



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

สมบัติแม่เหล็กและลักษณะการดึงดูดของไม้ยางพาราที่เคลือบด้วย
นีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน

Magnetic Properties and Attraction Characteristics of Nd-Fe-B Coated Rubber Wood

นามผู้วิจัย นางสาวจรีพร หนูดำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วัชรวิทย์ รัตนสกุลทอง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ศ.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติแม่เหล็กและลักษณะการดึงดูดของไม้ยางพาราที่เคลือบด้วยนีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน

Magnetic Properties and Attraction Characteristics of Nd-Fe-B Coated Rubber Wood

โดย

นางสาวจूरีพร หนูดำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จूरูพร หนูคำ 2555: สมบัติแม่เหล็ก และลักษณะการคั้งคูคของ ไม่ยางพาราที่เคลือบด้วย
นีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน ปริญญาวิตายาศาสตรมหาบัณทิต (ฟิสิกส์) สาขาวิชาฟิสิกส์
ภาควิตายาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปริญญาวิตายานิพนธ์หลัก: อาจารย์วัชรวิ รัตนสกุลทอง, ป.ร.ด.
102 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่เตรียมโดยการเคลือบ
ผงนีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน (Nd-Fe-B) ผสมเลกเกอร์บนไม้ยางพาราโดยใช้เครื่องแมกนีโต
มิเตอร์แบบต้นตัวอย่าง (VSM) วัดโมเมนต์แม่เหล็ก และทดสอบการคั้งคูคด้วยขดลวดโซเลนอยด์
แบบมีแกนเหล็ก ผง Nd-Fe-B เหลือทิ้งทางอิเล็คทรอนิกส์ถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยการบดแบบ
บอลมิลล์ จากการเปรียบเทียบผลของเวลาการบดนาน 20 ถึง 300 นาที พบว่าค่าสแควร์เนส (S^*)
และสนามแม่เหล็กกลับล่าง (H_c) ของผง Nd-Fe-B มีค่าต่ำสุดหลังจากบดนาน 130 นาที และค่า H_c
ของไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาบดเพิ่มขึ้นจาก 130 ไปถึง 300 นาที สำหรับค่า S^*
และ H_c ของไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบผง Nd-Fe-B ที่บดด้วยเวลาเดียวกันนั้นค่อนข้างคงที่ โดยไม่ได้
รับผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาตรเลกเกอร์ (Nd-
Fe-B% w/v) ในช่วง 30 -50% ในทางกลับกันแมกนีโตเซชัน (M) และ โมเมนต์แม่เหล็ก (m) จะมี
ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Nd-Fe-B% w/v เพิ่มขึ้น นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าในขดลวดโซเลนอยด์สำหรับการ
คั้งคูคของไม้แม่เหล็กมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อปริมาณของผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่
เคลือบเพิ่มขึ้น

Jureporn Noodam 2012: Magnetic Properties and Attraction Characteristics of Nd-Fe-B Coated Rubber Wood. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Miss Watcharee Rattanasakulthong, Ph.D. 102 pages.

Magnetic properties of coating-type magnetic wood prepared by coating lacquer containing neodymium iron boron (Nd-Fe-B) powders on rubberwood were characterized by vibrating sample magnetometry, magnetic moment measurements and attraction tests with an iron-core solenoid. Nd-Fe-B powders were recycled from electronic wastes by the ball-milling technique. By comparing the effect of the milling time from 20 to 300 min, the magnetic squareness and the coercive field of Nd-Fe-B powders were at the minimum after 130 min. It followed that, the coercive field of coating-type magnetic wood was increased with increasing milling time from 130 to 300 min. For composites using Nd-Fe-B from the same milling time, the magnetic squareness and the coercive field were rather insensitive to the variation of weight-to-volume percent of Nd-Fe-B in lacquer (Nd-Fe-B % w/v) from 30 to 50. By contrast, the magnetizations and magnetic moment were increased with increasing Nd-Fe-B % w/v. Furthermore, the electrical current in the solenoid required for attraction of magnetic wood composites was exponentially reduced with the increase in the amount of Nd-Fe-B used in coating.

_____/_____/_____
Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.วัชร รัตนสกุลทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล อาจารย์ประจำสำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พงศกร จันทร์ตัน ที่ได้ช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ ผศ.ดร.นิรันดร มาแทน อาจารย์ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในการอนุเคราะห์ไม้อย่างพาราที่นำมาใช้ในการทดลอง ตลอดจนการดูแลช่วยเหลือในการใช้เครื่องบอลลัมิลล์ และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

จุรีพร หนูคำ
สิงหาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	46
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	99
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	แสดงค่าสนามแม่เหล็กกลับล้าง (H_C) แมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) และแมกนีไทเซชันสูงสุด (M_{max}) ของผง Nd-Fe-B ที่เวลาบดต่างๆ กัน	56
2	แสดงค่าสนามแม่เหล็กกลับล้าง (H_C) แมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) แมกนีไทเซชันสูงสุด (M_{max}) และค่าสแควร์เนส (S^*) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130, 180 และ 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน	89
ตารางผนวกที่		
1	ขนาดอนุภาคจากภาพ SEM ของผง Nd-Fe-B ที่เวลาบดต่างๆ วัดด้วยโปรแกรม อิมเมจ-เจ	100

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงฮิสเตอร์ซิสม์ของ (ก) แม่เหล็กอ่อน (ข) แม่เหล็กถาวร	5
2 แสดงฮิสเตอร์ซิสม์ของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์	6
3 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd ₂ Fe ₁₄ B (ข) แสดงเกรนเดี่ยวของ Nd ₂ Fe ₁₄ B ซึ่งแสดงการเกิดนิวคลีโอไอที่มีโดเมนแม่เหล็กผันกลับ	9
4 การพัฒนาคุณภาพของแม่เหล็กถาวรที่มีค่า (BH) _{max} เพิ่มมากขึ้น	10
5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B _r กับค่า H _c ของวัสดุแม่เหล็กถาวร	11
6 แสดงค่าฟลักซ์ที่สูญเสียของแม่เหล็ก Nd-Fe-B เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	14
7 แสดงแผนผังการตัดตัวอย่างแผ่นไม้	24
8 แสดงชุดการทดลองในการทดสอบไม้แม่เหล็กชนิดเคลื่อน	25
9 ไม้แม่เหล็กชนิดเคลื่อนที่มีการสร้างร่องแบบ (a) เส้นขนาน (11 เส้น), (b) รูปร่างคอคลิมน์ (14x14 คอคลิมน์) และ (c) เส้นตาราง (11x11 เส้น)	26
10 (ก) เครื่องบดเพลเนททารีบอล (ข) แผนผังแสดงการเคลื่อนที่ของลูกบดภายในหม้อบด	29
11 ลักษณะการหมุนของแกนในเครื่องบดแอดทริเตอร์	30
12 การชนกันระหว่างอนุภาคโลหะกับลูกบด ในการบดผสมแบบเชิงกล	34
13 แสดงการวัดค่าด้วยเครื่อง VSM	36
14 แสดงแผนภาพการทำงานของ SEM	37
15 แสดงขดลวดที่ใช้วัดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) โซเลนอยด์ (ข) ขดลวดเฮล์มโฮลด์	38
16 แสดงแท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B	40
17 แสดงแผ่นไม้ยางพารา ขนาด 20 x 40 x 8 mm ³	41
18 แสดงเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง	41
19 แสดงเครื่องบดเพลเนททารีบอล รุ่น PM 100 (ก) ภายนอก (ข) ภายใน	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
20 แสดงชุดอุปกรณ์การคนสาร	43
21 แสดงเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง (VSM)	43
22 แสดงชุดอุปกรณ์วัดการดูดติดไม้แม่เหล็ก	44
23 แสดงชุดการวัดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) ฟลักซ์มิเตอร์ รุ่น 480 (ข) ขดลวด เฮล์มโฮลต์ FH-2.5	44
24 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	45
25 แสดง (ก) แท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B ก่อนทาบ และ (ข) ผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B หลังทาบ	46
26 แสดง (ก) ผง Nd-Fe-B ก่อนบด (ข) ผง Nd-Fe-B หลังบด	47
27 แสดง (ก) การเตรียมวัสดุเคลือบด้วยอุปกรณ์การคนสาร (ข) วัสดุเคลือบที่เตรียมได้	48
28 แสดงไม้แม่เหล็กโดยวัสดุเคลือบใช้ผง Nd-Fe-B ที่เวลาบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20%	49
29 แสดงขดลวดโซเลนอยด์ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก	50
30 แสดงชุดอุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวด	50
31 แสดงตำแหน่งการวางหัววัดในการวัดสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวด	51
32 แสดงระยะห่างระหว่างไม้แม่เหล็กกับขดลวด	51
33 แสดงการดูดติดของไม้แม่เหล็กกับขดลวด	52
34 แสดงไม้แม่เหล็กที่ถูกตัด	52
35 แสดงการต่อขดลวดเฮล์มโฮลต์กับฟลักซ์มิเตอร์	53
36 แสดงตำแหน่งการวางไม้แม่เหล็กในขดลวดเฮล์มโฮลต์	53
37 แสดงขั้นตอนการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก	54
38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (H) กับแมกนีโตเซชัน (M) ของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
39 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 20 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	58
40 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 40 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	59
41 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 60 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	60
42 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 80 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	61
43 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 130 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	62
44 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	63
45 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 60 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า	64
46 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ผ่านการบดนาน (ก) 20 นาที (ข) 40 นาที (ค) 60 นาที (ง) 80 นาที (จ) 130 นาที (ฉ) 180 นาที และ (ช) 300 นาที โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า	65
47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบดกับขนาดผงเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุด วัดด้วยโปรแกรมอิมเมจ-เจ	67
48 แสดงไม้มแม่เหล็กหลังเคลือบผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %	68

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
49 แสดงไม้แม่เหล็กหลังเคลือบผงแม่เหล็ก ที่ผ่านการอบ 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %	69
50 แสดงไม้แม่เหล็กหลังเคลือบผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบ 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %	70
51 แสดงสนามแม่เหล็ก (B) ที่ระยะห่าง 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร จากขดลวด เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า (I)	71
52 แสดงกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติดไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบ (ก) 130 นาที (ข) 180 นาที และ (ค) 300 นาที โดยแปรค่าระยะห่างต่างๆ กัน	72
53 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบนาน 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 %	74
54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการอบ 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %	75
55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบ 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %	75
56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบ 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %	77
58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %	77
59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ย สามตัวอย่าง เมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบด 130 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %	78
60 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10%, (ข) 20%, (ค) 30%, (ง) 40% และ (จ) 50 %	79
61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %	80
62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %	80
63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %	82
65	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %	82
66	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ย สามตัวอย่าง เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %	83
67	แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %	84
68	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %	85
69	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %	86
70	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %	87
72	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของ ไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %	87
73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ย สามตัวอย่าง เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %	88
74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v กับค่าสนามแม่เหล็กคลบด้าง (H_c) ของไม้ แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน	90
75	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v กับค่าสแควร์เนสของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน	91
76	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v และโมเมนต์แม่เหล็ก (m) เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T_c	=	อุณหภูมิคูรี
B	=	สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ
H	=	สนามแม่เหล็กภายนอก
M	=	แมกนีไทเซชัน
M_r	=	แมกนีไทเซชันคงค้าง
B_r	=	สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำคงค้าง
M_s	=	แมกนีไทเซชันอิ่มตัว
H_c	=	สนามแม่เหล็กกลับล้าง
$(BH)_{max}$	=	ค่าผลคูณพลังงานสูงสุด
μ	=	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก
R	=	ค่าการสูญเสียแบบผันกลับได้
I	=	สภาพสูญเสียที่ผันกลับไม่ได้
m	=	โมเมนต์แม่เหล็ก
ϕ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก
O_e	=	เออร์สเตด
G	=	เกาส์
T	=	เทสลา

สมบัติแม่เหล็กและลักษณะการดึงดูดของไม้ยางพาราที่เคลือบด้วย
นีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน

**Magnetic Properties and Attraction Characteristics of Nd-Fe-B
Coated Rubber Wood**

คำนำ

ไม้แม่เหล็ก (Magnetic wood) คือวัสดุที่เกิดจากการผสมกันระหว่างไม้ (wood) กับแม่เหล็ก (magnet) ถูกคิดค้นครั้งแรกโดย Oka และคณะ ในปี 1991 ไม้แม่เหล็กสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการผสมระหว่างไม้กับแม่เหล็ก มี 3 ชนิด คือ ชนิดซึมเข้าเนื้อไม้ (impregnated type) ชนิดผง (powder type) และชนิดเคลือบ (coating type) ไม้แม่เหล็กมีลักษณะที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ไม้แม่เหล็กยังสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ มีความถ่วงจำเพาะต่ำ สามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความชื้น ใช้เป็นบอร์ดนำความร้อน (heating board) และตัวดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave absorber)

จากการศึกษาไม้แม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด พบว่าไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ มีสมบัติแม่เหล็กและสมบัติการดึงดูดที่ดีกว่าแบบอื่น ซึ่งไม้แม่เหล็กชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และการประยุกต์ด้านอื่นๆ เนื่องจากมีกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ในการวิจัยครั้งนี้สนใจศึกษาไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบจากผงแม่เหล็กถาวรที่เป็นส่วนประกอบในฮาร์ดดิสก์ที่เสียนำกลับมาใช้ใหม่และเศษไม้ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรือครัวเรือนทั่วไป ผสมกับเลกเกอร์ในอัตราส่วนของผงแม่เหล็กและเวลาหมუნบดผงแม่เหล็กต่างๆ กัน แล้วเคลือบบนไม้ และพัฒนาเป็น บอร์ดดึงดูดแม่เหล็กที่สามารถนำไป

ประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ได้ ซึ่งเป็นการนำสิ่งที่เหลือใช้กลับมาใช้ได้ใหม่อย่าง
คุ้มค่า



วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียม ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่มีอัตราส่วนผสมของผงแม่เหล็กและเวลาหมუნบด ผงแม่เหล็กต่างๆ กัน
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและคุณลักษณะเฉพาะของ ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่มี อัตราส่วนผสมของผงแม่เหล็ก และเวลาหมუნบดผงแม่เหล็กต่างๆ กัน
3. เพื่อศึกษาลักษณะการดึงดูดแม่เหล็กของ ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่มีอัตราส่วนผสมของ ผงแม่เหล็ก และเวลาหมუნบดผงแม่เหล็กต่างๆ กัน

การตรวจเอกสาร

จากการวิจัยของโอกะ (Oka) และคณะ ได้จำแนกไม้แม่เหล็ก (Magnetic wood) เป็น 3 ประเภทคือ ชนิดผง (Powder-type) ชนิดซึมผ่าน (Impregnated-type) และชนิดเคลือบ (Coating-type) ซึ่งแต่ละชนิดมีวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยไม้แม่เหล็กชนิดผงสามารถเตรียมโดยการผสมผงไม้เล็กๆ กับผงแม่เหล็กขนาดไมโครด้วยตัวประสาน อัดขึ้นรูปเป็นไม้แม่เหล็กภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง สำหรับไม้แม่เหล็กชนิดซึมผ่าน วัสดุแม่เหล็กอยู่ในรูปแม่เหล็กเหลว (Magnetic fluid) ที่ถูกอัดให้ซึมไปในท่อลำเลียงของไม้ จากการศึกษพบว่าลักษณะเฉพาะของไม้และสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและทิศทางของเส้นใยในเนื้อไม้กับทิศของสนามแม่เหล็ก

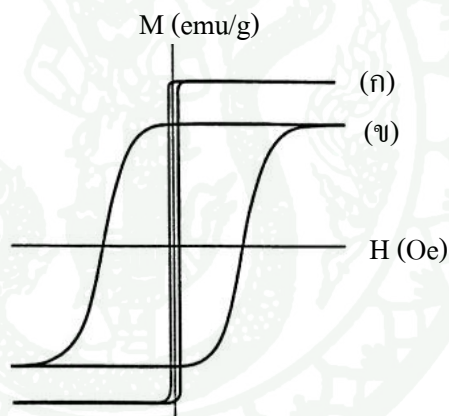
การประยุกต์ใช้ของไม้แม่เหล็กชนิดผง และชนิดซึมผ่านใช้เป็นตัวดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ เช่น แมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์ และนิกเกิลซิงค์เฟอร์ไรต์นำมาใช้เป็นวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบซึ่งมีชั้นพื้นผิวเป็นแม่เหล็กสามารถใช้เป็นบอร์ดความร้อน และบอร์ดดึงดูดได้อีกด้วย บอร์ดดึงดูดแม่เหล็กใช้ประโยชน์จากสนามแม่เหล็กของไม้แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดวัสดุแม่เหล็กชนิดอื่นด้วยเหตุนี้วิธีหนึ่งที่ทำให้สมบัติการดึงดูดของไม้แม่เหล็กแต่ละชนิดมีค่ามากขึ้นก็คือ การใช้วัสดุแม่เหล็กถาวรที่มีค่าแมกนีโตเซชันคงค้าง (Remanent magnetization; M_r) และสนามแม่เหล็กกลับล้าง (Coercivity; H_c) สูง

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม-ไอออน-โบรอน (Nd-Fe-B) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรที่มีค่าผลคูณพลังงานสูงสุดหรือค่า $(BH)_{max}$ สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าแมกนีโตเซชันคงค้างหรือค่า M_r และสนามแม่เหล็กกลับล้างหรือค่า H_c ที่สูงด้วย โดยนำแท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B จากฮาร์ดดิสก์ที่ไม่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ นำมาบดด้วยเทคนิคบอลลมิลล์ (Ball mill) ซึ่งแปรค่าเวลาบด แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นไม้แม่เหล็กโดยมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาตรเลกเกอร์ (Nd-Fe-B% w/v) แตกต่างกัน แล้วทดสอบสมบัติการดึงดูดของไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่สร้างขึ้น

ในการตรวจเอกสารผู้วิจัยขอกล่าวถึงรายละเอียดของแม่เหล็กถาวร โดยเฉพาะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ไม้อย่างพารา ไมแม่เหล็ก และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

วัสดุแม่เหล็กถาวร

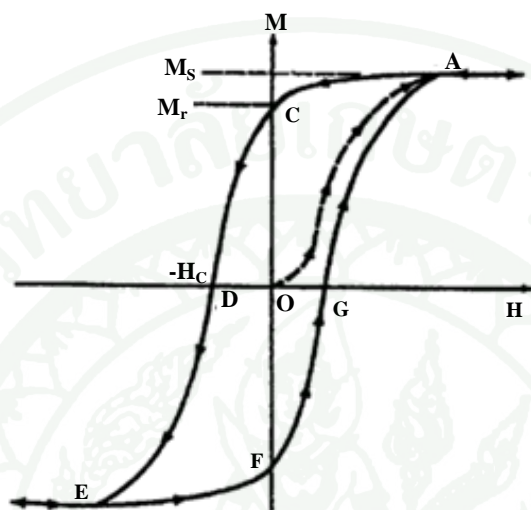
แม่เหล็กถาวร เป็นแม่เหล็กที่แมกนีไทซ์ (Magnetization) และดีแมกนีไทซ์ (Demagnetization) ได้ยาก โดยมีค่า M_r , H_c และ M_s (Saturation magnetization) สูง ค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กต่ำและมีค่าสูญเสียฮิสเตอร์ซิสมาก ฮิสเตอร์ซิส ลูปของแม่เหล็กถาวรเปรียบเทียบกับแม่เหล็กอ่อน แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงฮิสเตอร์ซิส ลูปของ (ก) แม่เหล็กอ่อน (ข) แม่เหล็กถาวร

การประยุกต์ใช้แม่เหล็กถาวรซึ่งเกี่ยวกับค่า H_c และค่า $(BH)_{max}$ ของแม่เหล็ก ซึ่งแสดงด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมใหญ่สุดที่สามารถบรรจุในจุดภาคที่สองของกราฟ M กับ H หรือ B กับ H ซึ่งค่า $(BH)_{max}$ แสดงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการดีแมกนีไทซ์และสามารถเปรียบเทียบถึงความแข็งแรงของแม่เหล็กถาวร

ในการพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก สามารถพิจารณาจากฮิสเตอร์ิซิสลูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H หรือ M กับ H โดยมีปริมาณทางแม่เหล็กที่สำคัญ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงฮิสเตอร์ิซิสลูปของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์

ภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ประกอบด้วยโดเมนแม่เหล็ก ในขณะที่ยังไม่จ่ายสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะเรียงตัวแบบสุ่ม ค่าแมกนีโตเซชันในขณะนั้นเป็นศูนย์ แต่เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กให้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ จะทำให้ค่าแมกนีโตเซชันเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ตามเส้นโค้ง OA จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวที่จุด A จะพบว่า ณ ตำแหน่งนี้โมเมนต์แม่เหล็กทั้งหมดเรียงในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก ค่าแมกนีโตเซชันที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า แมกนีโตเซชันอิ่มตัว หรือค่า M_s และเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนถึงศูนย์ เส้นโค้งที่แสดงปริมาณการแมกนีโตเซชันจะไม่กลับมาตามแนวเส้นโค้งเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง AC ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ยังคงมีแมกนีโตเซชันคงค้างในวัสดุเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก ($H = 0$) แล้วก็ตาม โดยแสดงค่าแมกนีโตเซชัน เท่ากับ M_r (จุด C) จึงถูกเรียกว่า แมกนีโตเซชันคงค้าง ค่าแมกนีโตเซชันลดลงเป็นศูนย์หรือหมดสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง เมื่อใส่แม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามในปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ H_c (จุด D) ซึ่งเรียกว่า สนามแม่เหล็กกลับล้าง ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศหรือให้คิดลบมากขึ้น ก็จะทำให้โลหะมีค่าแมกนีโตเซชันเพิ่มขึ้นตามเส้น

โค้ง DE ในทิศทางตรงข้ามจากเดิม และจะอ้อมตัวที่จุด E เมื่อหยุดการให้สนามแม่เหล็กกลับทิศนี้ ค่าแมกนีโตเซชันจะเปลี่ยนแปลงตามแนวเส้นโค้ง EF และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปอีก เส้นโค้ง M-H จะดำเนินตามแนว FGA ได้รูปที่สมบูรณ์ครบหนึ่งรอบ ซึ่งเรียกว่า ฮิสเตอร์ซิสลูป พื้นที่ภายในทั้งหมดของลูปแสดงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะแม่เหล็กและลบล้างสภาพแม่เหล็ก

