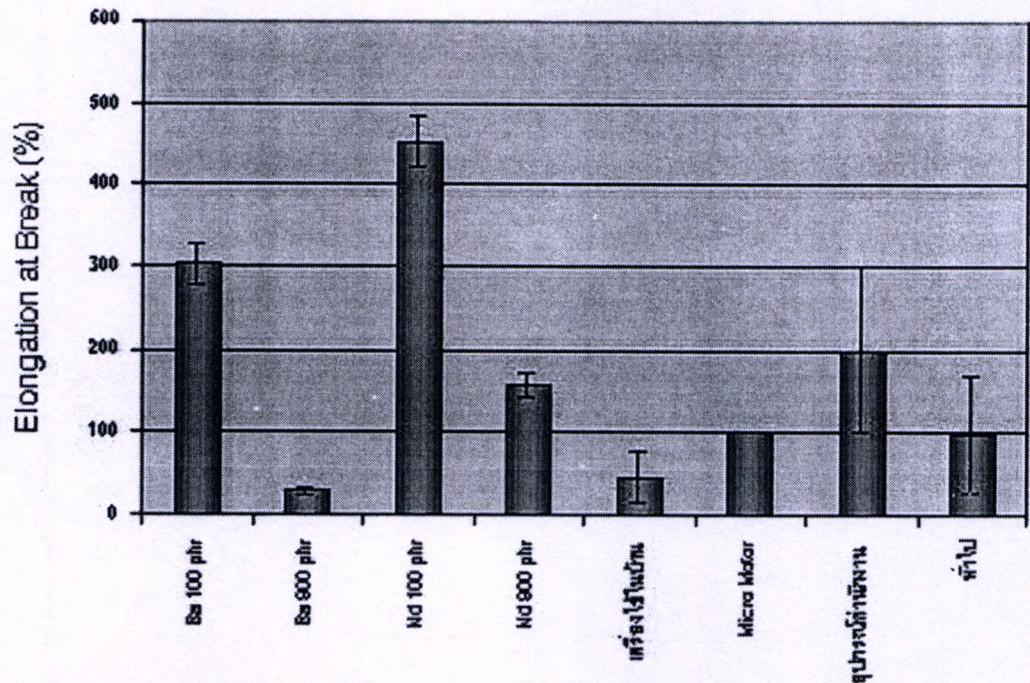
4.8.2 สมบัติเชิงกล

ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ผลิตได้มีความแข็งแรงดึง (4.306-7.372 MPa) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (20-380 %) ใกล้เคียงกับยางแม่เหล็กทางการค้า (ความแข็งแรงดึงเท่ากับ 2.0-9.65 MPa เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 18-165 เปอร์เซ็นต์) แต่ความแข็งแรง และความหนาแน่นต่ำกว่ายางแม่เหล็กทางการค้า (การทดลองมีความแข็งแรง 15.9-41.95 ความหนาแน่น 1.53-3.34 g/cm³ ทางการค้ามีความแข็งแรง 30-60 ความหนาแน่น 3.6-3.8) ส่วนยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีความแข็งแรงดึง (3.478-7.10.566 MPa) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (156-455%) สูงกว่ายางแม่เหล็กทางการค้า แต่ความแข็งแรง และความหนาแน่นต่ำกว่ายางแม่เหล็กทางการค้า (ความแข็งแรง 12.5-21.2 ความหนาแน่น 1.65-4.6 g/cm³) โดยแสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในรูปที่ 4.45 – 4.48