วัสดุแม่เหล็กถาวร มีด้วยกันหลายชนิด ดังนี้

1. โลหะผสมอัลนิโก (Alnico alloy)

แม่เหล็กอัลนิโกเป็นโลหะผสมที่มีส่วนประกอบหลักเป็น Fe กับ Al Ni และ Co โดยมีการเติมโลหะอื่นๆ เช่น Cu, Ti ปริมาณเล็กน้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติของแม่เหล็ก ข้อดีของแม่เหล็กชนิดนี้ คือ มีความเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีแต่ประาดังนั้นแม่เหล็กชนิดนี้จึงมักถูกผลิตขึ้น 2 แบบ คือ การหล่อ (Casting) และการเผาผนึก (Sinter) โดยจะพบว่าโลหะผสมจากวิธีการหล่อมักมีเกรนหยาบ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับ 1 มิลลิเมตร และโลหะผสมจากวิธีการเผาผนึกมีเกรนที่ละเอียดและมีสมบัติเชิงกลดีกว่า ในขณะที่การผลิตโดยการหล่อจะให้ค่า $(BH)_{max}$ ที่สูงกว่า แม่เหล็กอัลนิโกมีค่า $(BH)_{max}$ สูงประมาณ 5-9 MGOe , B_r มีค่า 7-13.5 kG และ H_c มีค่า 500 - 2010 Oe แม่เหล็กอัลนิโกได้ถูกแทนที่โดยแม่เหล็กแบบเซรามิกส์ และแม่เหล็กที่มีธาตุโลหะหายาก (Rare earth) เป็นส่วนผสม สมบัติทางแม่เหล็กของโลหะผสมอัลนิโกพบว่ามีความไวต่ออุณหภูมิสูง (T_c) สูงมาก มีค่า 700-850 °C ซึ่งทำให้มีความเสถียรภาพของฟลักซ์แม่เหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ด้านทานการกัดกร่อนสูง ความแข็งแรงเชิงกลสูงและทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง แต่อุปสรรคในการประยุกต์ใช้งานของแม่เหล็กชนิดนี้ คือราคาสูง ค่า H_c และค่า $(BH)_{max}$ ต่ำ

2. โลหะผสมซาเมเรียม-โคบอลต์ (Samarium-Cobalt alloy)

โลหะผสมซาเมเรียม-โคบอลต์ (Sm-Co alloy) เป็นวัสดุแม่เหล็กจำพวกโลหะผสมธาตุโลหะหายากซึ่งเกิดจากการผสมระหว่าง Co หรือ Fe กับธาตุโลหะหายาก มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันสูง มีความต้านทานต่ออุณหภูมิดีกว่า เมื่อเทียบกับ Nd-Fe-B แม่เหล็ก Sm-Co สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ $SmCo_5$ และ Sm_2Co_{17} โดย $SmCo_5$ มีค่า $(BH)_{max}$ ในช่วง

15-22 MGOe และ Sm_2Co_7 มีค่า $(\text{BH})_{\text{max}}$ ในช่วง 22-32 MGOe แม่เหล็ก Sm-Co ทนต่ออุณหภูมิสูงถึง 350 °C แต่แม่เหล็ก Sm-Co แบบเผาผนึกจะเปราะง่ายต่อการชุบฉีด การเกิดรอยแตก และแตกหักได้ง่ายเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างกะทันหัน เนื่องจากราคาของ Sm และแม่เหล็ก Sm-Co มีราคาสูงจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ

แม่เหล็ก Sm-Co จะถูกใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น มอเตอร์ในปั๊ม และวาล์วของอวัยวะเทียม นอกจากนี้ยังถูกใช้ในนาฬิกาข้อมืออิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบกระแสตรง และแบบซิงโครนัส (Synchronous) ซึ่งมีผลทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง

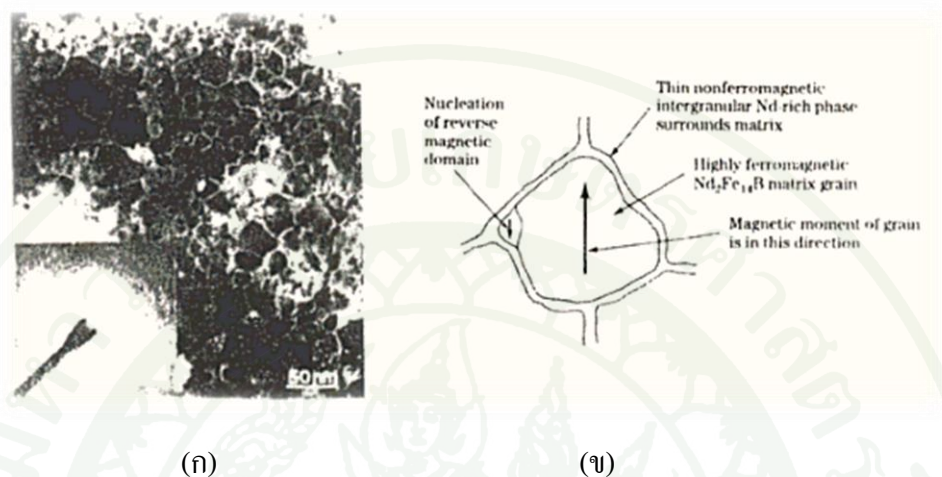
3. โลหะผสมเหล็ก-โครเมียม-โคบอลต์ (Fe-Cr-Co alloys)

วัสดุแม่เหล็กถาวรชนิดนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1971 ซึ่งมีโครงสร้าง และสมบัติความเป็นแม่เหล็กถาวรคล้ายคลึงกับโลหะผสมอัลนิโก วัสดุแม่เหล็กชนิดนี้ประกอบด้วย 61%Fe-28%Cr-11%Co สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดนี้มีค่า $B_r = 10-13 \text{ kG}$ ค่า $H_c = 190-753 \text{ Oe}$ และค่า $(\text{BH})_{\text{max}} = 1.3-1.5 \text{ MGOe}$ แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า และขึ้นรูปง่ายกว่าเมื่อเทียบกับอัลนิโก จึงสามารถใช้ผลิตแม่เหล็กถาวรที่มีรูปร่างซับซ้อน

4. โลหะผสมแม่เหล็กนีโอดีเมียม-โอบอน -โบรอน (Nd-Fe-B magnetic alloys)

แม่เหล็ก $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ถูกนำมาใช้แทนแม่เหล็ก Sm-Co เนื่องจากธาตุ Sm มีราคาแพง และธาตุ Fe หาได้ง่ายกว่า Co ได้ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1984 แม่เหล็กชนิดนี้จึงเป็นตัวเลือกในการประยุกต์ใช้งานหลาย ๆ ด้านแทน ในการใช้งานแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้มากที่สุด แม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นแม่เหล็กที่ประกอบด้วยธาตุโลหะหายากอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งแม่เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติคล้าย ๆ กับแม่เหล็ก Sm-Co ยกเว้นแต่แม่เหล็กชนิดนี้เกิดการออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าแต่คุณลักษณะที่เด่นของแม่เหล็กชนิดนี้คือ มีค่า $(\text{BH})_{\text{max}}$ สูงสุด ซึ่งมีค่าสูงถึง 52 MGOe และมีความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าแม่เหล็ก Sm-Co แม่เหล็กชนิดนี้มีการกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากไม่มีชั้นป้องกันจึงได้มีการพัฒนาโดยการเคลือบด้วยธาตุและวัสดุอื่นๆ อย่างเช่น Cu, Ag, Au, Ni, Zn และอีพอกซีเรซิน เป็นต้น ในปัจจุบันแม่เหล็ก $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือกรรมวิธีโลหะผง

(Powder metallurgy) โดยการเผาพูนึก และการทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid-solidification) และวิธีเมทัลสปินนิ่ง



ภาพที่ 3 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd₂Fe₁₄B (ข) แสดงเกรนเดี่ยวของ Nd₂Fe₁₄B ซึ่งแสดงการเกิดนิวคลีไอที่มีโดเมนแม่เหล็กผันกลับ

ที่มา: Croat *et al.* (1984)

โครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd₂Fe₁₄B ที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid solidification) แสดงดังภาพที่ 3 (ก) สังเกตเห็นเกรนของเฟอร์โรแมกเนติกส์ Nd₂Fe₁₄B ที่เป็นเฟสหลักถูกล้อมรอบด้วยเฟสที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ภาพที่ 3 (ข) แสดงเกรนเดี่ยวของ Nd₂Fe₁₄B มีการเกิดนิวคลีไอที่มีโดเมนแม่เหล็กผันกลับ ส่งผลให้แม่เหล็กชนิดนี้มีค่า H_c และค่า $(BH)_{max}$ สูง

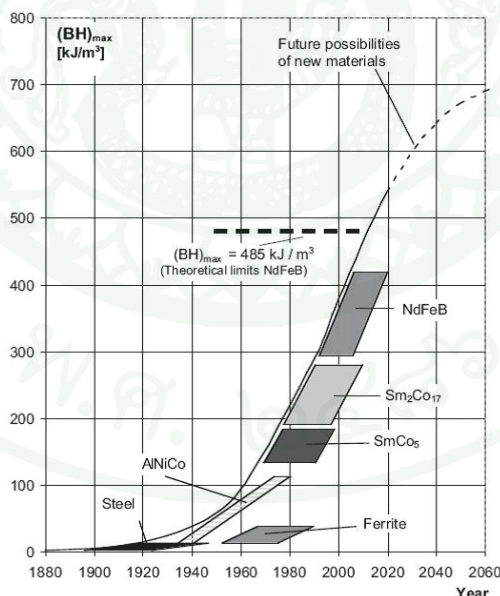
คุณสมบัติที่เห็นได้ชัดของแม่เหล็กชนิดนี้คือมีค่า $(BH)_{max}$ สูง ค่า H_c สูง และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิปานกลาง แต่ปัญหาในด้านการประยุกต์ใช้งานคือ มีความแข็งแรงทางกลต่ำ และต้านทานการกัดกร่อนต่ำเมื่อใช้วัสดุเคลือบผิวที่ไม่เหมาะสม

สำหรับการใช้ประโยชน์แม่เหล็ก Nd-Fe-B คือใช้ทำมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทุกแบบ โดยเฉพาะในยานยนต์ที่ต้องการขนาดเล็ก กะทัดรัดและน้ำหนักเบา

แม่เหล็กนีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน

การพัฒนาของแม่เหล็กถาวรในศตวรรษนี้มี การเพิ่มคุณภาพ ความแข็งแรง และความสามารถในการสะสมพลังงาน (Store energy) ซึ่งพิจารณาจากค่า $(BH)_{max}$ เพื่อสามารถนำมาใช้ได้เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิจัยและพัฒนาจะถูกเน้นไปที่เพิ่มค่า H_c โดยการปรับองค์ประกอบของโลหะผสมแต่ในการเพิ่มค่า H_c ยังต้องคำนึงถึงค่า M_s โดยการผลิตโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด โดยทั่วไปพบว่าค่า H_c แปรผกผันกับขนาดของอนุภาค

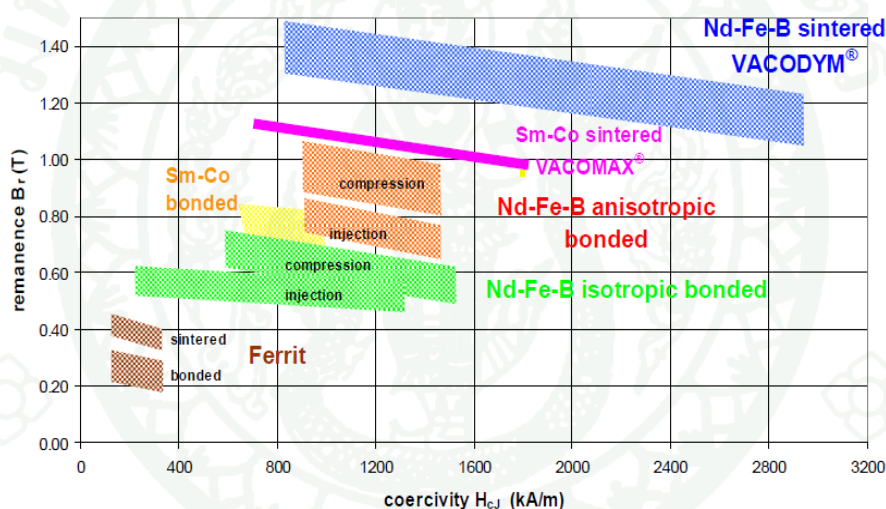
ปัจจุบันวัสดุแม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีค่า $(BH)_{max}$ สูงสุดในบรรดาวัสดุแม่เหล็กถาวรทั้งหมด ผลของการพัฒนาปรับปรุงค่า $(BH)_{max}$ ของวัสดุแม่เหล็กถาวรตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 ถึงปัจจุบัน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การพัฒนาคุณภาพของแม่เหล็กถาวรที่มีค่า $(BH)_{max}$ เพิ่มมากขึ้น

ที่มา: Weickhmann (2009)

จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกเริ่มจากการใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวร ต่อมาปี ค.ศ.1931 ได้มีการค้นพบแม่เหล็ก AlNiCo ที่มีค่าพลังงานสูงขึ้น ในปี ค.ศ.1970 ได้มีการค้นพบแม่เหล็กผสมของโคบอลต์กับโลหะหายาก วัสดุแม่เหล็กถาวรในกลุ่มนี้ คือ SmCo_5 ต่อมาได้มีการเพิ่มปริมาณธาตุเหล็ก และโคบอลต์สูงขึ้นเป็นวัสดุแม่เหล็ก Sm_2Co_7 ทำให้ค่า M_s สูงขึ้น เป็นผลให้ค่า $(BH)_{\max}$ สูงขึ้นด้วย ต่อมาในปี ค.ศ.1984 ได้มีการค้นพบวัสดุแม่เหล็กถาวร Nd-Fe-B เพื่อแทนที่แม่เหล็ก SmCo เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กถาวรชนิดต่างๆ จะเห็นว่าวัสดุแม่เหล็ก Nd-Fe-B มีค่า $(BH)_{\max}$ สูงที่สุดในปัจจุบัน คือมีค่าประมาณ 400 kJ/m^3 ในขณะที่แม่เหล็ก SmCo มีค่า 300 kJ/m^3 แม่เหล็ก AlNiCo มีค่า 50 kJ/m^3 ส่วนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีค่าเพียง 40 kJ/m^3



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B_r กับค่า H_c ของวัสดุแม่เหล็กถาวร

ที่มา: Weickmann (2009)

แม่เหล็ก Nd-Fe-B มีค่า $(BH)_{\max}$ ที่สูงสุดในปัจจุบัน โดยมีค่า B_r สูงถึง 1.45 T และ H_c มีค่า 2650 kA/m ขณะที่เฟอร์ไรต์ มีค่า B_r เพียง 0.45 T และค่า H_c มีค่าประมาณ 300 kA/m ซึ่งสมบัติทั้งสองค่ามีผลกระทบต่อกัน โดยค่า B_r สูงสุดไม่สามารถให้ค่า H_c ที่สูงสุดได้ แสดงดังภาพที่ 5

งานวิจัยเกี่ยวกับแม่เหล็ก Nd-Fe-B และการปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ มีแนวทางดังนี้

1. การเพิ่มค่า $(BH)_{max}$

วัสดุแม่เหล็กถาวรชนิดใดก็ตามที่มีค่าสนามแม่เหล็กคลบเลี้ยงเพียงพอ และมีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า B_r และค่า $(BH)_{max}$ จากการวิจัยพบว่าค่า $(BH)_{max}$ แปรผันตรงกับกำลังสองของค่า B_r แสดงดังสมการ

$$(BH)_{max} = B_r^2 / 4\mu_0$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าสภาพซึมซาบได้ (Magnetic permeability) ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ

B_r คือ ค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง

ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า $(BH)_{max}$ มีดังต่อไปนี้

(1) ค่า M_s เป็นสมบัติภายในเฉพาะของเฟสแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบของสารแม่เหล็กเท่านั้น

(2) สัดส่วนเฟสของแม่เหล็ก เนื่องจากค่า B_r แปรผันตรงกับสัดส่วนปริมาตรของเฟสแม่เหล็ก ดังนั้นจึงสามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาแน่นของแม่เหล็ก หรือลดสัดส่วนเฟสที่สองของวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็กหรือตัวประสาน

(3) ค่า B_r ของแม่เหล็กแอนไอโซโทรปิกเป็นสัดส่วนกับโคไซน์ของมุมที่เบี่ยงจากแนวเจลีย์บนแต่ละเกรน

แม่เหล็ก Nd-Fe-B แต่ละชนิด ได้แก่ แม่เหล็กแบบบอนด์ (Bonded magnet) แม่เหล็กแบบเผาผนึก (Sintered magnets) และแม่เหล็กแบบเมลท์สปินนิ่ง (Melt-spun magnets) ต่างมีการปรับปรุงการผลิตเพื่อให้ได้ค่า $(BH)_{max}$ ที่สูงขึ้น ดังนี้

ในส่วนของแม่เหล็กแบบบอนด์ ที่ผลิตขึ้นมีองค์ประกอบเข้าใกล้ $Nd_2Fe_{14}B$ หรือ $Nd_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$ ในการพัฒนาแม่เหล็กชนิดนี้ให้มีความสูงค่า $(BH)_{max}$ ให้สูงขึ้นโดยเติมธาตุ Co ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อให้ค่า M_s สูงขึ้น ซึ่งค่า B_r และค่า $(BH)_{max}$ ของแม่เหล็กแบบบอนด์มีผลจากปริมาณของ

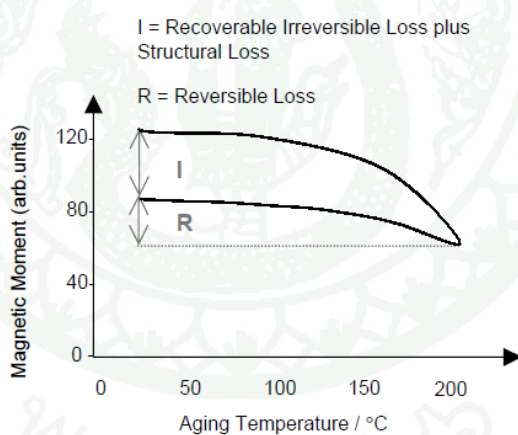
ตัวประสานที่ใช้ ซึ่งปริมาณรุกรุนและการสูญเสียทางแม่เหล็กภายในทำให้ค่า B_r ลดลง อีกทั้งรุกรุนยังทำให้ค่าความหนาแน่นของแม่เหล็กลดลงเป็นผลให้ค่า B_r ลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาค ชนิดของตัวประสานและเทคนิคการรวมตัว ค่าสูญเสียแรงเฉือนภายในเป็นผลที่เกิดจากการแยกอนุภาคแม่เหล็กโดดเดี่ยวกับอนุภาคอื่นที่อยู่ภายในของผสมพอลิเมออร์

แม่เหล็กแบบเฟอร์ริคที่มีค่าความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถปรับปรุงค่า $(BH)_{max}$ ให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มสัดส่วนของเฟสแม่เหล็ก $Nd_2Fe_{14}B$ ในปัจจุบันแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเฟอร์ริคขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ $Nd_{14}Fe_{78}B_8$ (at%) ซึ่งมี $Nd_2Fe_{14}B$ ประมาณ 89.4 vol % ให้ค่า $(BH)_{max}$ สูงสุดทางทฤษฎี 52 MGOe เมื่อเทียบกับ $Nd_2Fe_{14}B$ 100 vol % ให้ค่า $(BH)_{max}$ ประมาณ 64 MGOe แต่การเพิ่มสัดส่วนของ $Nd_2Fe_{14}B$ ทำให้เกิดปัญหาตามมา เช่น การจับตัวของเฟส $\alpha - Fe$ ที่มากเกินไประหว่างการขึ้นรูป ขั้นตอนการเผาเฟสของเหลวจำเป็นต้องควบคุมเป็นอย่างดี และความไวต่อการเกิดออกซิเดชันกับธาตุโลหะหายากที่มีเฟสน้อยลงในขอบเกรนที่เพิ่มขึ้น ในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำได้โดยการหล่อแบบรีด (Strip cast) และฟั่นอะตอมของโลหะผสม (Atomized alloy) เพื่อเพิ่มอัตราการเย็นตัวจากการละลาย และจำกัดจำนวนการจับตัวของเฟส $\alpha - Fe$ เทคนิคการขึ้นรูปโดยการหล่อทำให้วัสดุที่มีปริมาณของธาตุโลหะหายากลดลง และมีโครงสร้างจุลภาคเหมือนกันมากขึ้น การวิจัยเพิ่มเติมเน้นการจัดตำแหน่งและการอัด (Press) ของผงบด โดยทั่วไปสำหรับแม่เหล็กแบบเฟอร์ริคที่ได้จากการอัดฉีด (Green compacts) มีการอัดในสนามแม่เหล็กทั้งแนวขนาน และตั้งฉากกับแกนของการอัด เทคนิคการอัดแบบขนานมีข้อดีที่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสุทธิใกล้เคียงมากกว่า แต่การอัดแบบตั้งฉากจำเป็นต้องมีเครื่องจักรกลเพิ่มเติมเพื่อจัดรูปร่าง แต่การอัดแบบตั้งฉากนั้นให้ชิ้นส่วนที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงกว่าเนื่องจากการจัดตำแหน่งเกรนของ $Nd_2Fe_{14}B$ มีทิศทางที่ดีกว่า

2. เสถียรภาพในสภาวะแวดล้อม

การมีเสถียรภาพในสภาวะแวดล้อมปกติ สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแม่เหล็กเมื่อเวลาผ่านไปที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ค่าความเป็นแม่เหล็กสามารถ

ประมาณได้จากค่าการสูญเสียฟลักซ์ (Flux loss) เมื่อเวลาผ่านไปที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ค่าสูญเสียฟลักซ์ทั้งหมด ประกอบด้วยสภาพสูญเสียแบบผันกลับได้ (Reversible loss; R) สภาพสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้ (Recoverable irreversible loss; I) และสภาพสูญเสียเชิงโครงสร้าง (Structure loss) การสูญเสียฟลักซ์เกิดขึ้นจากกระบวนการผันกลับของแมกนีไทเซชันเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 6 ในส่วนของการเย็นตัวของการกลับมาได้หรือสภาพสูญเสียแบบผันกลับได้และส่วนที่ไม่สามารถกลับมาเป็นเหมือนเดิมได้หรือสภาพสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้สามารถทำให้กลับมาเป็นเหมือนเดิมได้บางส่วนโดยการจัดเรียงตัวใหม่ของแมกนีไทเซชันและบางส่วนไม่สามารถกู้คืนได้อย่างถาวรเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชัน การสูญเสียเชิงโครงสร้างนั้นเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของเฟสที่ขอบเกรนของธาตุโลหะหายาก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาณของเฟสนี้ ค่า R และ I แปรผกผันกับค่า H_{ci} และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า H_{ci} ลดลง



ภาพที่ 6 แสดงค่าฟลักซ์ที่สูญเสียของแม่เหล็ก Nd-Fe-B เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ที่มา: Brown (2002)

สภาพสูญเสียที่ไม่สามารถฟื้นกลับได้สามารถทำนายได้โดยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า B_r เรียกว่า ค่า $\alpha/\%C^{-1}$ และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า H_{ci} เรียกว่า ค่า $\beta/\%C^{-1}$ เป็นไปตามสมการ

$$\alpha = \left[\frac{(B_{r(T)} - B_{r(RT)})}{(B_{r(RT)} \times \{T - RT\})} \right] \times 100\%$$

$$\beta = \left[\frac{(H_{ci(T)} - H_{ci(RT)})}{(H_{ci(RT)} \times \{T - RT\})} \right] \times 100\%$$

เมื่อ $B_{r(T)}$ และ $H_{ci(T)}$ แทนค่า B_r และ H_{ci} ที่อุณหภูมิ T ในหน่วยของศาเซลเซียส และ $B_{r(RT)}$ และ $H_{ci(RT)}$ แทนค่า B_r และ H_{ci} ที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ

การปรับปรุงแม่เหล็ก Nd-Fe-B แต่ละชนิด ในด้านการมีเสถียรภาพในสภาวะแวดล้อม มีดังนี้

แม่เหล็กแบบบอนด์ มีข้อดีที่อนุภาคแม่เหล็ก Nd-Fe-B ถูกหุ้มในชั้นพอลิเมอร์เพื่อป้องกันระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปและป้องกันผิวง่ายไม่สัมผัสกับความชื้นในบรรยากาศระหว่างการใช้งาน คุณสมบัตินี้ได้ถูกปรับปรุงโดยการพัฒนาเทคนิคประยุกต์ตัวประสานแบบใหม่ เช่น เทคนิคการเคลือบด้วยของเหลว (Liquid Coating technique; LC) ซึ่งหุ้มผิวอนุภาคแม่เหล็กด้วยพอลิเมอร์อีพอกซี และทำให้สามารถเพิ่มสัดส่วนผงให้มากขึ้นได้ในกระบวนการเตรียมแม่เหล็ก นอกจากนี้ข้อดีของผงจากเมลท์สปินนิ่ง คือ ความมีเสถียรภาพระหว่างการเตรียมแม่เหล็กซึ่งสามารถสัมผัสกับอากาศได้โดยไม่เกิดการออกซิเดชัน

แม่เหล็กแบบเผาผนึก มีข้อเสียในแง่ของการมีเสถียรภาพในสภาวะแวดล้อมปกติต่ำ เนื่องจากประกอบด้วยปริมาณของสถานะของขอบเกรนของธาตุโลหะหายาก เป็นจำนวนมาก การปรับปรุงสามารถทำได้โดยการเพิ่ม T_c ของแม่เหล็กโดยเติมธาตุ Co เข้าไป การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดเมนของแม่เหล็กโดยเติมธาตุ Dy และการปรับปรุงเสถียรภาพการกักร้อนที่ขอบเกรน โดยการเติม Co, Cu และ Ga การเคลือบป้องกันยังสามารถต้านการกักร้อนของแม่เหล็ก Nd-

Fe-B แบบเผาผนึก โดยทั่วไปใช้ निकิลสำหรับเคลือบชิ้นส่วนแม่เหล็กที่มีราคาสูง และใช้สังกะสีสำหรับการประยุกต์ใช้ที่มีราคาต่ำ

แม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเมลท์สปินนิ่ง โดยอัดด้วยความร้อน และการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Die-upset) มีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแม่เหล็กแบบเผาผนึก ซึ่งอาจเกิดจากขนาดเกรนที่เล็กลงและปริมาณของวัสดุที่มี Nd มากน้อยลง

3. การผลิตรูปร่างสุทธิที่ใกล้เคียงกัน

วัสดุแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีความหนาแน่นสูงมีความเปราะมากที่อุณหภูมิห้อง การใช้แม่เหล็กชนิดนี้จึงมีค่าใช้จ่ายสูงและยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปสุทธิที่ใกล้เคียงกันในการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B แต่ละชนิด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนี้

แม่เหล็กแบบบอนด์ มีระดับความสามารถในการขึ้นรูปสูง เนื่องจากวัสดุดังกล่าวสามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิก่อนข้างต่ำ ประมาณ 170-300 °C ขึ้นกับตัวประสาน และเทคนิคการหล่อ (Molding technique) ที่ใช้

แม่เหล็กแบบเมลท์สปินนิ่งโดยอัดความร้อน มีระดับความสามารถในการขึ้นรูปสุทธิสูง แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายสูงและจำเป็นจะต้องใช้อุณหภูมิในการทำงานสูง ประมาณ 700-800 °C การเปลี่ยนรูปโดยความร้อนจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูง

แม่เหล็กแบบเผาผนึกที่ได้จากการฉีด มีข้อจำกัดในการผลิตรูปร่างสุทธิของแม่เหล็กชนิดนี้ สามารถสูญเสียปริมาตรได้ถึง 25% ของปริมาตรระหว่างกระบวนการเผา ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความดันระหว่างกระบวนการเผาผนึก

4. งานวิจัยเพื่อพัฒนาแม่เหล็ก Nd-Fe-B

การพัฒนาแม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นไปอย่างรวดเร็ว เรียกว่าเป็นยุคใหม่ของแม่เหล็กถาวร ค่า $(BH)_{\max}$ ของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ทางทฤษฎีมีค่าสูงถึง 64 MGOe ค่าที่ผลิตใช้งานจริงอยู่ที่ 56 MGOe แต่มีค่า H_c เพียง 9.8 kOe ซึ่งต่ำมาก จึงเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งาน แม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึกที่มีค่า H_c สูงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวร เพราะมีประสิทธิภาพสูงและขับเคลื่อนด้วยพลังงานต่ำ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรมักทำงานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีความต้องการแม่เหล็กที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง แม่เหล็กที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ทำโดยการปรับปรุงค่า T_c และค่า H_c ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงค่า H_c ของแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึก โดยการเติมธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น Al, Ga, Cu, Zn และ Sn และธาตุที่ทนต่อความร้อน เช่น Ti, V, Mo, Zr, Nb และ W โดยธาตุเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการเติมธาตุเหล่านี้ทำให้ค่า M_s ของเฟสหลักลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่า B_r และค่า $(BH)_{\max}$ ลดลง จึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงค่า H_c โดยไม่ส่งผลต่อค่า B_r และค่า $(BH)_{\max}$ การวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็ก Nd-Fe-B นอกจากการปรับปรุงสมบัติแม่เหล็กของ Nd-Fe-B แล้ว ยังมีการปรับปรุงทางด้านสมบัติทางกล ความเสถียรภาพทางความร้อน ความต้านทานการกัดกร่อน และกระบวนการขึ้นรูปของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ควบคู่กันไปด้วย ตัวอย่างเช่น

Velicescu *et al.* (1996) ได้พัฒนาแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึกให้มีค่า $(BH)_{\max}$ สูง โดยการแทนที่ส่วนประกอบของเฟสที่มี Nd มากด้วยเฟสของ RE-(Co-Cu) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยได้เตรียมแม่เหล็กแบบเผาผนึกที่มีส่วนประกอบ $Nd_{13-15.5}Dy_1Co_{3.3}Cu_{0.1-0.5}B_{5-6}Fe_{\text{bal}}$ ด้วยกรรมวิธีโลหะผง การเติม Co และ Cu พร้อมกันในแม่เหล็ก Nd-Dy-Fe-B แบบเผาผนึกช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และค่า $(BH)_{\max}$ เนื่องจากเกิดการแทนที่ของส่วนประกอบที่มี Nd มาก ด้วยเฟส RE-(Co-Cu) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น RECu หรือ RE_3Co พบว่าสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็ก Nd-Dy-Fe-Co-Cu-B ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ B, Cu และ RE การเกิดเฟส $Nd_6Fe_{13}Cu$ เมื่อความเข้มข้นของ B ต่ำกว่า 5.5% แม่เหล็ก $Nd_{13}Dy_1Co_{3.3}Cu_{0.3}B_6Fe_{\text{bal}}$ ให้ค่า $(BH)_{\max}$ 47.6 MGOe แม่เหล็กที่เติม Dy ความเข้มข้นเป็น 0.5-1 at % มีค่า $B_r = 1.35 - 1.43$ T ค่า $H_c = 6.6 - 12.5$ kOe โครงสร้างจุลภาคของ

แม่เหล็กภายในเกรนแสดงการกระจายเป็นเนื้อเดียวกันจะสัมพันธ์กับแม่เหล็ก Nd-Dy-Fe-B ที่ไม่เติม Co และ Cu

Li *et al.* (1999) ได้พัฒนาการใช้ของเหลวเคลือบ ผง Nd-Fe-B โดยการทาอิพอกซี และสารหล่อลื่นไปบนพื้นผิวของอนุภาคผง Nd-Fe-B ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว การทำการเคลือบด้วยของเหลว นำไปสู่การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแม่เหล็กของผงและแม่เหล็กห่อหุ้มผง การเคลือบด้วยของเหลว มีความสามารถในการไหล (Flow ability) ที่ดี มีค่า 29-37 วินาที เมื่อเทียบกับผงห่อหุ้ม (Encapsulate powder) ซึ่งมีค่า 37-45 วินาที และสามารถใช้ในแม่เหล็กแบบบอนด์ที่ต้องการความทนทาน ส่งผลให้แม่เหล็กแบบบอนด์มีความแข็งแรงสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการผสมแบบแห้ง และทฤษฎีการห่อหุ้ม พบว่าแม่เหล็กที่ทำจากผงที่เคลือบด้วยของเหลว มีค่าสูญเสียเชิงโครงสร้างต่ำ ทำให้สรุปได้ว่าชั้นของตัวยึดติดบนชั้นอนุภาคปกป้องผงจากการกัดกร่อนของสิ่งแวดล้อม

Zhao *et al.* (2000) ได้ศึกษาผลของการเติมผง Ag ไปในแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึก พบว่าการเติมผง Ag ทำให้ค่า H_c เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมปริมาณของ Ag จนถึง 0.1 wt% ค่า B_r และค่า $(BH)_{max}$ ไม่เปลี่ยนแปลง และลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเติม Ag จนถึง 0.7 wt% แต่เมื่อการเติมที่มากขึ้น ค่า B_r และค่า $(BH)_{max}$ จะลดลงเนื่องจากความหนาแน่นลดลง ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่าปริมาณออกซิเจนในเฟสที่มี Nd มาก ของแม่เหล็กที่เติม Ag มีค่าสูงกว่าแม่เหล็กที่ไม่เติม Ag การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเฟสที่มี Nd มาก ช่วยเพิ่มสัดส่วนของเฟสที่มี Nd มากในแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึก ที่เติม Ag ทำให้ค่า H_c เพิ่มขึ้น

Cheng *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลของการเติม Ga ต่อสมบัติทางแม่เหล็ก ความมีเสถียรภาพทางความร้อน และโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก $Nd_{16.5}Dy_{16.0}Fe_{53.45}Co_{13.0}B_{1.05}$ แบบเผาผนึกพบว่าเมื่อเติม Ga ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้ค่า H_c เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดสภาพสูญเสียที่ไม่สามารถฟื้นกลับได้ และปรับปรุงค่าสนามแม่เหล็กคงค้างเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น การเติม 0.5 wt% Ga

ทำให้ค่า H_C เพิ่มขึ้นจาก 1232 ถึง 1819 kA/m สภาพสูญเสียที่ไม่สามารถผันกลับได้ หลังจากให้ความร้อน 200 °C เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงลดจาก 33% เป็น 5%

Wu *et al.* (2002) ได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และ โครงสร้างจุลภาคของนาโนคอมโพสิต α -Fe/Nd₂Fe₁₄B โดยเตรียมจากโลหะผสม Nd₈Fe_{87-x}B₅Zr_x (x = 0-5) พบว่าการแทนที่ของ Zr ช่วยเพิ่มค่า H_C จาก 356 kA/m สำหรับ x = 0 เป็น 625.2 kA/m สำหรับ x = 5 แต่ส่งผลให้ค่า B_r ลดลงเมื่อปริมาณของ Zr เพิ่มขึ้นและค่า $(BH)_{max}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตอนแรก และลดลงในเวลาต่อมา

Yu *et al.* (2004) ได้ศึกษาการเติมธาตุ Dy และ Nb ไปในแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็ก และความต้านทานการกร่อน พบว่าค่า H_C ของแม่เหล็กดีขึ้นในขณะที่ค่า B_r ลดลงเป็นผลจากการเติม Dy และเมื่อเติม Dy และ Nb พร้อมกันทำให้ค่า H_C มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่า B_r ไม่ได้ลดลง สมบัติทางแม่เหล็กมีค่าดีสุดเมื่อเติม 1.0% Dy และ 1.5% Nb เข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ Dy และ Nb ยังช่วยปรับปรุงความต้านทานการกร่อนของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ให้ดีขึ้นด้วย

Davies and Liu (2005) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วน Pr : Nd และ RE : Fe ผลการแทนที่ด้วย Co สำหรับ Fe และผลของขนาดผลึกเฉลี่ย (d_g) ต่ออุณหภูมิการจัดเรียงทิศของสปิน (Spin reorientation temperature; T_{sr}) ของเฟส RE₂Fe₁₄B พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ Pr : Nd กับ Co : Fe และการลดลงของ d_g ส่งผลทำให้ค่า T_{sr} ลดลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ RE : Fe นั้นไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อค่า T_{sr} และยังศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของโลหะผสม REFeB ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้อัตราส่วนของ Nd : Pr, RE : Fe และ Fe : Co ในการศึกษา และอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้และค่า d_g ต่อค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า J_r และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า H_C ก็ถูกศึกษาในรูปของความมีเสถียรภาพทางความร้อนโดยพิจารณาจากค่าสภาพสูญเสียแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะผสมนาโนคอมโพสิตนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า J_r ต่ำกว่าโลหะผสมที่เฟสเดียว และมี RE เป็นองค์ประกอบมาก ในขณะที่การแทนที่ด้วย Co สำหรับ Fe มีผลกระทบอย่างมากทำให้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของทั้ง

ค่า J_r และ H_c ลดลง แต่ในทางกลับกันการเพิ่มของค่าอัตราส่วนของ Pr : Nd ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสองค่าดังกล่าว

Shiyan *et al.* (2007) ได้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ เมื่อเติม Zr ของแม่เหล็กนาโนคอมโพสิต $Nd_{10}Fe_{78.5-x}Co_5Zr_xB_{6.5}$ ($x = 0-4$) แบบบอนด์ พบว่า สมบัติทางแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นอาจมีผลจากการเพิ่มสัดส่วนปริมาณของเฟสแม่เหล็ก สมบัติทางแม่เหล็กเมื่อเติม Zr 2.5% พบว่ามีค่า $J_r = 0.689$ T, $H_c = 769.4$ kA/m และ $(BH)_{max} = 84$ kJ/m³ เมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า J_r (α) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า H_c (β) นิยามโดย

$$\alpha(20^\circ\text{C} - T) = \frac{J_r(20^\circ\text{C}) - J_r(T)}{J_r(20^\circ\text{C}) \times (20 - T)} \times 100\%$$

$$\beta(20^\circ\text{C} - T) = \frac{H_c(20^\circ\text{C}) - H_c(T)}{H_c(20^\circ\text{C}) \times (20 - T)} \times 100\%$$

พบว่าเมื่อเติม Zr ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า J_r (α) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่า H_c (β) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Siwu *et al.* (2009) ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปของแม่เหล็กแอนไอโซโทรปิกแบบบอนด์ที่เตรียมโดยการขึ้นรูปแบบอุ่น (Warm compaction) ที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็ก และความมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปมีค่า 110 °C โดยพิจารณาจากความหนืด (Viscosity) ของตัวประสาน เมื่อเพิ่มความดัน ค่าความหนาแน่นของแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อความดันสูงกว่า 700 MPa อนุภาคผงถูกทำลายส่งผลให้สมบัติทางแม่เหล็กลดลง โดยสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็กแบบบอนด์มีค่า $B_r = 0.98$ T ค่า $H_c = 1361$ kA/m และค่า $(BH)_{max} = 166$ kJ/m³ แม่เหล็กชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีมากเพราะมีค่า H_c สูงและค่าสแควร์เนส (S^*) ของเส้นโค้ง ดีแมกนีไตซ์ที่ดี ความหนาแน่นฟลักซ์ของแม่เหล็กแบบบอนด์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

Xiuhai and Weihao (2009) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการเตรียมที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กและสมบัติเชิงกล โดยเตรียมแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบบอนด์ด้วยกระบวนการหล่อแบบอัด (Compression molding) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่น ค่า B_r ค่า H_{cj} ค่า $(BH)_{max}$ แรงดัดโค้ง (Bending strength) และกำลังอัดของแม่เหล็กแบบบอนด์ พบว่าสมบัติทางแม่เหล็กลดลงแต่สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น เมื่อความดันสูงขึ้นทำให้ค่า B_r และค่า $(BH)_{max}$ เพิ่มขึ้น แต่ค่า H_{cj} ลดลง เมื่อกำหนดให้มวลของตัวประสานคงที่ แม่เหล็กแบบบอนด์มีค่าความโค้งและกำลังการอัดสูงสุด ที่ความดัน 620 MPa และอุณหภูมิเทอร์โมเซตติง เป็น 160 °C

Chen *et al.* (2010) ได้ศึกษาผลของการเติม Y ต่อสมบัติทางแม่เหล็ก และวิวัฒนาการเฟสของรีบอบสารประกอบ $Nd_{9-x}Y_xFe_{72}Ti_2Zr_2B_{15}$ ($x = 0, 0.5, 1$, และ 2) พบว่าการเติม Y ช่วยปรับปรุงการเกิดผลึกของโลหะผสม ปริมาณที่เหมาะสมของการเติม Y ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกของเฟส $Nd_2Fe_{14}B$ และปรับปรุงค่า B_r ของตัวอย่างอบอ่อน สมบัติทางแม่เหล็กที่ดีที่สุดมีค่า $J_s = 0.78 T$ ค่า $H_c = 923.4 kA/m$ และค่า $(BH)_{max} = 98.5 kJ/m^3$ ได้จากการสปinning รีบอบด้วยความเร็ว 4 m/s ที่ $x=1$ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตัวอย่างอบอ่อนที่เหมาะสมประกอบด้วยเฟส $Nd_2Fe_{14}B$, α -Fe และเฟสอสัณฐาน ผลที่เกิดขึ้นของการเติม Y ที่มีความเสถียรของเฟสอสัณฐานระหว่างกระบวนการอบอ่อน เฟสอสัณฐานคงค้างช่วยปรับปรุงค่าสแควร์เนซของลูปในจตุภาคที่สองส่งผลในการเพิ่มค่า $(BH)_{max}$ สูงขึ้น และค่า $(BH)_{max}$ น้อยลงเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเพิ่มสูงกว่า 700 °C

Yan *et al.* (2011) ได้ผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีค่า J_H สูง ด้วยกรรมวิธีโลหะผงของแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึก ผลของขอบเขตเกรนบนโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็กก่อนเผาผนึกและแม่เหล็กอบอ่อนและยังศึกษาค่า T_c โดยการเลือกอัตราส่วนประกอบของอะตอมและปริมาณของธาตุโลหะหายากที่เหมาะสม พบว่าแม่เหล็ก Nd-Fe-B แบบเผาผนึกที่มีองค์ประกอบเป็น $Nd_{11.13}Fe_{bal}Tb_{2.67}Dy_{0.61}Co_{1.12}Zr_{0.14}Al_{0.49}Cu_{0.24}B_{6.07}$ (at%) มีค่า H_c สูงโดยมีสมบัติทางแม่เหล็กดังนี้ ค่า $J_H = 36.3 kOe$ ค่า $B_r = 11.7 kGs$ และค่า $(BH)_{max} = 34.0 MGOe$ สัมประสิทธิ์

อุณหภูมิของค่า B_r และของค่า H_c มีค่าเป็น $-0.113 / ^\circ\text{C}$ และ $-0.355 \% / ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ เมื่อวัดที่อุณหภูมิระหว่าง 20 และ $200\text{ }^\circ\text{C}$ และค่า T_c ของแม่เหล็ก Nd-Fe-B มีค่าประมาณ $342\text{ }^\circ\text{C}$

ไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกนอกมีสีเทาดำ ใต้เปลือกมีสีชมพู จนถึงสีแดงหรือสีม่วงอ่อน เปลือกมีความหนาประมาณ 6.5-15.0 มิลลิเมตร ต้นอ่อนมีเปลือกบางกว่าต้นแก่ ชั้นในสุดของลำต้นเป็นเนื้อไม้ที่ค่อนข้างอ่อน เรียกว่า ไม้ (Pith) ถัดออกมาเป็นชั้นเนื้อไม้ (Wood or xylem) ชั้นเยื่อเจริญ (Cambium) เปลือกอ่อน (Soft bark) ซึ่งมีท่อลำเลียงอาหาร เปลือกแข็ง (Hard bark) เยื่อเปลือก (Cork cambium) และเปลือกแข็ง (Cork) ตามลำดับ โดยรอยต่อระหว่างเปลือกอ่อนและเปลือกแข็งมีท่อน้ำยาง (Latex Vessel) ถ้าเราพิจารณาด้านหน้าตัดจะเห็นท่อน้ำยางนี้ต่อกันเป็นวงตามแนวด้านสัมผัส