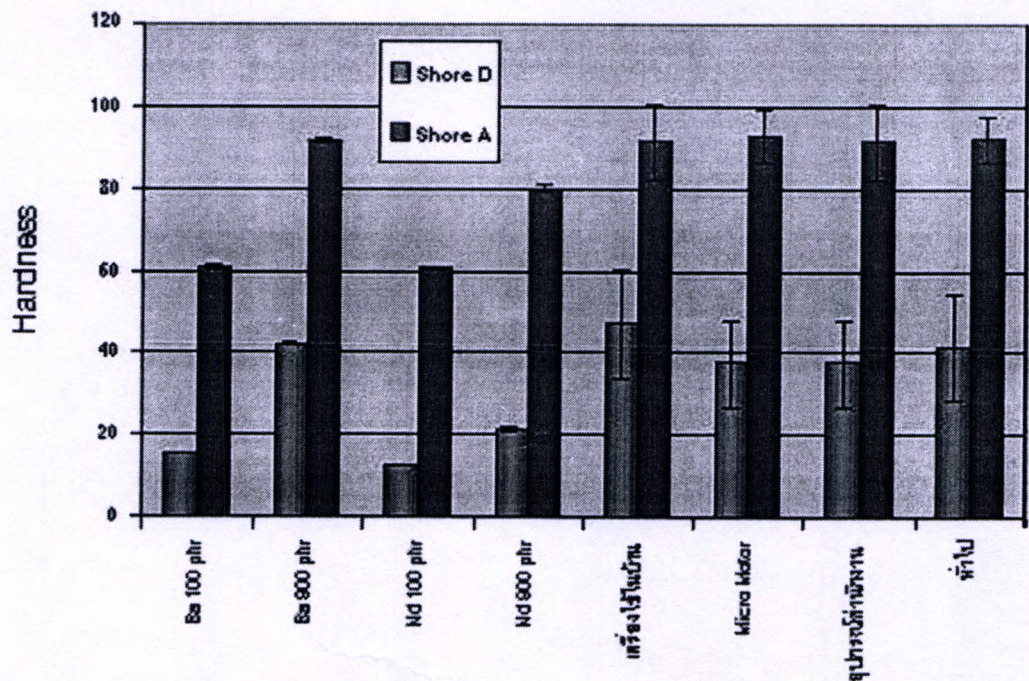


รูปที่ 4.45 ความแข็งแรงดึงของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

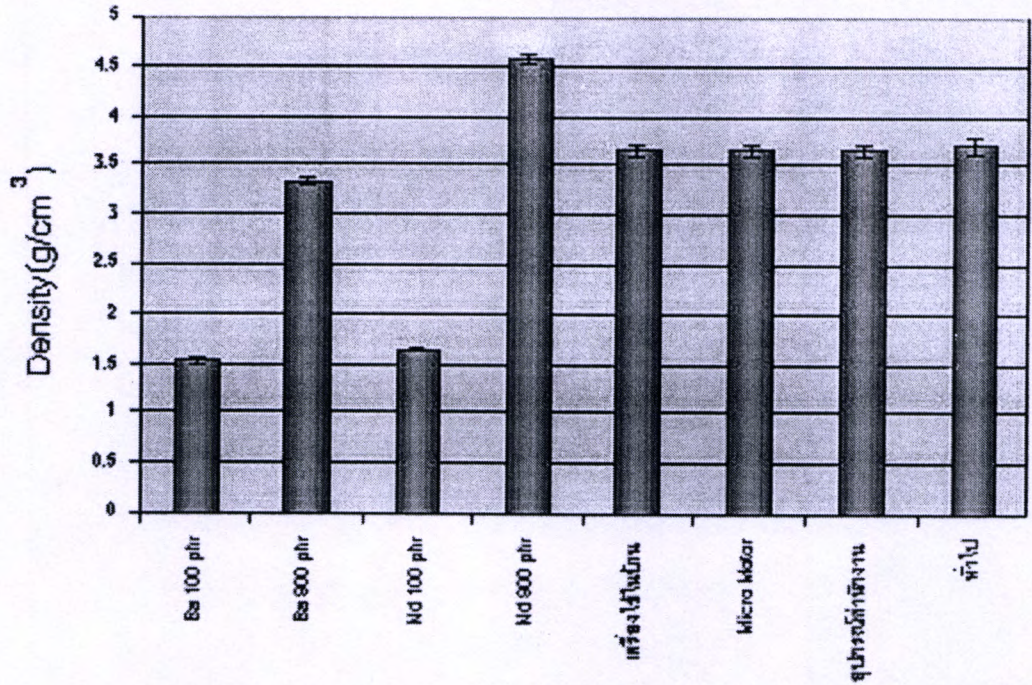


รูปที่ 4.46 เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.47 ความแข็งกดของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 ความหนาแน่นของยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ความเป็นไปได้ในการผลิตยางแม่เหล็กจากยางธรรมชาติ ด้วยผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ ชนิดที่ไม่เผา และชนิดที่เผา ผงแม่เหล็กนี้โอดีเมียมไอรอนโบรอน โดยใช้ยางแม่เหล็กชนิดแอนไอโซโทรปิกในอัตราส่วนต่าง ๆ กันแล้วศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กทางการค้าสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ขนาดผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีขนาดเล็กกว่าผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผา
2. เวลาในการบ่มตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น
3. ความหนืดแบบมูนนี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น
4. โครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของ XRD pattern อย่างเห็นได้ชัด
5. สมบัติทางแม่เหล็ก