สมบัติทางกายภาพของไม้ยางพาราที่สำคัญ ได้แก่

1. ความหนาแน่น (Density) เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลสาร (Mass) หรือน้ำหนัก (Weight) ของวัตถุต่อปริมาตร ซึ่งค่ามวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (mass/ volume) เป็นค่าที่แน่นอนกว่าเพราะไม่ขึ้นกับตำแหน่งที่อยู่ของวัตถุนั้นแต่น้ำหนักจะขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ไม้ยางพาราจะมีความหนาแน่นขณะสดที่ความชื้น 60-80% ความหนาแน่น 870-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นที่สภาวะแห้งที่ความชื้น 12% มีค่า 560-700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของวัตถุต่อความหนาแน่นของสารมาตรฐานที่อุณหภูมิจำเพาะ โดยน้ำมีความหนาแน่นสูงสุดที่อุณหภูมิ $4\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นสารมาตรฐานที่ใช้เป็นสากลในการหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุทุกชนิดรวมทั้งไม้ด้วย ที่อุณหภูมินี้ ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและค่าความหนาแน่นของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยลงมาก

3. การหดตัว (Shrinkage) แสดงการลดลงของขนาดของเนื้อไม้ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าจุดหมาด (จุดที่มีน้ำเต็มผนังเซลล์ แต่ภายนอกผนังเซลล์ไม่มีน้ำอยู่เลย) เนื้อไม้จะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อไม้มีความชื้นเหลืออยู่เลย และจะมีขนาดสูงสุดเมื่อมีความชื้นที่จุดหมาด ซึ่งเกิดจากการหดตัวและพองตัวของผนังเซลล์และเมื่อไม้มีความชื้นเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดหมาดก็ไม่มีการเพิ่มขนาดเพิ่มขึ้นอีก เนื้อไม้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างทั้งสามด้าน จึงทำให้เปลี่ยนแปลงขนาดของเนื้อไม้ต่างๆ ไม่เท่ากัน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดในทิศทางตามยาว (Longitudinal) เกิดขึ้นน้อยที่สุด

ไม้แม่เหล็ก

ไม้แม่เหล็ก (Magnetic wood) ถูกค้นพบ และพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Oka และคณะ ในปี ค.ศ. 1991 เพื่อนำไปใช้เป็นบอร์ดแม่เหล็ก บอร์ดนำความร้อน และตัวดูดกลิ่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ศึกษาคุณสมบัติ และพัฒนารูปแบบของไม้แม่เหล็กชนิดต่างๆ อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับไม้แม่เหล็กยังไม่เป็นที่แพร่หลาย โดยสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับไม้แม่เหล็กตามคุณสมบัติต่างๆ ได้ ดังนี้

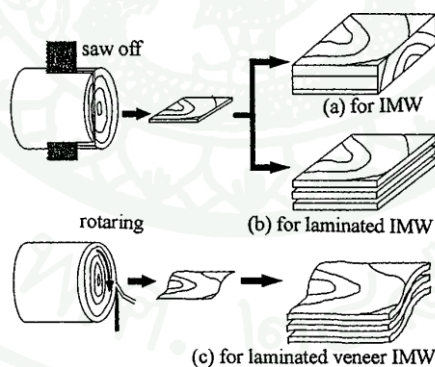
1. สมบัติเชิงความร้อน

ในปี ค.ศ. 1999 Oka *et al.* (1999a) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนแก่ไม้แม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด คือ ชนิดผง ชนิดซึมผ่านและชนิดเคลือบ ซึ่งทำการวัดที่อุณหภูมิ $25.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ความชื้น 45~55% ความถี่ 1 MHz และกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ พบว่าไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบให้ค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวสูงสุดเมื่อใช้ขดลวดแบบ โซเลนอยด์ นอกจากนี้ทำการศึกษาบอร์ดไม้ที่เคลือบด้วยแมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์ ผงแม่เหล็กเซนต์ซัท (Sendust powder) และผงเหล็กบริสุทธิ์ ขนาดเกรนมีค่าน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าบอร์ดไม้ที่เคลือบด้วยผงเซนต์ซัทแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุด และให้ค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีกว่าแบบอื่น ต่อมา Oka *et al.* (1999b) ได้ศึกษาการกระจายตัวของความร้อนบนบอร์ดไม้แม่เหล็กโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนชนิดต่างๆ พบว่าไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบให้ค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวสูงสุด

และการกระจายตัวของความร้อนที่สม่ำเสมอเมื่อใช้ขดลวดแบบเกลียว (Spiral coil) ในปี ค.ศ.2000 Oka *et al.* (2000) ได้มีการนำเสนอบอร์ดความร้อนชนิดผสม (Combination type) ที่มีขดลวดฝังอยู่ในตัวบอร์ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้ความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบอร์ดนำความร้อนชนิดผสมซึ่งประกอบด้วยชั้นที่เคลือบด้วยแม่เหล็กและชั้นขดลวดให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนสูงสุด โดยผลการทดลองสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคแม่เหล็กมีผลต่อค่าสภาพซาบซิมได้ทางแม่เหล็กและค่าการเพิ่มขึ้นของความร้อน (Heating effect)

2. สมบัติเชิงโครงสร้าง

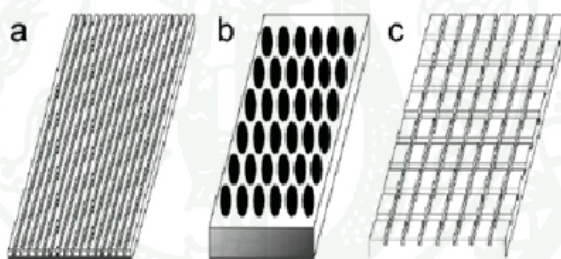
ในปี ค.ศ. 2002 Oka *et al.* (2002) ได้ศึกษาศึกษาโครงสร้างไม้ และทิศทางของไฟเบอร์ในเนื้อไม้ที่มีผลต่อคุณสมบัติของไม้แม่เหล็ก ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของของเหลวแม่เหล็กที่ซึมเข้าไปในเนื้อไม้ แปรตามทิศและความยาวของเส้นใยไม้ ผิวเกรนของไม้และตัวอย่างไม้ที่ทิศของเส้นใยไม่มีทิศเดียวกับทิศทางแม่เหล็กจะให้ค่าแมกนีโตเซนชันและค่าสภาพซาบซิมได้ทางแม่เหล็กสูงกว่า และ Oka *et al.* (2002) ได้มีการตัดแปลงไม้แม่เหล็กชนิดซึมเข้าเนื้อ ไม้ด้วยของเหลวแม่เหล็กที่เตรียมจาก ไม้ที่มีการตัดในแบบต่างๆ โดยนำมาเรียงเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงแผนผังการตัดตัวอย่างแผ่นไม้

ที่มา: Oka *et al.* (2002)

แม่เหล็กชนิดผง โดยวัดค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ขนาดของค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กจะลดลง และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผงไม้เป็นผลให้ปริมาตรเปลี่ยน ส่งผลให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กเปลี่ยน ผลการทดลองนี้มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นบอร์ดคิงดูคแม่เหล็ก บอร์ดนำความร้อน และตัวดูดกลิ่นกลิ่นในอาคาร ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 Oka *et al.* (2007) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการควบคุมการดูดกลิ่นกลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบโดยกระบวนการสร้างร่อง (Grooving process) ในการทดลองนี้ใช้ผงแมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์ร่วมกับโพลีไวนิลอะซิเตทเรซิน (Polyvinyl acetate resin) และน้ำ ผสมกันเกิดเป็นวัสดุเคลือบแม่เหล็ก โดยการบดผงแมงกานีสซิงค์เฟอร์ไรต์และทำให้อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 87 ไมโครเมตร โดยกำหนดอัตราส่วนผงแม่เหล็กต่อปริมาตร 40 % แผ่นเส้นใยไม้ (Fiber wood board) ซึ่งผ่านกระบวนการสร้างร่องบนพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่มีการสร้างร่องแบบ (a) เส้นขนาน (11 เส้น), (b) รูปร่างคอตมันน์ (14x14 คอตมันน์) และ (c) เส้นตาราง (11x11 เส้น)

ที่มา: Oka *et al.* (2007)

การดูดกลิ่นกลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถควบคุมได้ เมื่อเปลี่ยนรูปร่าง ขนาดของพื้นผิวและบอร์ด ไม้แม่เหล็กที่ฝังแบบเส้นตาราง (Grid lines) ให้ปริมาณการดูดกลิ่นกลิ่นมากที่สุด โดยปริมาณผงแม่เหล็กเป็นสัดส่วนกับปริมาณการดูดกลิ่นกลิ่น การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการสร้างร่องสามารถใช้สำหรับควบคุมความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดูดกลิ่นได้ ต่อมา Oka *et al.* (2009) ได้ศึกษาไม้แม่เหล็กที่นำมาเรียงเป็นชั้นๆ โดยใช้ผงเฟอร์ไรต์ และผงสเดนเลส นำมาใช้เป็นวัสดุ

ก่อสร้าง ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับเป็นตัวดูดคลื่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าไม้แม่เหล็กดังกล่าวที่มีอัตราส่วนผงแม่เหล็กต่อปริมาตร 20% อัตราส่วนของผงสแตนเลสต่อผงเฟอร์ไรต์เป็น 2: 3 และความหนาของชั้นแม่เหล็ก 4.0 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติในการดูดคลื่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ 45.18 เดซิเบล ที่ความถี่ 2.62 GHz ซึ่งบอร์คชนิดนี้สามารถใช้ป้องกันการรบกวนคลื่นวิทยุสำหรับระบบไร้สายในอาคาร ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ความถี่ในช่วง 2.4 GHz

การบดผสมแบบเชิงกล

การบดผสมแบบเชิงกล เป็นการผสมกันของผงโลหะ โดยถูกบด การบดใช้เวลานานจนทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาของธาตุในสัดส่วนที่สามารถเกิดเป็นโลหะผสมขึ้นได้ และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนก็จะได้โครงสร้างและคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งการบดผสมแบบเชิงกลประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ได้แก่ วัตถุดิบ ประเภทการบดและกระบวนการต่างๆ ได้แก่

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้สำหรับวิธีการบดเชิงกล อยู่ในรูปของผงโลหะซึ่งจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดของลูกบด เนื่องจากการบดมีจุดประสงค์เพื่อลดขนาดของอนุภาคผงด้วยเวลาเพียงเล็กน้อย บางครั้งในการบดที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวและการบดเปียกหรือการบดแห้ง การบดแบบเปียกทำให้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงมากกว่าเนื่องจากโมเลกุลของสารละลายจะช่วยดูดซับการฟอร์มผิวหน้าใหม่ของอนุภาค และช่วยให้อัตราการเกิดออสเทนไรต์เร็วกว่าการบดแห้ง แต่การบดเปียกจะทำให้มีปัญหาในเรื่องของการมีสิ่งเจือปนเพิ่มขึ้น

2. ประเภทของการบด

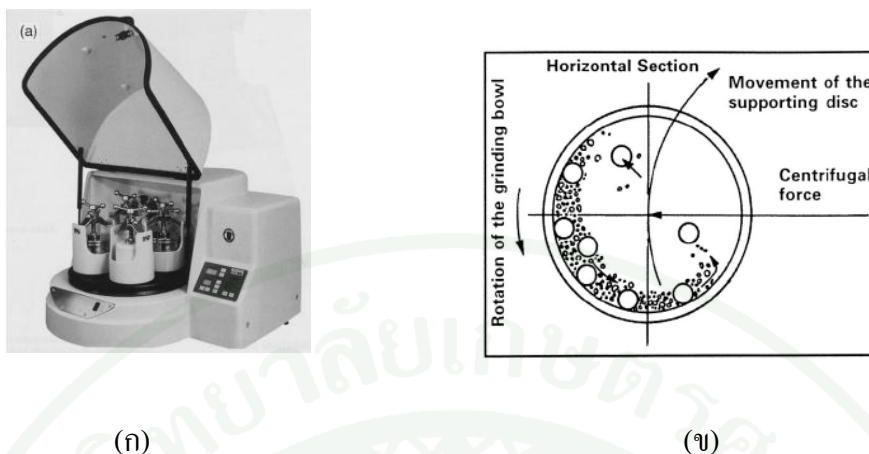
อุปกรณ์ของกระบวนการการบดแบบใช้พลังงานสูง มีความแตกต่างในส่วนของคุณสมบัติประสิทธิภาพของการบดและการเพิ่มการจัดการในส่วนเริ่มต้น ความร้อน และอื่นๆ จึงแบ่งเครื่องบดเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.1 การบดแบบสเปกซ์ (SPEX shaker mills)

การบดแบบสเปกซ์ เป็นการบดโดยใช้หลักการสั่น ซึ่งในการบดแต่ละครั้งจะใช้สารประมาณ 10-20 กรัม ปกติจะนิยมใช้ในห้องทดลองและสำหรับการคัดเลือกโลหะ โดยจะมีหม้อบดเพียงอันเดียวซึ่งภายในจะบรรจุผงโลหะที่ต้องการบดและลูกบด ซึ่งจะมีเหล็กยึดติดไว้เพื่อป้องกันการหลุดและแกว่งของฝา พลังงานของการสั่นจะหลายเท่าต่อนาที การเคลื่อนที่ของหม้อบดจะสั่นขึ้นลง ทำให้ลูกบดเกิดการกระทบกับผงโลหะที่บริเวณส่วนล่างของหม้อบด ทำให้เกิดการผสมกันและเกิดการบดด้วยความถี่ในการขึ้นลงประมาณ 5 เซนติเมตร และความเร็วประมาณ 1200 รอบต่อนาที ความเร็วของลูกบดประมาณ 5 เมตรต่อนาที ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทบของลูกบดสูง

2.2 การบดแบบเพลเนททารีบอล (Planetary ball mill)

การบดแบบเพลเนททารีบอล สามารถบดสารในแต่ละครั้งในปริมาณ 200-300 กรัม เครื่องบดแบบเพลเนททารีบอล แสดงดังภาพที่ 10 (ก) หลักการทำงานจะเป็นการเคลื่อนที่โดยการหมุนรอบจุดรองรับของจาน โดยภายในจะบรรจุผงโลหะและลูกบด ดังนั้นหม้อบดและจุดรองรับของจาน จะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้าม ในขณะที่ลูกบดจะวิ่งขึ้นลงตามผนังของหม้อบด เรียกว่า ผลของแรงเสียดทาน โดยสารที่อยู่ข้างล่างและลูกบดจะเกิดการเคลื่อนที่อิสระตามผนังด้านในของหม้อบดทำให้เกิดการชนกันตามผนังด้านใน ดังภาพที่ 10 (ข)

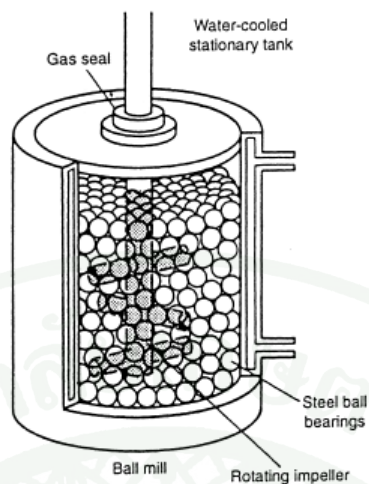


ภาพที่ 10 (ก) เครื่องบดเพลาเนททารีบอล (ข) แผนผังแสดงการเคลื่อนที่ของลูกบดภายในหม้อบด

ที่มา: Suryanarayana (2001)

2.3 การบดแบบแอดทริเตอร์ (Attritor mills)

การบดแบบดั้งเดิมเป็นการบดในลักษณะของถังบดจะหมุนในแนวนอน โดยภายในจะบรรจุลูกบดเล็ก ๆ ในปริมาณครึ่งหนึ่งของถังบด (Drum) การหมุนของถังบดจะทำให้ลูกบดตกลงบนผนังโลหะที่อยู่ด้านล่าง อัตราในการบดจะเพิ่มขึ้นด้วยความเร็วในการหมุน ที่ความเร็วสูงแรงเหวี่ยงของลูกบดที่เกิดขึ้นจะมีมากกว่าแรงโน้มถ่วงและลูกบดจะหมุนตามผนังตลอดเวลาทำให้ไม่มีการบดเกิดขึ้น สำหรับแอดทริเตอร์ซึ่งให้พลังงานในการบดที่สูง ประกอบด้วยถังบดซึ่งอยู่ในแนวตั้งภายในจะมีแกนที่หมุนเพื่อทำให้ลูกบดและผนังโลหะเกิดการกววน ขนาดของอนุภาคโลหะจะลดลงได้เนื่องจากเกิดแรงกระแทกระหว่างลูกบดและผนังของถังบดหรือระหว่างลูกบด พบว่าขนาดที่ลดลงเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคและการสไลด์ของลูกบดแอดทริเตอร์จะเป็นการบดในปริมาณที่มากประมาณ 0.5-40 กิโลกรัม ความเร็วของลูกบดจะต่ำประมาณ 0.5 เมตรต่อวินาที หลักการทำงานผนังโลหะจะถูกใส่เข้าไปในถังบดรวมทั้งลูกบด การผสมจะเกิดขึ้นเมื่อการกววนของแกนซึ่งมีลักษณะเป็นแกน โดยหมุนด้วยความเร็วประมาณ 250 รอบต่อวินาที จะทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงกระแทก



ภาพที่ 11 ลักษณะการหมุนของแกนในเครื่องบดแอตทริเตอร์

ที่มา: Suryanarayana (2001)

3. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดผสมแบบเชิงกล

การควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการบดผสมแบบเชิงกลเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของโครงสร้างและเฟสที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการบดเชิงกล ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยดังนี้

3.1 ประเภทของการบด

เครื่องบดแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันในด้านปริมาณความจุ ความเร็วในการบดและการควบคุมอุณหภูมิในขณะที่ทำการบด โดยควรมีสั่งเจือปนน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของผงที่นำมาบด ปริมาณของผงและโลหะผสมสุดท้ายที่ต้องการ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกให้เหมาะสม

3.2 ภาชนะบรรจุในการบัด

วัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุในการบัดเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเกิดการกระแทกกระท่างระหว่างลูกบดกับผนังด้านในของภาชนะบรรจุ ทำให้วัสดุที่ใช้ทำลูกบดออกมาผสมกับผงที่ต้องการบัด ทำให้เกิดสิ่งเจือปนกับผงบดและยังทำให้ผงบดเกิดการเปลี่ยนทางเคมี

3.3 ความเร็วในการบัด

ถ้าความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้นในกรณีทั่วไปจะทำให้ความเร็วของลูกบดเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อความเร็วมากกว่าความเร็ววิกฤต ลูกบดจะติดกับผนังของหม้อบดตลอดเวลา ทำให้ลูกบดไม่เกิดแรงกระแทกกับผงบด ดังนั้นความเร็วสูงสุดจะต้องต่ำกว่าความเร็ววิกฤตเพื่อให้ลูกบดตกลงจากจุดสูงสุดลงบนผงบด ทำให้เกิดการชนกัน ในขณะที่ความเร็วในการบัดสูงมากจะทำให้อุณหภูมิภายในหม้อบดสูงตามไปด้วย การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจจะมีผลดี คือในกรณีของการแพร่ทำให้เกิดการเป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นโลหะผสมของผง แต่การที่มีอุณหภูมิสูงก็มีผลเสียเช่นกัน เนื่องจากการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ไปเร่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงและเป็นให้เกิดการแตกตัวของสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด หรือเกิดการฟอร์มเฟสกึ่งเสถียร (Metastable phase) ในขณะที่ทำการบัด

3.4 เวลาในการบัด

เวลาในการบัดเป็นปัจจัยที่สำคัญมากโดยปกติเวลาในการอนุภาคของผง จะต้องอยู่ระหว่างสถานะแตก (Fracture) และการรวมแบบเย็น (Cold welding) เวลาของการบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องบัดที่ใช้ ความเร็วในการบัด อัตราส่วนระหว่างลูกบดต่อน้ำหนักของโลหะและอุณหภูมิของการบัด ถ้าเวลาในการบัดยาวนานเกินไปจะทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในการบัดจะต้องใช้เวลาที่เหมาะสมและไม่ยาวนานเกินไป

3.5 ลูกบด

วัสดุที่นิยมนำมาใช้ลูกบด ได้แก่ เหล็กกล้าชนิดต่างๆ และโลหะผสมของ Co กับ ทังสเตนคาร์ไบด์ ความหนาแน่นของลูกบดจะต้องสูงพอที่จะทำให้ลูกบดมีแรงกระแทกลงบนผง ขนาดของลูกบดก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการบัดด้วย ถ้าลูกบดมีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงทำให้มีน้ำหนักของลูกบดมาก ส่งผลให้การส่งถ่ายพลังงานในการกระแทกไปยังอนุภาคผงโลหะมากขึ้นตามไปด้วย

3.6 อัตราส่วนน้ำหนักลูกบดต่อผงโลหะ (BPR)

อัตราส่วนน้ำหนักรวมของลูกบดต่อผงโลหะ (BPR) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของปริมาณทั้งหมดที่จะทำการบด (Charge ratio, CR) โดยจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการบด ปริมาณความแตกต่างของ BPR ที่ต่ำๆ คือ 1:1 จนถึงปริมาณสูงคือ 220:1 ปกติแล้วอัตราส่วน 10:1 จะใช้กับการบดในปริมาณที่น้อย

3.7 ปริมาณของลูกบดและผงที่จะเติมเข้าไปในหม้อบด

โลหะผสมเกิดขึ้นจากการกระแทกกันของลูกบดกับอนุภาคผงโลหะ ซึ่งจะต้องมีพื้นที่ว่างเพียงพอระหว่างลูกบดกับอนุภาคผงโลหะ เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระภายในหม้อบด ถ้าปริมาณของลูกบดและผงโลหะน้อยมาก ทำให้อัตราของผงโลหะที่ได้จากการบดน้อยลง ในขณะที่ถ้าปริมาณมากทำให้ไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับให้ลูกบดเคลื่อนที่ได้และยังทำให้พลังงานในการกระแทกน้อยลง ซึ่งปกติแล้วจะใส่ลูกบดและผงโลหะประมาณ 50% ของพื้นที่ของหม้อบด

3.8 บรรยากาศของการบด

บรรยากาศในการบดจะมีอิทธิพลมากต่อการเกิดเฟสที่ไม่ต้องการหรือสิ่งเจือปนอื่นในผงได้ ดังนั้นจะต้องควบคุมบรรยากาศในขณะที่ทำการบด โดยการเติมก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือฮีเลียม เข้าไปภายในหม้อบด แต่สำหรับในโตรเจนจะเกิดการทำปฏิกิริยากับผงบดและไม่สามารถป้องกันการเกิดเฟสที่ไม่ต้องการหรือสิ่งเจือปน

3.9 ตัวควบคุมกระบวนการ (Process Control Agents; PCA)

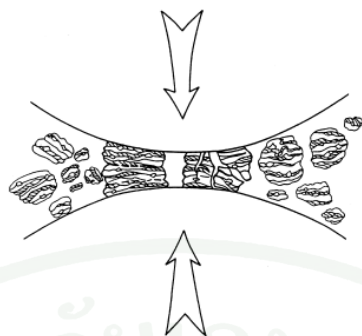
ปกติแล้วอนุภาคผงโลหะจะเกิดการรวมแบบเย็นในขณะที่บด โดยเฉพาะถ้าเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูง จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างมาก ซึ่งจะถ้าเป็นโลหะผสมนั้นการเกิดการรวมแบบเย็นและการแตก จะเกิดขึ้นกันระหว่างอนุภาคเท่านั้น PCA จะเกี่ยวข้องกับสารหล่อลื่นหรือสารลดความตึงผิว ซึ่งจะเติมลงไปผสมกับผงโลหะในระหว่างการบด เพื่อลดการเกิดการรวมกันแบบเย็นโดย PCA จะมีลักษณะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ โดยมากจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ทำหน้าที่ตัวจับที่ผิวหน้า (Surface-active agent) ซึ่ง PCA จะเคลือบบนผิวหน้าของอนุภาคผงโลหะ และลดการเกิดการรวมแบบเย็นระหว่างอนุภาคผงโลหะและช่วยไม่ให้เกิดรวมกันเป็นกลุ่มก้อน

3.10 อุณหภูมิของการบัด

อุณหภูมิของการบัดจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการบัดและยังมีอิทธิพลต่อการเกิดเป็นโลหะผสม โดยเฉพาะกระบวนการแพร่ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะผสม หรือทำให้คุณสมบัติสุดท้ายที่ได้จะเป็นสารละลายของแข็งที่มีโครงสร้างนาโนหรือโครงสร้างอสัณฐาน ซึ่งการพอร์มนั้นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน การควบคุมอุณหภูมิในการบัดสามารถทำได้โดยใช้ในโตรเจนเหลวเพื่อระบายความร้อนในกรณีที่ต้องการลดอุณหภูมิหรือใช้ไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนกับ ภาชนะที่ใส่เมื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิ

4. กลไกการเกิดโลหะผสม

ในระหว่างการบัดอนุภาคผงโลหะจะเกิดลักษณะปรากฏการณ์ของการรวมแบบเย็น การแตก และการรวมกันใหม่ (Re-welding) เมื่อลูกบดโลหะ 2 ลูกเกิดการชนกันระหว่างผงโลหะกับลูกบด ซึ่งปริมาณของผงโลหะตรงบริเวณที่เกิดการชนประมาณ 1000 อนุภาค โดยคิดเป็นน้ำหนักรวมกันประมาณ 0.2 มิลลิกรัม ดังภาพที่ 12 แรงของการกระแทกทำให้ผงโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการทำให้แข็งขึ้น (Hardening) และการแตก เกิดเป็นผิวหน้าใหม่ ทำให้เกิดการเชื่อมติดกันและทำให้ขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น การเกิดในลักษณะนี้ถ้าเป็นวัสดุจำพวกวัสดุเหนียวเหนียว หรือ วัสดุเหนียวเปราะ อาจทำให้มีแนวโน้มที่จะเชื่อมติดกันมากขึ้น และเกิดการพอร์มเป็นอนุภาคที่ใหญ่ โดยจะมีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 3 เท่าของอนุภาคเริ่มต้นและเป็นลักษณะชั้นที่ประกอบด้วยการผสมของส่วนผสมเริ่มต้น เมื่อการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ อนุภาคจะเกิดเป็นลักษณะของการทำให้แข็งขึ้น และการแตก โดยเกิดจากความล้า (Fatigue failure) หรือเกิดขึ้นโดยผงโลหะแตกออกเป็นขนาดเล็ก ๆ ซึ่งส่วนที่เกิดแตกออกเป็นขนาดเล็ก ๆ จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ที่สถานะนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกมากกว่าที่จะเกิดการรวมกันแบบเย็น แรงกระแทกที่เกิดจากลูกบดจะทำให้ผงโลหะดีขึ้น แต่มีขนาดเท่าเดิมตลอด ในขณะที่พื้นที่ระหว่างชั้น ลดลง แต่จำนวนชั้นในอนุภาคเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 12 การชนกันระหว่างอนุภาคโลหะกับลูกบิด ในการบดผสมแบบเชิงกล

ที่มา: Suryanarayana (2001)

ถ้าทำการบดที่ยาวนานขึ้นการเกิดภาวะสมดุลอย่างสม่ำเสมอ (Steady - state equilibrium) จะเกิดขึ้นเมื่อมีความสมดุลระหว่างอัตราการเกิดการรวมกัน ก็คือมีแนวโน้มที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นกับอัตราการเกิดการแตกที่ทำให้ขนาดอนุภาคลดลง และพบอีกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงการเกิดการแตกจะเกิดการเชื่อมติดกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่างเล็กและใหญ่ปนกัน ที่สถานะนี้แต่ละอนุภาคจะประกอบไปด้วยส่วนผสมเริ่มต้นในสัดส่วนที่ผสมเข้าด้วยกันและอนุภาคจะเกิดความแข็งที่อิ่มตัว (Saturation hardness) ที่เกิดจากการสะสมของพลังงานความเครียด (Strain energy) การกระจายตัวของขนาดในสถานะนี้จะอยู่ในช่วงแคบๆ เพราะว่าอนุภาคโดยเฉลี่ยที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดเล็กลงในอัตราที่เท่ากัน ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ จะเกิดการเกาะกันเป็นก้อน

จากที่กล่าวมาแล้วการบดผสมแบบเชิงกลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในอนุภาคจะแสดงโดยเกิดเป็นการบกพร่องของผลึก เช่น การเลื่อนตำแหน่ง (Dislocation) การเกิดช่องว่าง (Vacancies) การเข้ากลุ่มผิด (Stacking fault) และจำนวนขอบเกรนเพิ่มขึ้น การเกิดลักษณะนี้จะทำให้ความสามารถในการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในโครงสร้างพื้นสูงขึ้น และทำให้ระยะทางในการแพร่ลดลง รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ทำการบดก็ช่วยเสริมพฤติกรรมการแพร่และการเกิดโลหะผสมอาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องบางครั้งอาจจะเกิดโดยการอบผงโลหะที่ผ่านการบดผสมแบบเชิงกล

เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating-Sample Magnetometer; VSM)

เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่างหรือ VSM ใช้หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแม่เหล็กตามกฎของฟาราเดย์ ที่กล่าวว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ที่เชื่อมต่อกับขดลวด ถ้าขดลวดมี n รอบ พื้นที่ภาคตัดขวาง a ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$V = -na \frac{dB}{dt}$$

ถ้าขดลวดถูกวางในสนามแม่เหล็กที่คงที่ จะได้

$$B = \mu_0 H$$

แต่เมื่อตัวอย่างซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชัน M อยู่ในขดลวด จะได้

$$B = \mu_0 (H + M)$$

จะได้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\Delta B = \mu_0 M$$

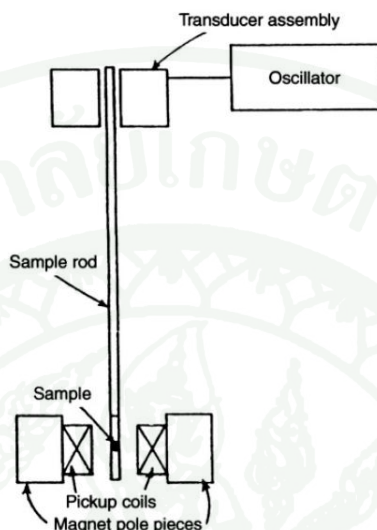
ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีค่าเป็น

$$V dt = -na\mu_0 M$$

จากสมการข้างบนสามารถอธิบายได้ว่าสัญญาณที่ได้จากขดลวดตรวจจับ (Pick-up coil) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแมกนีไทเซชันของสารแต่ไม่ขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็ก

ในการวัดค่าแมกนีไทเซชันด้วยเครื่อง VSM สารตัวอย่างมีการสั่นขึ้นลงด้วยความถี่ v และสอดคล้องกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตรวจจับ สัญญาณที่ออกมาจากขดลวดตรวจจับเหล่านี้มีความถี่เดียวกัน โดยจะพบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าโมเมนต์

แม่เหล็กของตัวอย่าง ขนาดแอมพลิจูดของการสั่น และความถี่ การวัดค่าด้วยเครื่อง VSM ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงการวัดค่าด้วยเครื่อง VSM

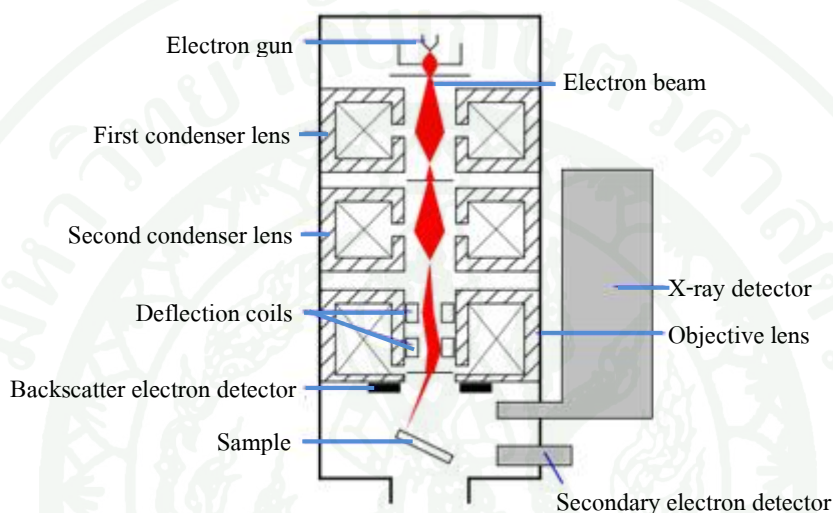
ที่มา: Buschow (2003)

สารตัวอย่างบรรจุในแท่งทรงกระบอกยาวที่เรียกว่า ที่ยึดจับตัวอย่าง (Sample holder) ถูกวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กส่งผ่านอยู่ตลอดเวลา โดยสนามแม่เหล็กนี้ถูกสร้างขึ้นและควบคุมโดยชุดแม่เหล็กไฟฟ้า ที่อยู่ด้านข้าง เมื่อสารตัวอย่างอยู่ในสนามแม่เหล็กจะถูกแมกนีไทซ์ โดยสารตัวอย่างที่ถูกแมกนีไทซ์นี้จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านขดลวดตรวจจับในขณะที่สารตัวอย่างถูกบังคับให้มีการสั่นขึ้นลงด้วยความถี่สูง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กกับเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กกับเวลานี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นในขดลวดและถูกนำมาใช้ในการหาค่าแมกนีไทเซชันของสารตัวอย่าง

เครื่อง VSM จะตรวจวัดและแสดงสมบัติของเหล็กของวัสดุด้วยฮิสเตอร์ิซิสลูประหว่าง M กับ H หรือ B กับ H ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุได้

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM มีส่วนประกอบและลักษณะการทำงานแสดงไว้ในภาพที่ 14

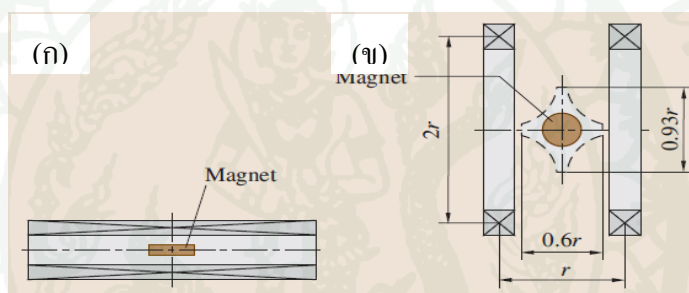


ภาพที่ 14 แสดงแผนภาพการทำงานของ SEM

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อยู่ตำแหน่งบนสุดจ่ายอิเล็กตรอนและถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงด้วยสนามไฟฟ้าตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุดหรือมากกว่าเพื่อรวบรวมลำอิเล็กตรอน และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด (Aperture) เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรกจะทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม ทำให้มีอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านและอิเล็กตรอนที่กระเจิงเข้าหัววัด และแปรผลออกมาเป็นภาพ

3. การวัดโมเมนต์แม่เหล็ก

ขดลวดเฮล์มโฮลต์ (Helmholtz-coil) ใช้ทั่วไปในการวัดโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก (Magnetic dipole moment) ของแม่เหล็กถาวร ซึ่งขดลวดจะมีความไวต่อสิ่งกระตุ้นที่สม่ำเสมอในบริเวณกว้าง ในการวัดขดลวดเฮล์มโฮลต์ถูกเชื่อมต่อกับฟลักซ์มิเตอร์ สารตัวอย่างที่เป็นแม่เหล็กถูกวางในตำแหน่งตรงกลางของคอยล์ ดังนั้นเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำถูกปรับให้อยู่แนวเดียวกับแกนของคอยล์ ฟลักซ์มิเตอร์ถูกกำหนดค่าให้เป็นศูนย์และแม่เหล็กถูกนำออกจากขดลวดทราบเท่าที่การอ่านค่าของฟลักซ์มิเตอร์เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 15 แสดงขดลวดที่ใช้วัดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) โซเลนอยด์ (ข) ขดลวดเฮล์มโฮลต์

ที่มา: Czichos et al. (2006)

ค่าโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก m ของตัวอย่างเป็นส่วนโดยตรงกับฟลักซ์แม่เหล็ก Φ ที่ถูกวัดได้

$$m = k\Phi$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ซึ่งคำนวณจากขนาดและจำนวนรอบ n ของขดลวด สำหรับขดลวดเฮล์มโฮลต์ ค่า k มีค่าประมาณ $1.4 r/n$ เมื่อ r คือรัศมีของขดลวด

จากโมเมนต์ขั้วคู่ ค่าแมกนีไทเซชันสามารถหาได้จากสมการ

$$M = \frac{m}{V}$$

เมื่อ M คือ ค่าแมกนีไทเซชันของตัวอย่าง

m คือ ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของตัวอย่าง

V คือ ปริมาตรของตัวอย่าง

จะเห็นว่าค่าแมกนีไทเซชันมีค่าแปรผันตรงกับค่าโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวอย่าง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมไม้แม่เหล็ก

1.1 แม่เหล็กนีโอดีเมียม-ไอออน-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงแท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B

1.2 แผ่นไม้ยางพารา ขนาด $40 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$ ดังภาพที่ 17 ซึ่งผ่านการเก็บไว้ภายใต้ อุณหภูมิที่ควบคุม 20°C และความชื้น 65% จนกระทั่งมีปริมาณความชื้นที่สมดุลซึ่งมีค่าประมาณ 12%



ภาพที่ 17 แสดงแผ่นไม้ยางพารา ขนาด $20 \times 40 \times 8 \text{ mm}^3$

1.3 เลกเกอร์

1.4 เลื่อยจตุรพร้อมใบมีด

1.5 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB104-5 ดังภาพที่ 18 ผลิตโดยบริษัท

Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 110 กรัม ความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม
จอแสดงผลแบบ LCD ความต่างศักย์ 8-14.5 โวลต์ ความถี่ 50/ 60 เฮิร์ต



ภาพที่ 18 แสดงเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

1.6 เครื่องบดเพเลททาร์บอล รุ่น PM 100 ดังภาพที่ 19 ผลิตโดยบริษัท Retch ประเทศเยอรมนี ประกอบด้วยภาชนะที่บรรจุทำจากสแตนเลส ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และถูกบดทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สามารถบดสารในแต่ละครั้งปริมาณสูงถึง 300 กรัม



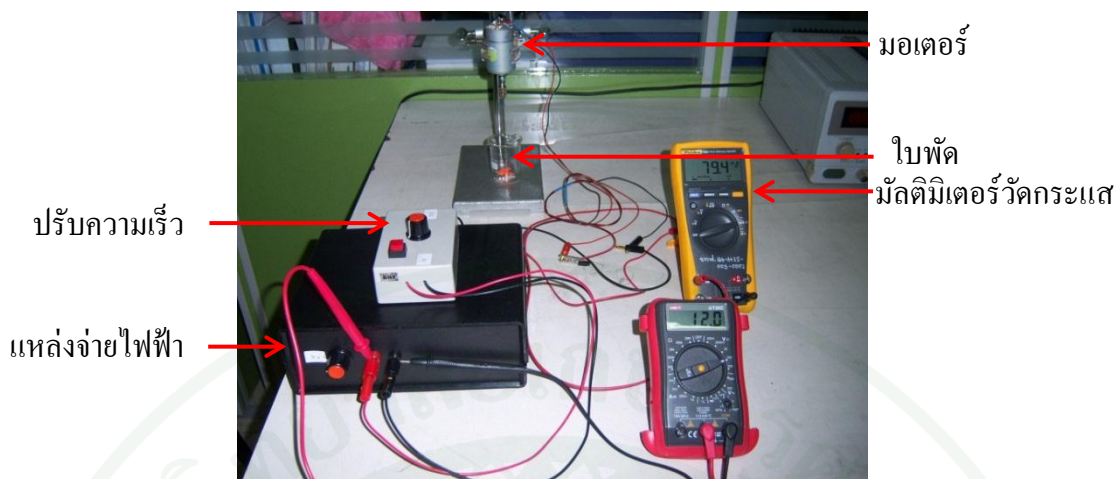
(ก)



(ข)

ภาพที่ 19 แสดงเครื่องบดเพลาเนททาร์บอล รุ่น PM 100 (ก) ภายนอก (ข) ภายใน

1.7 ชุดอุปกรณ์การคนสาร ดังภาพที่ 20 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตัวปรับความเร็ว รอบ มอเตอร์ มัลติมิเตอร์ ไขควง บีกเกอร์ ขาดัง ในการทดลองใช้ความต่างศักย์ 12 โวลต์ กระแสไฟฟ้า ประมาณ 50 มิลลิแอมแปร์ ทำให้มอเตอร์มีความเร็วในการหมุน 125 รอบต่อนาที



ภาพที่ 20 แสดงชุดอุปกรณ์การคนสาร

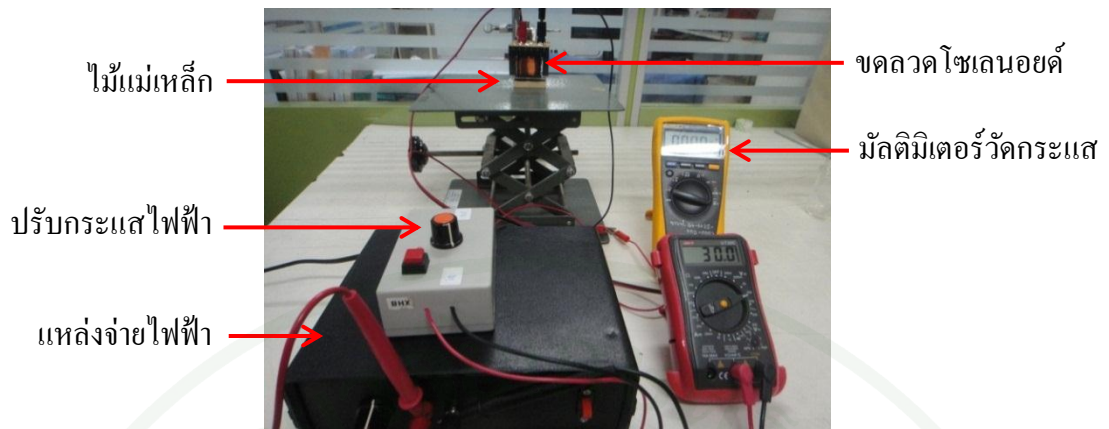
2. อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์แม่เหล็ก

2.1 เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง หรือ VSM ดังภาพที่ 21 เป็น In-house VSM มีอัตราการสั่น 42 Hz ให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด 10 kOe สามารถวัดค่าแมกนีโตเซชันได้ 10^{-3} emu



ภาพที่ 21 แสดงเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่นตัวอย่าง (VSM)

2.2 ชุดอุปกรณ์วัดการดูดติด ดังภาพที่ 22 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตัวปรับกระแสไฟฟ้า ขดลวดโซเลนอยด์ มัลติมิเตอร์ ใช้ความต่างศักย์ 30 โวลต์ วัดค่ากระแสไฟฟ้าน้อยสุดที่ใช้ในการดูดติดแม่เหล็ก โดยระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับขดลวด 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 22 แสดงชุดอุปกรณ์วัดการดูดติดไม้แม่เหล็ก

2.3 เครื่องวัดโมเมนต์แม่เหล็ก โดยต่อฟลักซ์มิเตอร์ รุ่น 480 ดังภาพที่ 23 (ก) เข้ากับขดลวดเฮล์มโฮลต์ FH-2.5 ดังภาพที่ 23 (ข) วางวัสดุที่เป็นแม่เหล็กระหว่างขดลวดในแนวเดียวกับแกนของขดลวดและหมุน 180 องศา อ่านค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) ของตัวอย่างจากฟลักซ์มิเตอร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 แสดงชุดการวัดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) ฟลักซ์มิเตอร์ รุ่น 480 (ข) ขดลวดเฮล์มโฮลต์ FH-2.5

2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400 ผลิตโดยประเทศสาธารณรัฐเชก ดังภาพที่ 24 สามารถเลือกสภาวะการทดสอบได้ทั้งสภาวะสุญญากาศสูง $< 1.3 \times 10^{-2}$ Pa สภาวะสุญญากาศต่ำ 10-30 Pa และสภาวะใกล้ความดันบรรยากาศ 130 - 2600 Pa กำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า ความต่างศักย์ 15 kV AC ความถี่ 50 Hz



ภาพที่ 24 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

วิธีการ

1. เตรียมผง Nd-Fe-B เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุเคลือบ

1.1 นำแท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีลักษณะเป็นแท่ง ดังภาพที่ 25 (ก) ลอกโครเมียมออกแล้ว ทบด้วยค้อนจนได้ผงแม่เหล็กที่มีการกระจายขนาดอนุภาคเล็กใกล้เคียงกัน ซึ่งสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังภาพที่ 25 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 25 แสดง (ก) แท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B ก่อนทบ และ (ข) ผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B หลังทบ