5.1 สนามแม่เหล็กคงค้าง

สนามแม่เหล็กคงค้างในยางแม่เหล็กทุกชนิดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณผงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยยางแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ให้สนามแม่เหล็กคงค้างมีสัดส่วนที่แตกต่างกันดังนี้

Ba เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Aniso) < Ba เผา (Aniso) << Nd

กล่าวคือ

- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีค่าต่ำกว่าที่ไม่เผา 8-22 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 22-52 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก 42-101 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก 1-21 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แรงลบล้างสภาพแม่เหล็ก

แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กในยางแม่เหล็กทุกชนิดเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ผลที่ได้เป็นดังนี้

Ba เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Iso) < Ba เผา (Aniso) < Ba ไม่เผา (Aniso) << Nd

กล่าวคือ

- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีค่าต่ำกว่าที่ไม่เผา 9–33 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 24–56 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 35–124 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก 1–11 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าสูงที่สุด

5.3 แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายใน

แรงลบล้างสภาพแม่เหล็กภายในของยางแม่เหล็กทุกชนิดลดลงเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มคงที่ที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ ผลที่ได้เป็นดังนี้

Ba เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Iso) < Ba เผา (Aniso) < Ba ไม่เผา (Aniso) << Nd

กล่าวคือ

- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีค่าต่ำกว่าที่ไม่เผา 0-14 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 3–15 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 11–21 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก 10–15 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กนีโอดีเมียมไอรอนโบรอนมีค่าสูงที่สุด

5.4 พลังงานสูงสุดของผลิตภัณฑ์

พลังงานสูงสุดของผลิตภัณฑ์ในยางแม่เหล็กทุกชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งผลที่ได้เป็นดังนี้

Ba เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Iso) < Ba ไม่เผา (Aniso) < Ba เผา (Aniso) << Nd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ

- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีค่าสูงกว่าที่เผา 1-30 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดไอโซโทรปิก 54-384 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดไอโซโทรปิก 140-598 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิกมีค่าต่ำกว่ายางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผาชนิดแอนไอโซโทรปิก 7-39 เปอร์เซ็นต์
- ยางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมีค่าสูงที่สุด

6. สมบัติเชิงกล

6.1 ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นในทุก ๆ ชนิดผงแม่เหล็กโดยผลที่ได้เป็นดังนี้

$$Ba \text{ เผา} < Ba \text{ ไม่เผา} < Nd$$

6.2 ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นในทุก ๆ ชนิดผงแม่เหล็กโดยผลที่ได้เป็นดังนี้

$$Nd < Ba \text{ เผา} < Ba \text{ ไม่เผา}$$

6.3 ความหนาแน่น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงแม่เหล็กสูงขึ้นในทุก ๆ ชนิดผงแม่เหล็กโดยผลที่ได้เป็นดังนี้

$$Ba \text{ เผา} < Ba \text{ ไม่เผา} < Nd$$

7. สัณฐานวิทยา

7.1 ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผามีลักษณะผงเป็นแผ่นเรียงเป็นชั้น

7.2 ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผามีขนาดประมาณ 0.25-4.00 μm ผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่เผามีขนาดประมาณ 1.50-15.00 μm ผงนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมีขนาดประมาณ 30-150 μm

7.3 ผงแม่เหล็กในยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่ไม่เผา และที่เผา ที่อัตราส่วนผสม 233-900 phr มีการแตกออกเป็นแผ่นเนื่องจากแรงเฉือนในการผสม

8. การเปรียบเทียบกับยางแม่เหล็กทางการค้า

8.1 สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์มีค่าอยู่ในช่วงการใช้งานของยางแม่เหล็กทางการค้า แต่ค่าที่ได้ยังต่ำอยู่

8.2 สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลของยางแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอนมี

ค่าสูงกว่ายางแม่เหล็กทางการค้ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางแม่เหล็กที่ผลิตได้มีค่าสมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลในช่วงกว้าง มีค่าต่ำ จนถึงค่าสูง ทำให้เหมาะสมในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน เช่น ยางขอบประตูตู้เย็นที่ไม่ต้องการสมบัติทางแม่เหล็กที่สูง แต่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีจึงเหมาะสมกับยางแม่เหล็กที่ปริมาณผงแม่เหล็กต่ำ หรือยางแม่เหล็กในมอเตอร์ที่ต้องการสมบัติทางแม่เหล็กที่สูง แต่ไม่เน้นในเรื่องสมบัติเชิงกลควรเลือกใช้ยางแม่เหล็กที่ปริมาณผงแม่เหล็กสูง ๆ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ยางประเภทอื่นๆ ในการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมกับงานได้หลายประเภท
2. ควรศึกษาอัตราส่วนผงแม่เหล็กที่สูงกว่าในงานวิจัยนี้เพื่อดูผลของสมบัติทางแม่เหล็กที่ได้
3. ควรทำการศึกษาโดยใช้วิธีการผสมแบบต่อเนื่องเพื่อใช้ในการผลิตจริง เช่น ใช้เครื่องอัดรีดในการวิจัย เป็นต้น
4. ควรทำการศึกษาถึงการเตรียมผงแม่เหล็กเพื่อให้ได้ผงแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง

เอกสารอ้างอิง

1. Magtec Magnet EC Magtec Co., Ltd. 2001. **Flexible Magnet and Injection Molded Magnet** (online) Available: [http:// www.magtec.com/magtec01-02.htm](http://www.magtec.com/magtec01-02.htm).
2. Aussie Magnets Co.,Ltd. 2001. **Flexible Magnetic Rubber.** (online). Available: [http:// www.aussiemagnets.com.au/rubber.html](http://www.aussiemagnets.com.au/rubber.html).
3. Yuxiang Magnets Enterprise Co.,Ltd. 2000. **Plastic Magnets & Rubber Magnets.** (online). Available:[http:// www.magnets-net.com./ rubber. htm .](http://www.magnets-net.com./rubber.htm)
4. Magtec Industrial Co. 2002. **Flexible Rubber Magnet.** (online). Available:[http:// www. magtech.com.hk/flexible.htm](http://www.magtech.com.hk/flexible.htm).
5. Pro-Perfect (Xiamen) Magnetics Co.,Ltd. 2001. **Flexible Rubber Magnets.** (online). Available:[http:// www. china-magnetics. com./ Flexible - magnets.htm](http://www.china-magnetics.com./Flexible-magnets.htm).
6. ACH Magnetic, Inc. 2001. **Anisotropic and Isotropic Plastic Magnets.** (online). Available:[http:// www. ach - mag. Com/rubber.html](http://www.ach-mag.Com/rubber.html).
7. Dexter Magnetic Technologies. Inc. (DMT). 2001. **Flexible Magnets.** (online). Available:[http:// www. dextermag. com](http://www.dextermag.com).
8. Sawa . “ **High–Performance Anisotropic Plastic Magnet and a Process for Producing the Same.**”, U.S Patent no. 4022701, May 1977.
9. อธิพิล แจ่มชัด. 2545. **เทคโนโลยีการยาง.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
10. Morton, M. 1995. **Rubber Technology.** New York: McGrew-Hill,Inc.
11. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2542. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
12. NDT Resource Center. 2003. **Magnetism.** (online). Available:[http://www. ndt-ed/org/ EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Magnetism.htm](http://www.ndt-ed/org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Magnetism.htm)
13. Lovell, M. C. 1976. **Physical Properties of Materials.** London: Molly Millars Lane.
14. สันติ อัครศรีพงศ์พรหม. 2533. **สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์บัณฑิต ซึ่ง.
15. Cullity, B.D. 1972. **Introduction to Magnetic Materials:** Philippine: Adison-Wesley Publishing Company.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ลดาวัลย์ โชติมงคล และคณะ, 2538. การพัฒนาเฟอร์ไรท์เพื่อทำล้าโพง. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
17. ศิริกาญจนา ทองมี และคณะ, 2540. การเลือกเข้าแทนที่บางตำแหน่งของเหล็กด้วยไอออนมลทินในแบเรียมเฟอร์ไรท์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต เคมีคัลฟิลิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
18. Strail. "Flexible High Energy Magnetic Blend Compositions Based on Rare Earth Magnetic Particle in Highly Saturated Nitrile Rubber.", U.S Patent no. 5051200, September 1991.
19. Strail. "Flexible High Energy Magnetic Blend Compositions Based on Ferrite Particle in Highly Saturated Nitrile Rubber and Methods of Processing the Same.", U.S Patent no. 5002677, March 1991.
20. Tada. "Rubber or Plastic Magnetic and Magnetic Powder for Marking the Same.", U.S Patent no. 4308155, April 1981.
21. Flament. " Flexible Magnetic Pad." U.S Patent no. 6126588, November 2000.
22. Poh B.T.et.al. 2002. "Effect of Filler Loading on Tensile and Tear Properties of SMR L/ENR 25 and SMR L/SBR Blends cured Via a Semi-Efficient Vulcanization System." *Journal of Polymer Testing*. Vol. 21 (801-806).
23. Vinod V.S.et.al. 2001. "Degradation Behavior of Natural Rubber-Aluminum Powder Composites: Effect of High Energy Radiation" *Journal of Polymer Degradation and Stability*. Vol. 75 (405-412)
24. บวร โรจนภรณ์ และเอกสิทธิ์ จวานนท์ "การใช้ประโยชน์จากแร่ดิบเป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีน" โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
25. พลชีพ ลิมพงค์ และอรังศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข "การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม" โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
26. ASTM D 2084. 1992. "Standard Test Method for Rubber Properties. Vulcanization Characteristics Using Oscillating Disk Cure Mater. The American Society for Testing and Materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. ASTM D 1642. 1992. "Standard Test Method for Rubber Properties. Rubber Viscosity and Vulcanization Characteristics Mooney Viscometer. **The American Society for Testing and Materials.**
28. ASTM D 412. 1992. "Standard Test Method for Rubber Properties. Tensile. **The American Society for Testing and Materials.**
29. ASTM D 2240. 1992. "Standard Test Method for Rubber Properties. Durometer. **The American Society for Testing and Materials.**
30. ASTM 773. 1991. "Test Method for D-C Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with D-C Electronic Hysteresisgraphs. **The American Society for Testing and Materials.**
31. WalkerScientific, Inc. 2004. **Hysteresisgraphs.** (online).
Available: <http://www.walkerscientific.com>.
32. Yang. K.H. 2003. **Trends in Magnetic Information Data Storage and Magnetic Random Access Memory (MRAM).** (online). Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/phoenic0311c.pdf>.
33. Micro-Magnet Technology Co., Ltd. 2004. **Flexible Magnet.** (online).
Available: <http://www.magnets.com>.
34. Cixi City Magnetic Materials. 2004. **Rubber Magnet.** (online). Available: <http://www.my.ecplaza-net/cixingm/1.asp>.
35. Linix Motor Co., Ltd. 2002. **Rubber Magnet.** (online). Available: <http://www.eastsarces.com>.
36. Xiamen One Magnet Electronic Co., Ltd. 2004. **Rubber Magnet.** (online). Available: <http://www.ce.net.cn/>.
37. Bunting Magnetics Co., Ltd. 2003. **Flexible Magnetic Strip & Sheets.** (online).
Available: <http://www.bunting-magnetics.com/magnetics/flexible.htm>.
38. Majesty Magnet Pty Ltd. 2001. **Flexible Magnet Manufactureer.** (online). Available: <http://www.majestymagnet.com/products4.html>.
39. Anhio Magnetic Material Corp. 2002. **Hard Ferrite (Ceramic) Permanent Magnets.** (online). Available: <http://www.magnet.363.net/hard.htm>.
40. Nigbo Lihe Electric & Machinery industry Co., Ltd. 2001. **Ferrite.** (online). Available: <http://www.nblihe.com/pl.htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชัชวาล โลहितวิเศษ
วัน เดือน ปีเกิด	11 ตุลาคม 2520 ที่สมุทรปราการ
ที่อยู่	3890 ม. 3 ต. สำโรงเหนือ อ.เมือง จ. สมุทรปราการ 10270 โทร.0-2394-5004
ประวัติการศึกษา	2539 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้