1.2 แบ่งผง Nd-Fe-B ที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 ออกเป็น 7 ส่วน โดยชั่งน้ำหนักแต่ละส่วนให้ได้ประมาณเท่าๆ กัน จากนั้นนำผง Nd-Fe-B แต่ละส่วนไปบดด้วยเครื่องบดเพลเนททารีบอล เพื่อแยกอนุภาคที่มีการเกาะติดกันเป็นก้อนและลดขนาดของอนุภาค โดยใช้สภาวะของการบดแต่ละส่วนเหมือนกัน ดังนี้

- หม้อบดขนาด 250 มิลลิลิตร
- ลูกบดขนาด 20 มิลลิเมตร จำนวน 4 ลูก โดยมีอัตราส่วนผงเหล็ก : ลูกบด เป็น 1:1
- ความเร็วรอบในการบด 300 รอบต่อนาที
- เวลาบด 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที



(ก)



(ข)

ภาพที่ 26 แสดง (ก) ผง Nd-Fe-B ก่อนบด (ข) ผง Nd-Fe-B หลังบด

1.3 นำผง Nd-Fe-B ที่เตรียมได้จากข้อ 1.2 ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

1.3.1 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กโดยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสันตัวอย่าง (VSM)

นำผงแม่เหล็กบางส่วน ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM โดยจ่ายสนามแม่เหล็กสูงสุด 8 kOe

1.3.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง ด้วยเครื่อง SEM โดยทดสอบที่สภาวะสุญญากาศสูง (High vacuum) ความต่างศักย์ 15 kV กำลังขยาย 5,000 เท่า ตัวอย่างละ 5 ภาพ และกำลังขยาย 10,000 เท่า ตัวอย่างละ 1 ภาพ

1.3.3 วัดขนาดผง Nd-Fe-B โดยใช้โปรแกรมอิมเมจ-เจ (Image-J)

นำภาพ SEM ที่ได้จากข้อ 1.3.2 มาวัดขนาดผง Nd-Fe-B โดยใช้โปรแกรมอิมเมจ-เจ โดยแต่ละภาพเลือกวัดขนาดผงที่เล็กที่สุดและขนาดใหญ่ที่สุด อย่างละ 3 ก้อน แล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อดูช่วงขนาดผง Nd-Fe-B ที่ได้เมื่อเวลาบดผงต่างกัน

2. การเตรียมไม้มแม่เหล็ก Nd-Fe-B ชนิดเคลือบ

2.1 เตรียมวัสดุเคลือบโดยนำผง Nd-Fe-B ที่เตรียมได้จากการบดด้วยเครื่องบดเพลมณฑารีบอล ที่ผ่านการบดนาน 130, 180 และ 300 นาที ผสมกับเลกเกอร์ โดยแปรค่าอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาณเลกเกอร์ (Nd-Fe-B %w/v) เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยใช้ชุดอุปกรณ์การคนสารที่สร้างขึ้น ดังภาพที่ 27 (ก) จะได้วัสดุเคลือบดังภาพที่ 27 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 27 แสดง (ก) การเตรียมวัสดุเคลือบด้วยอุปกรณ์การคนสาร (ข) วัสดุเคลือบที่เตรียมได้

2.2 ใช้แปรงทาวัดถูเคลือบลงบนไม้ยางพาราขนาด $40 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$ ทิ้งไว้ให้แห้ง ใต้ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แสดงไม้แม่เหล็กโดยวัสดุเคลือบใช้ผง Nd-Fe-B ที่เวลาอบ 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20%

2.3 นำไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

2.3.1 ทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก

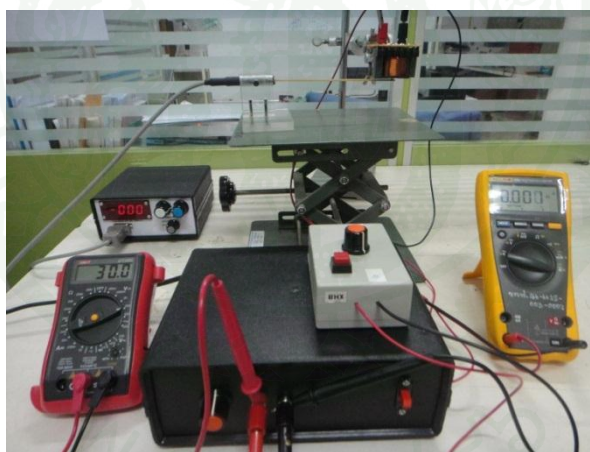
ในการทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็กโดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ โดยมีขั้นตอนการสร้างขดลวดโซเลนอยด์และทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก ดังนี้

2.3.1.1 สร้างขดลวดโซเลนอยด์ โดยพันลวดทองแดงเบอร์ 28 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.376 มิลลิเมตร รอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัว E เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 29



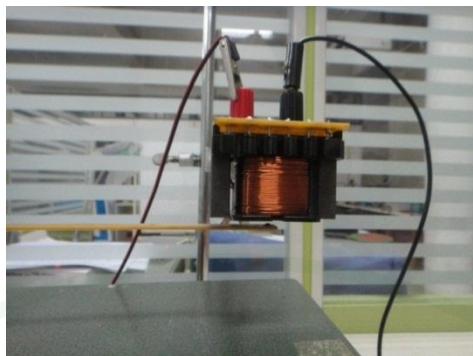
ภาพที่ 29 แสดงขดลวดโซเลนอยด์ที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก

2.3.1.2 ต่ออุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวด ดังภาพที่ 30 อ่านค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์ที่สร้างขึ้นด้วยเทสลามิเตอร์



ภาพที่ 30 แสดงชุดอุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวด

2.3.1.3 ปรับค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์ แปรค่ากระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ วัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใจกลางของคอล์ยรูปตัว E โดยนำหัววัดของเทสลามิเตอร์วางที่ระยะห่าง 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 31 อ่านค่าสนามแม่เหล็กและบันทึกผล

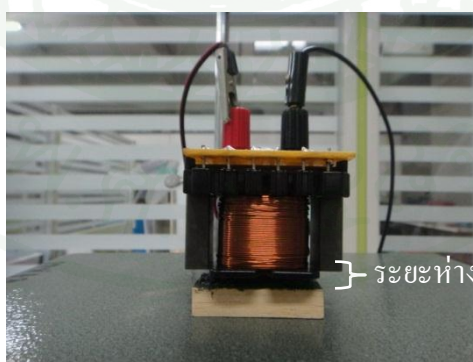


ภาพที่ 31 แสดงตำแหน่งการวางหัววัดในการวัดสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวด

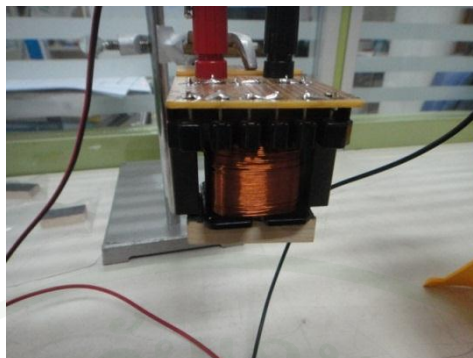
2.3.1.4 นำค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดที่ระยะห่างต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้ามาเขียนกราฟ

2.3.1.5 ทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ โดยต่ออุปกรณ์ชุดทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก

2.3.1.6 หาค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติดไม้แม่เหล็ก โดยแปรค่าระยะห่างระหว่างไม้แม่เหล็กกับขดลวด เป็น 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 32 และการดูดติดของไม้แม่เหล็กกับขดลวด เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ขดลวด แสดงดังภาพที่ 33



ภาพที่ 32 แสดงระยะห่างระหว่างไม้แม่เหล็กกับขดลวด



ภาพที่ 33 แสดงการดูดติดของไม้แม่เหล็กกับขดลวด

2.3.1.7 นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาตรเลกเกอร์ (Nd-Fe-B% w/v) และกระแสไฟฟ้าน้อยสุดที่ใช้ในการดูดติด ที่ระยะห่างระหว่างไม้แม่เหล็กกับขดลวด ต่างๆ กัน มาเขียนกราฟ

2.3.2 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก Nd-Fe-B ชนิดเคลือบ

ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก ในการทดลองครั้งนี้ทำการวัดฮิสเตอร์ซิสมัลด้วยเครื่อง VSM และวัดโมเมนต์แม่เหล็กด้วยฟลักซ์มิเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

2.3.2.1 ตัดไม้แม่เหล็กที่ได้จากข้อ 2.2 ด้วยเลื่อยฉลุ ตัวอย่างละ 3 ชิ้น ขนาด $8 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$ แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 แสดงไม้แม่เหล็กที่ถูกตัด

2.3.2.2 นำไม้แม่เหล็กแต่ละชิ้นไปวัดฮิสเตอร์ิซิสลูปด้วยเครื่อง VSM โดยจ่ายสนามแม่เหล็ก (H) ในทิศตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวของไม้แม่เหล็ก

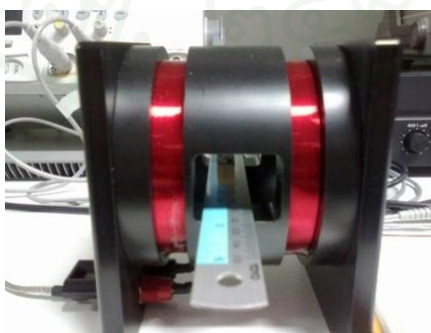
2.3.2.3 นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (H) กับ แมกนีไตเซชัน (M) มาเขียนกราฟ

2.3.2.4 จัดชุดการทดลองการวัดโมเมนต์แม่เหล็กของไม้แม่เหล็กโดยต่อขดลวดเฮล์มโฮลต์เข้ากับปลั๊กซ์มิเตอร์ แสดงดังภาพที่ 35

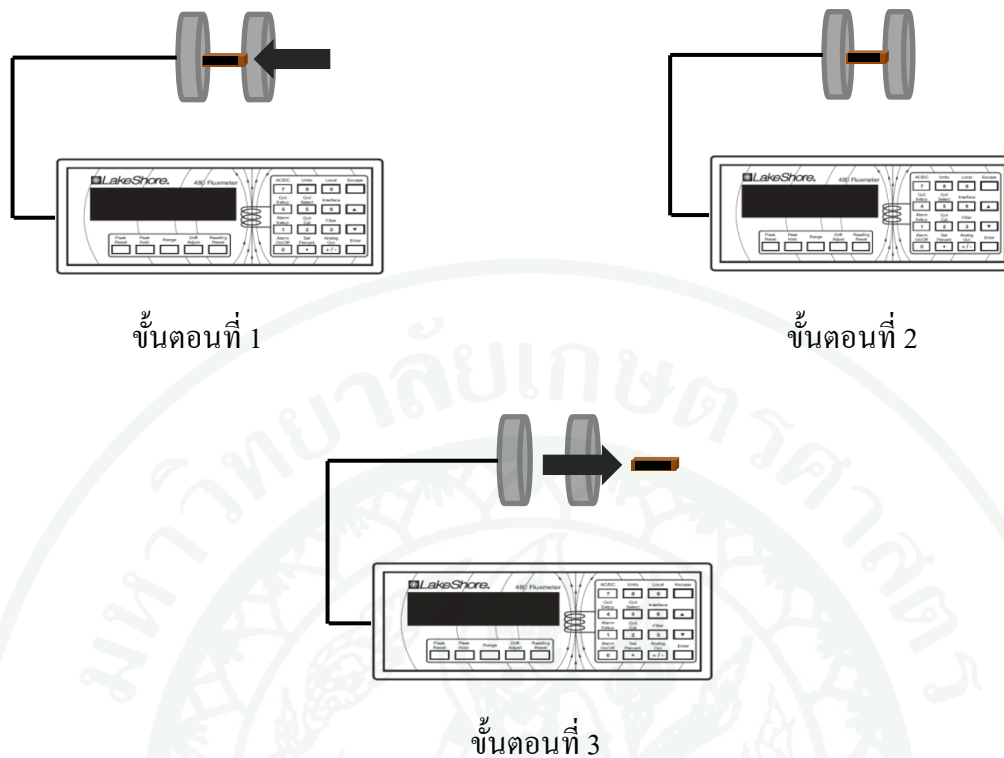


ภาพที่ 35 แสดงการต่อขดลวดเฮล์มโฮลต์กับปลั๊กซ์มิเตอร์

2.3.2.5 วางไม้แม่เหล็กในตำแหน่งตรงกลางของขดลวดเฮล์มโฮลต์ แสดงดังภาพที่ 36 จากนั้นปรับศูนย์ที่ปลั๊กซ์มิเตอร์ ดึงไม้แม่เหล็กออก อ่านค่าโมเมนต์แม่เหล็กจากปลั๊กซ์มิเตอร์ แสดงขั้นตอนการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กดังภาพที่ 37



ภาพที่ 36 แสดงตำแหน่งการวางไม้แม่เหล็กในขดลวดเฮล์มโฮลต์



ภาพที่ 37 แสดงขั้นตอนการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก

2.3.2.6 นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของโมเมนต์แม่เหล็ก (m) เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาตรเลกเกอร์ (Nd-Fe-B% w/v) ที่เวลาบดผง Nd-Fe-B เป็นเวลา 130, 180 และ 300 นาที มาเขียนกราฟ

ผลและวิจารณ์

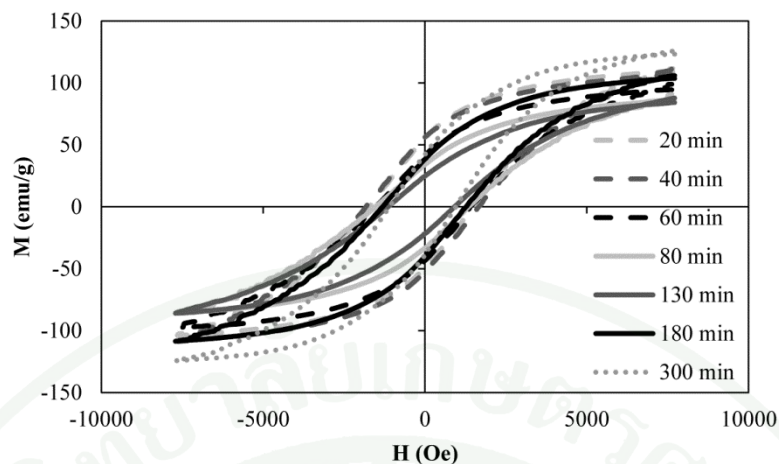
ในบทนี้ได้นำเสนอผล และวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20 ถึง 300 นาที ทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ และวัดสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบต้นตัวอย่างและฟลักซ์มิเตอร์

1. ผลการเตรียมผง Nd-Fe-B เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุเคลือบ

การวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดเพลเนททาร์บอล รุ่น PM 100 เป็นเวลา 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที ภายใต้สภาวะการบดเดียวกัน ได้แยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ วัดฮิสเทอรีซิสลูปด้วย VSM และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B ด้วย SEM ได้ผลดังต่อไปนี้

1.1 ฮิสเทอรีซิสลูปของผง Nd-Fe-B

ในการวัดฮิสเทอรีซิสลูปของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20 ถึง 300 นาที ด้วย VSM เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุด 8 kOe พบว่าแมกนีโตเซชันสูงสุดเกือบจะอิ่มตัว ซึ่งค่า M_{\max} มีค่าลดลงจาก 105.5 emu/g เป็น 82.5 emu/g เมื่อเพิ่มเวลาบดจาก 20 ถึง 130 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 122.5 emu/g เมื่อบดนาน 300 นาที แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (H) กับแมกนีไทเซชัน (M) ของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบคานาน 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที

จากผลการวัดฮิสเทอรีซิสลูปของผง Nd-Fe-B ด้วย VSM เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า H_c , M_r และ M_{max} ของผง Nd-Fe-B ที่เวลาอบต่างๆ กัน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสนามแม่เหล็กกลับล้าง (H_c) แมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) และแมกนีไทเซชันสูงสุด (M_{max}) ของผง Nd-Fe-B ที่เวลาอบต่างๆ กัน

ระยะเวลาอบ (min)	H_c (Oe)	M_r (emu/g)	M_{max} (emu/g)
20	1600 ± 100	52.3 ± 3.3	105.5 ± 2.5
40	1738 ± 88	54.3 ± 2.3	106.5 ± 0.5
60	1463 ± 63	42.5 ± 0.5	95.0 ± 2.0
80	1440 ± 90	33.5 ± 0.5	85.0 ± 0.0
130	1025 ± 125	23.3 ± 1.8	82.5 ± 1.5
180	1275 ± 25	39.3 ± 0.8	105.0 ± 3.0
300	1075 ± 125	39.0 ± 3.5	122.5 ± 0.5

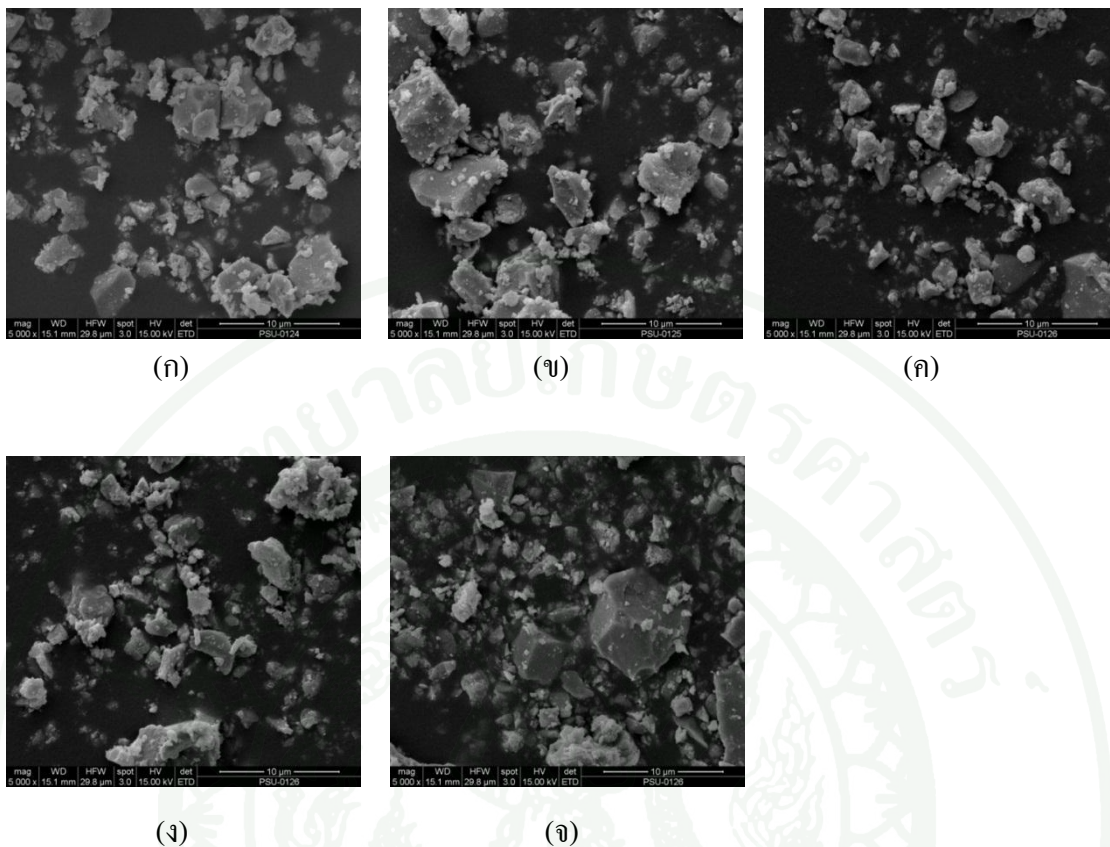
จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่า H_c พบว่ามีค่าลดลงจาก 1600 Oe เป็น 1025 Oe ซึ่งค่า H_c ของผงแม่เหล็กลดลงอาจเป็นผลเนื่องมาจากเหตุผลหลายประการ เช่น อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน

(Exchange coupling interaction) ระหว่างเกรนแม่เหล็ก โดยทั่วไปอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนนำไปสู่การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กที่ขอบเกรน เมื่อเพิ่มเวลาบดจาก 20 ถึง 130 นาที ขนาดของอนุภาคผงแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงส่งผลให้มีอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่ระหว่างเกรนมากขึ้น ส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีการหักล้างกัน จึงทำให้ค่า H_C ลดลง อีกเหตุผลหนึ่งเป็นผลจากการกระจายของขนาดเกรนที่กว้างเมื่อเวลาบด 20 นาที ในการดีแมกนีไทซ์จำเป็นต้องจ่ายสนามแม่เหล็กสูงเพื่อกลับทิศโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศสุ่มและขนาดแตกต่างกันมาก ทำให้ค่า H_C สูง แต่เมื่อบดที่เวลานานขึ้น การกระจายของขนาดอนุภาคจะใกล้เคียงกัน และอนุภาคมีขนาดเล็กลง ค่าสนามแม่เหล็กในกระบวนการดีแมกนีไทซ์ก็มีค่าลดลงด้วยเมื่อเวลาบดเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 130 นาทีและค่า H_C มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1075 Oe เมื่อบดนาน 300 นาที อาจเป็นผลเนื่องจากผงแม่เหล็กที่ผ่านการบดนานขึ้น อนุภาคจะมีขนาดเล็กลงและเกิดการเกาะรวมกันของอนุภาคขนาดเล็กเป็นกลุ่มก้อน จึงจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กมากขึ้นในการดีแมกนีไทซ์ ส่งผลให้ค่า H_C สูงขึ้นด้วย

และค่า M_r มีแนวโน้มเหมือนกับค่า H_C ซึ่งค่า M_r ลดลงจาก 52.3 emu/g เป็น 23.3 emu/g เมื่อเพิ่มเวลาบดจาก 20 ถึง 130 นาที และมีค่ามากที่สุดเป็น 39.0 emu/g เมื่อบดผง Nd-Fe-B เป็นเวลา 300 นาที การเข้าสู่แลกเปลี่ยนระหว่างเกรนขนาดนาโนเป็นตัวกำหนดสมบัติทางแม่เหล็ก เพราะการเข้าสู่กันนำไปสู่การลดลงของแมกนีโตคริสตอลไลน์ แอนไอโซโทรปี (Magnetocrystalline anisotropy) เป็นผลให้ค่า M_r เพิ่มขึ้น

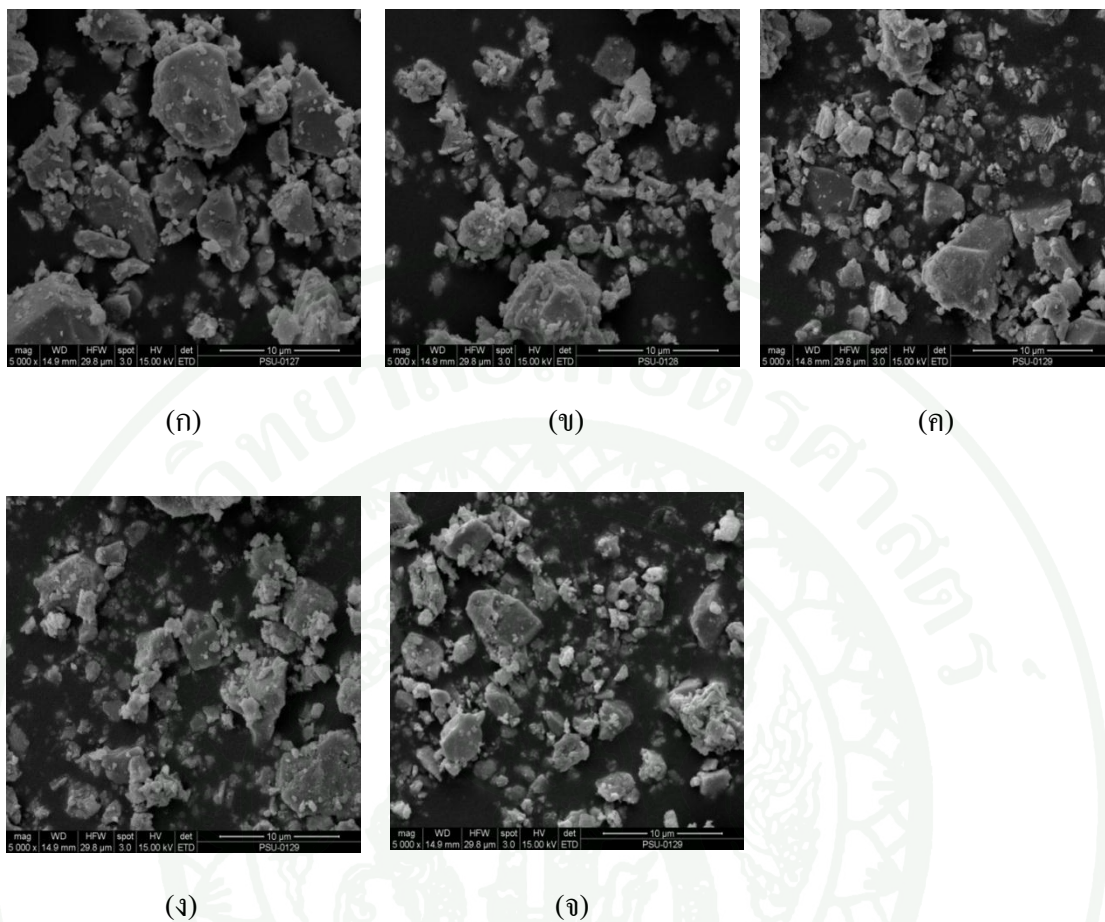
1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่าง ๆ กันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM รุ่น Quanta 400 ซึ่งขนาดของอนุภาคก่อนการบดมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน เมื่อนำผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5000 เท่า โดยถ่ายตัวอย่างละ 5 บริเวณ แสดงได้ดังภาพที่ 39-45



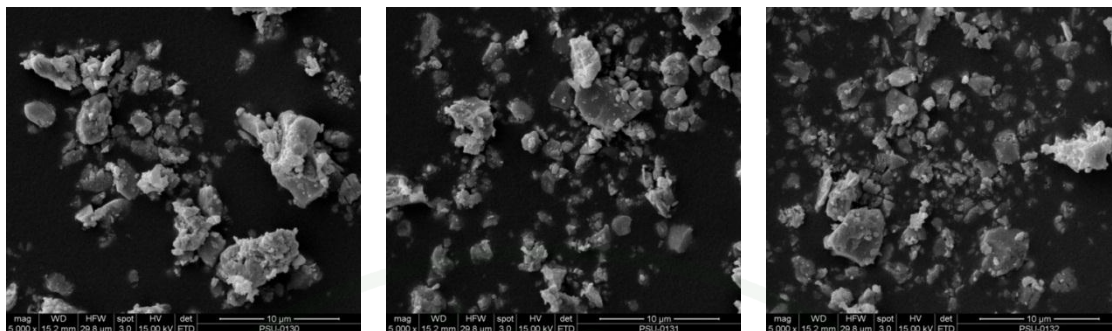
ภาพที่ 39 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 20 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 39 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20 นาที พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่มีการแตกหัก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะเป็นแผ่นและขอบเป็นเหลี่ยมๆ รูปทรงแตกต่างกัน การกระจายของขนาดอนุภาคจะกว้างมาก



ภาพที่ 40 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 40 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

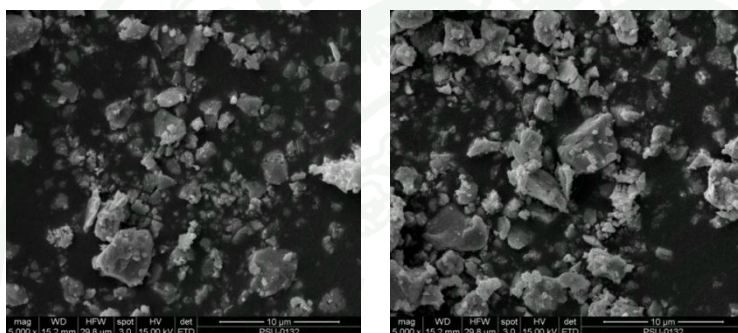
จากภาพที่ 40 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 40 นาที จะเห็นได้ว่าการแตกหักของอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้น ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน โดยมีอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้น ลักษณะของอนุภาคมีขอบเป็นเหลี่ยม บริเวณที่ 2-5 มีการกระจายของอนุภาคขนาดใกล้เคียงกัน แต่บริเวณที่ 1 มีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่เป็นส่วนมาก



(ก)

(ข)

(ค)

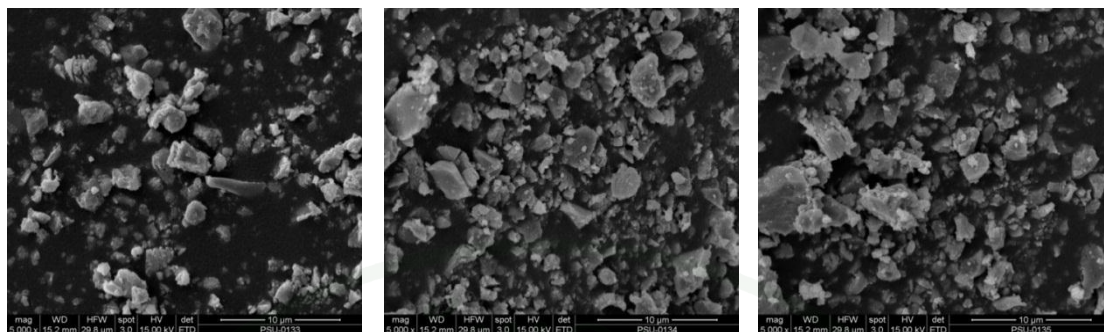


(ง)

(จ)

ภาพที่ 41 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 60 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

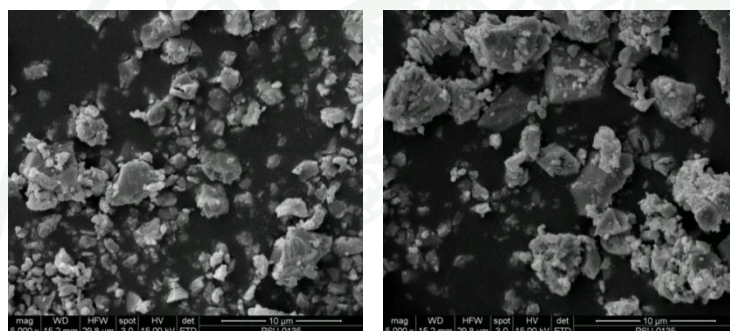
จากภาพที่ 41 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 60 นาที พบว่าแผ่นขนาดใหญ่มีการแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้น แต่โดยส่วนมากมีอนุภาคขนาดใหญ่ บริเวณที่ 3-5 อนุภาคมีการกระจายขนาดกว้างมาก



(ก)

(ข)

(ค)

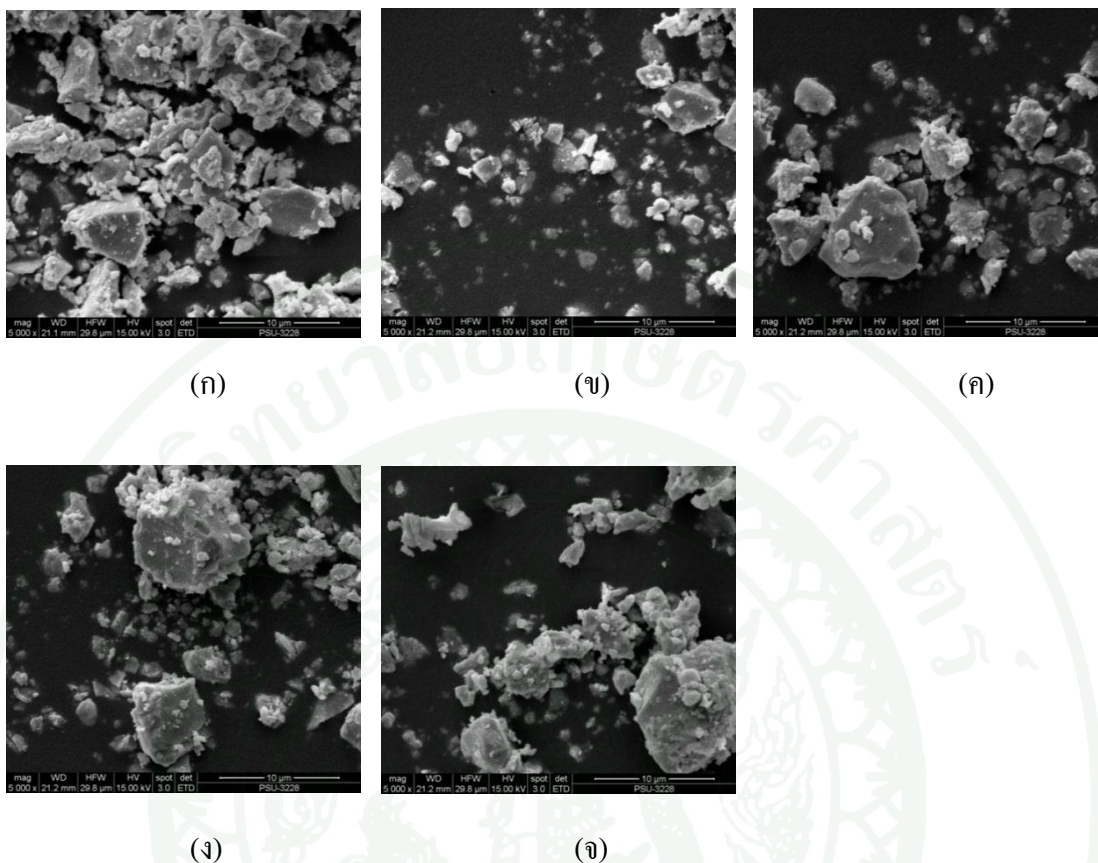


(ง)

(จ)

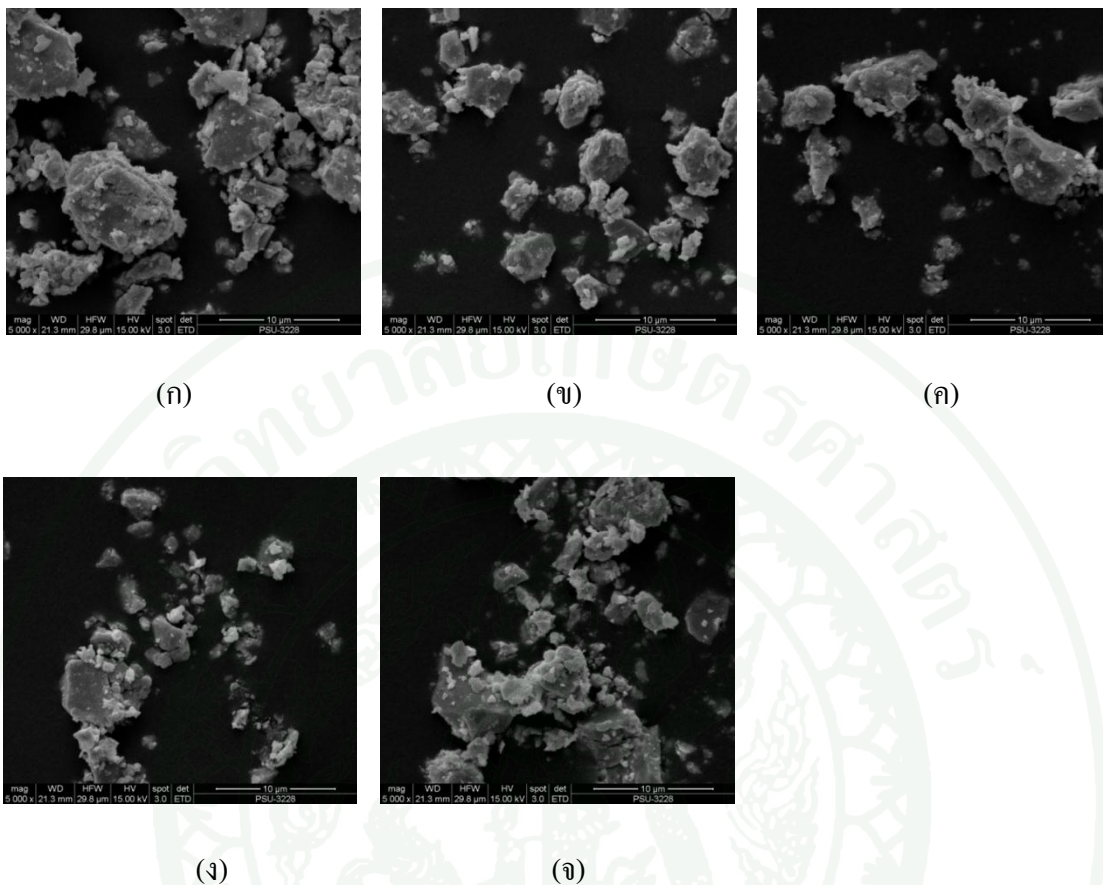
ภาพที่ 42 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 80 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 42 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 80 นาที อนุภาคบางส่วนเกาะกันเป็นก้อนกลมและมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งสังเกตได้ชัดในบริเวณที่ 1-4 บริเวณที่ 5 มีอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าบริเวณอื่น มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็ก



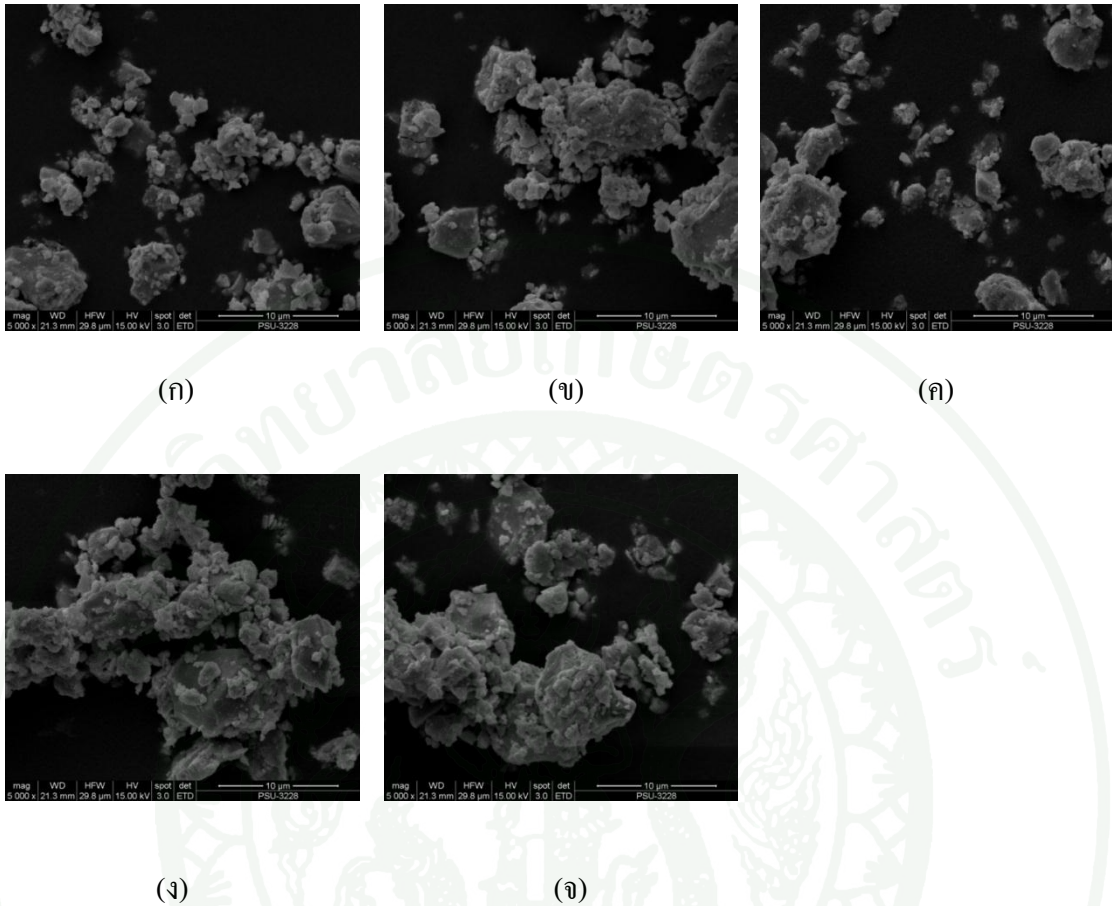
ภาพที่ 43 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 เมื่อผ่านการอบ 130 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 43 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการอบนาน 130 นาที อนุภาคขนาดใหญ่แตกหักเป็นอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มขึ้น อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนกลมมากขึ้น บริเวณที่ 1 มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากกว่าบริเวณอื่น และบริเวณที่ 2 ขนาดอนุภาคจะใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 44 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 44 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที พบว่าอนุภาคขนาดเล็กเกาะรวมตัวกันเป็นก้อน บางบริเวณมีอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็กปนกัน การกระจายของขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันมาก ลักษณะของอนุภาคเป็นก้อนกลมมากขึ้น

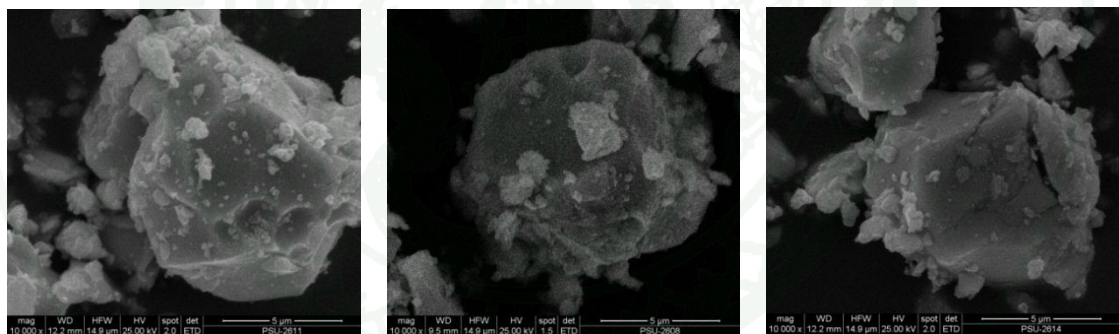


ภาพที่ 45 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ที่ (ก) บริเวณที่ 1 (ข) บริเวณที่ 2 (ค) บริเวณที่ 3 (ง) บริเวณที่ 4 และ (จ) บริเวณที่ 5 เมื่อผ่านการบด 300 นาที กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 45 แสดงภาพผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 300 นาที จะเห็นได้ชัดว่ามีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนกลมมากที่สุด เมื่อเทียบกับเวลาบดน้อยกว่า การกระจายของขนาดอนุภาคจะใกล้เคียงกันและมีอนุภาคขนาดเล็กมากกว่า

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20, 40, 60, 80, 130, 180 และ 300 นาที ด้วยกล้อง SEM โดยใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวเมื่อบดที่เวลา 20-80 นาที มีลักษณะของอนุภาคเกาะกลุ่มเป็นแผ่นบาง และเมื่อเวลาบดนาน 130-300 นาที อนุภาคจะรวมตัวกันมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะที่ผิวทรงกลมทำให้อุผิวทรงกลม

ขรุขระมากขึ้น รวมทั้งมีการกระจายของอนุภาคขนาดใหญ่และเล็กและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังแสดงในภาพที่ 39 ถึง 45 การที่อนุภาคมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่เกิดจากกลไกในการบดโดยเมื่อเริ่มต้นของการบดจะเกิดการชนกันของลูกบดกับผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ทำให้ผงแม่เหล็กแตกออกเป็นขนาดเล็กๆ และภายหลังส่วนที่แตกออกอาจเกิดการรวมกัน หรือเกาะเป็นก้อนใหญ่ขึ้น ทำให้มีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อทำการบดอย่างต่อเนื่องจะเกิดความสัมพันธ์กันระหว่างการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ กับการกลับมารวมกันและทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะเกิดลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ สามารถสังเกตลักษณะสัญญาณวิทยาของผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B จากภาพถ่าย SEM เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 10,000 เท่า ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20-80 นาที ดังภาพที่ 46 (ก) – (ง) มีอนุภาคขนาดใหญ่แตกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก และเมื่อบดนาน 130-300 นาที พบว่าเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็กและกลมมากขึ้น อนุภาคขนาดเล็กเกาะที่ผิวของทรงกลม ทำให้ผิวขรุขระมากขึ้น ดังภาพ 46 (จ) – (ซ)

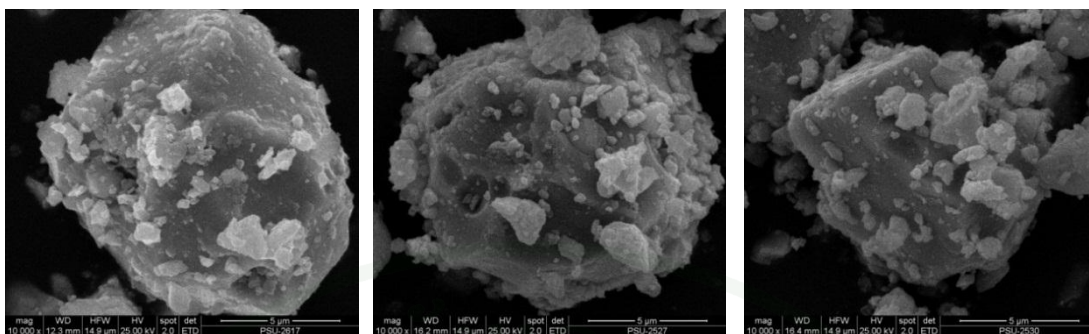


(ก)

(ข)

(ค)

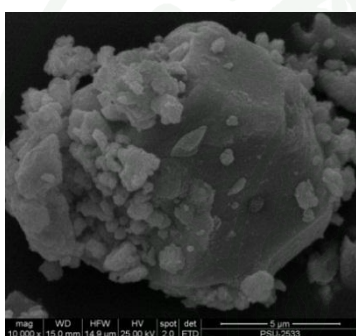
ภาพที่ 46 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง Nd-Fe-B ผ่านการบดนาน (ก) 20 นาที (ข) 40 นาที (ค) 60 นาที (ง) 80 นาที (จ) 130 นาที (ฉ) 180 นาที และ (ซ) 300 นาที โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า



(ง)

(จ)

(ฉ)



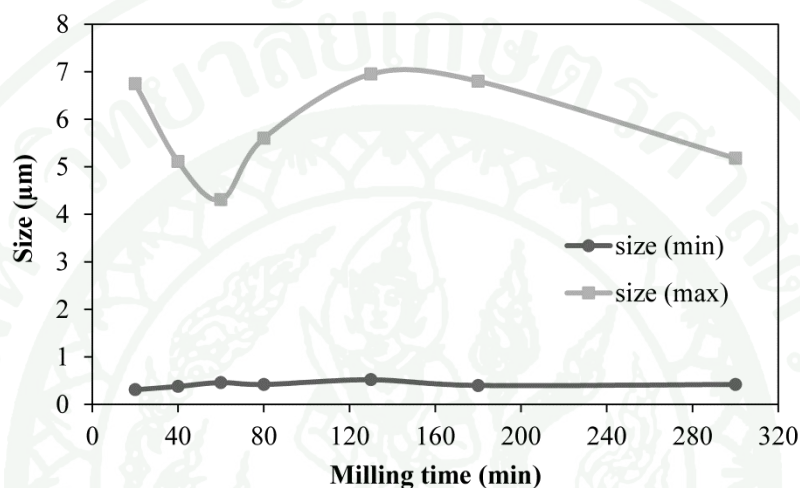
(ซ)

ภาพที่ 46 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับสมบัติทางแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาที่เวลาด้อยๆ ขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่ส่งผลให้มีค่า H_c สูงกว่า เนื่องจากผลึกจะทำหน้าที่ตรึงผนังโดเมนและทำให้การเคลื่อนที่ของโดเมนแม่เหล็กเป็นไปได้ยาก จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มากขึ้นเพื่อใช้ในการกลับทิศโมเมนต์แม่เหล็ก เมื่อเวลาที่เวลาดานขึ้นจาก 20 ถึง 80 นาที ขนาดอนุภาคจะเล็กลงเนื่องจากเกิดการแตกหัก ทำให้ค่า H_c น้อยลง แมกนีโตเซชันของผงแม่เหล็กก็น้อยลงเช่นกัน และเมื่อเวลาที่เวลาเพิ่มขึ้นจาก 130 ถึง 300 นาที อนุภาคที่มีขนาดเล็กอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้ค่า H_c , M_r และ M_s มีค่าเพิ่มขึ้น

1.3 ผลการคำนวณขนาดเกรน ด้วยโปรแกรมอิมเมจ-เจ (Image J)

ผลการคำนวณขนาดเกรนของผง Nd-Fe-B ด้วยโปรแกรมอิมเมจ-เจ จากภาพถ่าย SEM ในการวัดขนาดผง Nd-Fe-B เพื่อหาขนาดเฉลี่ย โดยเลือกวัดขนาดผงที่ใหญ่ที่สุดและเล็กที่สุด อย่างละ 3 อนุภาค หาขนาดเฉลี่ยของผง Nd-Fe-B ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน แสดงผลดังภาพที่ 47

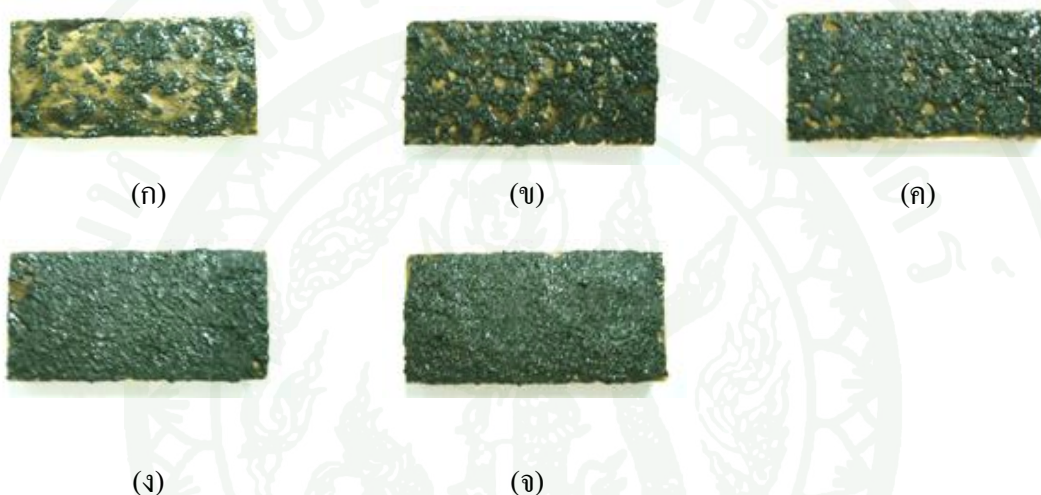


ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบดกับขนาดผงเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดที่คำนวณหาด้วยโปรแกรมอิมเมจ-เจ

จากภาพที่ 47 พบว่าขนาดผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 20 ถึง 300 นาที พบว่าขนาดผงแม่เหล็กอยู่ในช่วงประมาณ 0.3 ถึง 7.0 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาขนาดผงเล็กที่สุดพบว่าขนาดจะใกล้เคียงกันเมื่อบดที่เวลาต่างๆ กัน อาจเป็นเพราะว่าเมื่อบดผงแม่เหล็ก ผงแม่เหล็กเกิดการแตกหักจนได้ขนาดเล็กๆ เมื่อเวลาบดน้อยๆ และเมื่อบดนานขึ้น ผงที่มีขนาดเล็กจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงดังเส้นกราฟผงขนาดเล็ก (size (min)) แต่เมื่อพิจารณาผงขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อบดนานขึ้น ผงบางส่วนจะเกิดการแตกหัก ทำให้มีขนาดเล็กลง ดังเส้นกราฟผงขนาดใหญ่ (size (max)) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการบดนาน 20 - 80 นาที ผงแม่เหล็กมีขนาดเล็กลง แต่เมื่อบดนาน 130 - 300 นาที ผงแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นอาจเนื่องมาจากผงแม่เหล็กถูกระแทกทำให้เกิดการรวมกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของผงขนาดเล็กและขนาดใหญ่

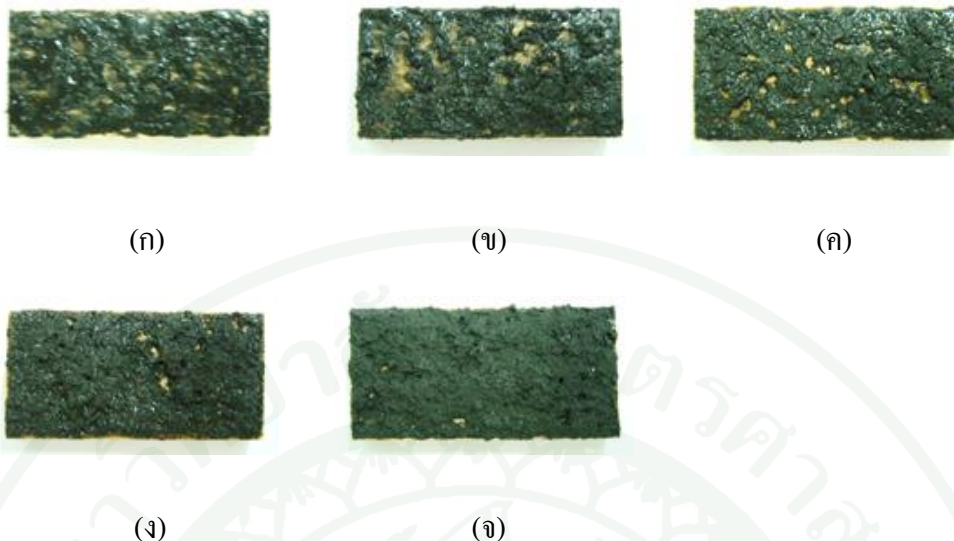
2. ผลการเตรียมไม้มแม่เหล็ก Nd-Fe-B ชนิดเคลือบ

ผลการเตรียมไม้มแม่เหล็ก Nd-Fe-B ชนิดเคลือบ ขนาด $20 \times 40 \times 8 \text{ mm}^3$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ Nd-Fe-B % w/v เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 130, 180 และ 300 นาที แสดงดังภาพที่ 48-50



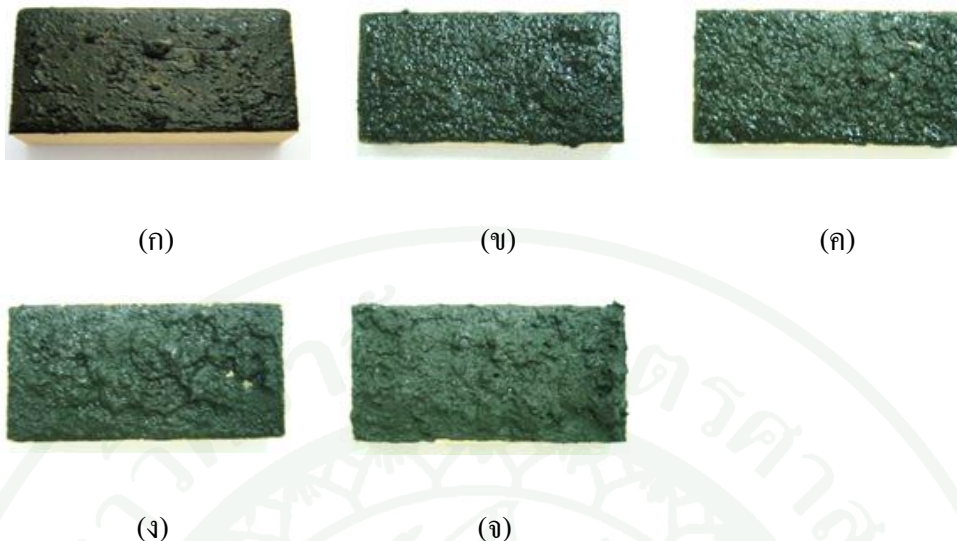
ภาพที่ 48 แสดงไม้มแม่เหล็กหลังเคลือบผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10%, (ข) 20%, (ค) 30%, (ง) 40% และ (จ) 50 %

จากภาพที่ 48 ไม้มแม่เหล็กชนิดเคลือบ ที่ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยแปรค่า Nd-Fe-B % w/v 10 % ถึง 50% พบว่าไม้มแม่เหล็กที่มี Nd-Fe-B % w/v 10 % ผงแม่เหล็กที่กระจายตัวบนไม้มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้น โดยจะมีการเกาะกลุ่มกันของผงแม่เหล็ก และเมื่อ Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้นจาก 10% ถึง 50% ความหนาแน่นของผงแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น และการกระจายตัวของผงแม่เหล็กมีสม่ำเสมอขึ้นด้วย



ภาพที่ 49 แสดงไม้แม่เหล็กหลังเคลือบผงแม่เหล็ก ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %

จากภาพที่ 49 ไม้แม่เหล็กหลังเคลือบผง Nd-Fe-B ที่มี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 % ผงแม่เหล็กที่กระจายตัวบนไม้มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้น โดยจะมีการเกาะกลุ่มกันของผงแม่เหล็ก และเมื่อ Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้นจาก 10% ถึง 50% ความหนาแน่นของผงแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น และการกระจายตัวของผงแม่เหล็กมีสม่ำเสมอขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับไม้แม่เหล็กที่ใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบดนาน 130 นาที การกระจายตัวของผงแม่เหล็กบนไม้ดีขึ้นด้วย



ภาพที่ 50 แสดงไม้แม่เหล็กหลังเคลือบผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %

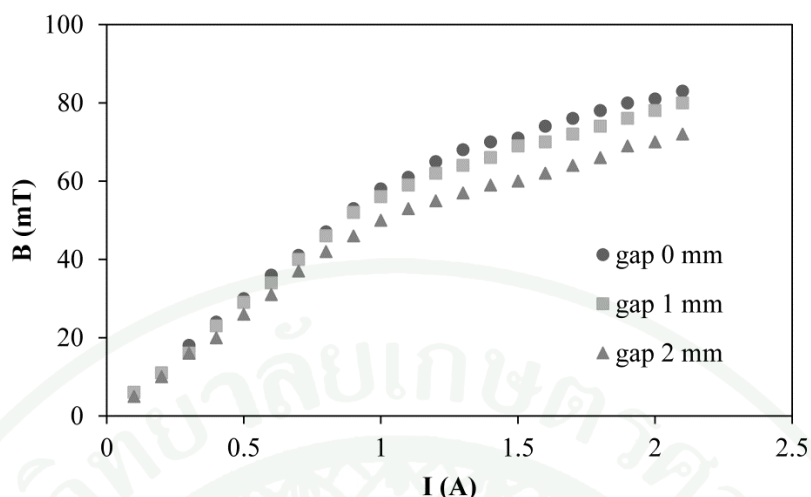
จากภาพที่ 50 ไม้แม่เหล็กหลังเคลือบที่ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที่ มีการกระจายตัวบนไม้ที่สม่ำเสมอกว่าเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาน้อยกว่า และเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B % w/v มากขึ้น จาก 10 ถึง 50% พบว่าปริมาณและการกระจายตัวของผง Nd-Fe-B บนไม้มากขึ้นด้วย

2.1 ผลทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก

จากการทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวด ทำการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวดและทดสอบการดูดติด ได้ผลดังนี้

2.1.1 ผลการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวด ที่ระยะห่างต่างๆ กัน

ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวด เมื่อแปรค่ากระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ กัน โดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก วัดสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดโซเลนอยด์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการดูดติดของไม้แม่เหล็ก ที่ระยะห่าง 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร แสดงค่าดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 แสดงสนามแม่เหล็ก (B) ที่ระยะห่าง 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร จากขดลวดเป็นฟังก์ชันของ กระแสไฟฟ้า (I)

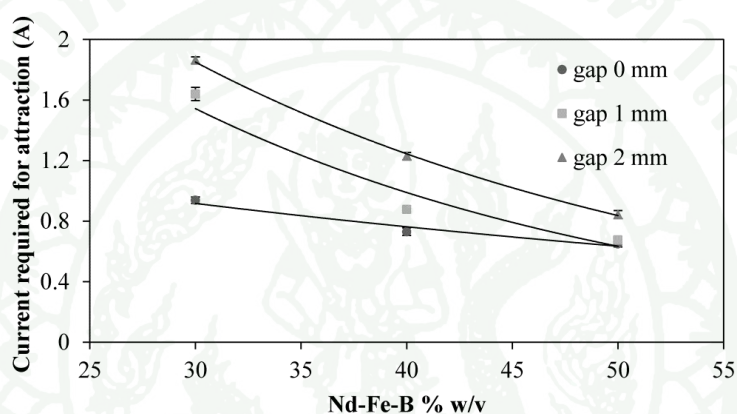
สนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดโซเลนอยด์เมื่อแปรค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ กัน พบว่าในตอนเริ่มต้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดเพิ่มขึ้นจนถึง 1 แอมแปร์ สนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรง และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลงจนมีค่าเกือบคงที่เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2 แอมแปร์ การที่ความชันของกราฟเริ่มลดลงเพราะแกนเหล็กเริ่มอิ่มตัวและเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 2.1 แอมแปร์ ไม่สามารถอ่านค่าสนามแม่เหล็กได้ เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ขดลวดที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถทนความร้อนได้ ทำให้ขดลวดร้อนขึ้น จึงไม่สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวด

เมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับหัววัดของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเป็น 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามกระแสไฟฟ้าในลักษณะเดียวกัน

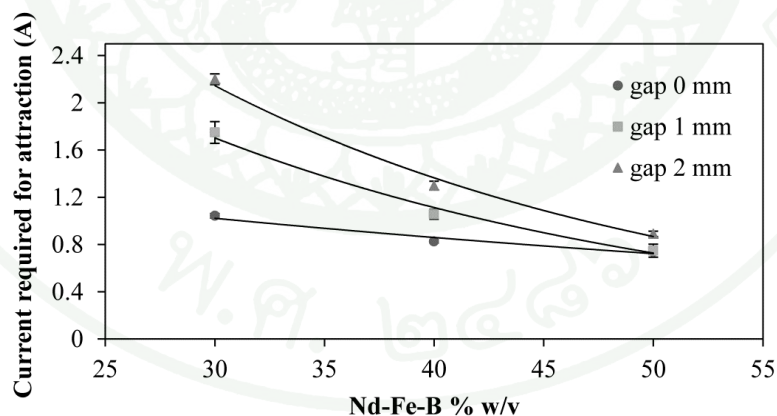
2.1.2 ผลการทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก

ผลการทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็ก เพื่อหากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติด เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130, 180 และ 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 % และระยะห่างระหว่างไม้แม่เหล็กกับขดลวด เป็น 0, 1 และ 2 มิลลิเมตร วัดค่ากระแสไฟฟ้าน้อยสุดเงื่อนไขละ 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย แสดงผลที่ได้จากการทดลองดังภาพที่

52

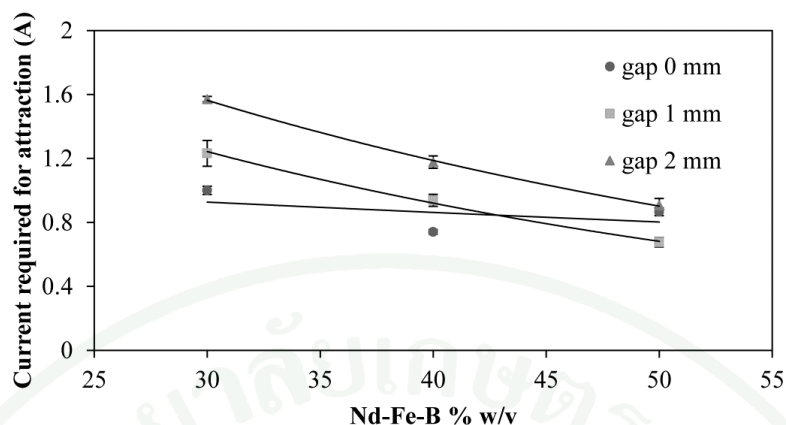


(ก)



(ข)

ภาพที่ 52 แสดงกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติดไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด (ก) 130 นาที (ข) 180 นาที และ (ค) 300 นาที โดยแปรค่าระยะห่างต่างๆ กัน



(ก)

ภาพที่ 52 (ต่อ)

แม่เหล็กที่มี Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน สามารถดูดติดด้วยสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดในปริมาณที่เพียงพอ ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติดแม่เหล็ก โดยแปรค่า Nd-Fe-B % w/v และระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับขดลวด พบว่าเมื่อ Nd-Fe-B % w/v เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้ขดลวดน้อยลงและเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นด้วย โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันเมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบดที่เวลาต่างกัน ดังภาพที่ 52

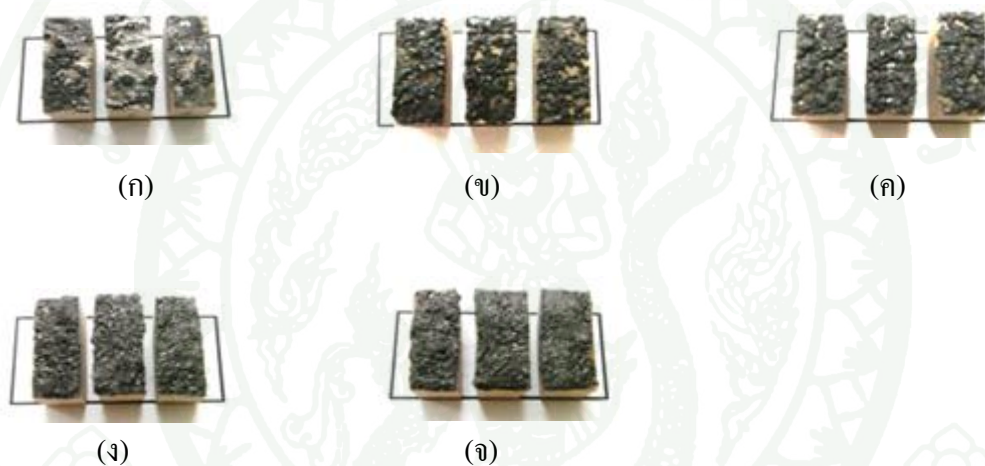
เมื่อเปรียบเทียบกราฟ (ก), (ข) และ (ค) พบว่ากราฟ (ค) ซึ่งเตรียมแม่เหล็กโดยใช้ผง Nd-Fe-B ที่เวลาบด 300 นาที ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดในการดูดติดแม่เหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับค่า M_r ของผงแม่เหล็กซึ่งมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาบดนานขึ้น ซึ่งได้วิเคราะห์ในหัวข้อ 1.1 และเมื่อ Nd-Fe-B % w/v เพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 50 ค่ากระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ใช้ในการดูดติดมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันเมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่เวลาบดและระยะห่างต่างๆ กัน ยกเว้นที่เวลาบดนาน 300 นาที ระยะห่าง 0 มิลลิเมตร ให้ค่าไม่สอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น

2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก Nd-Fe-B ชนิดเคลือบ

ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก โดยทำการวัดฮิสเตอร์ิซิสลูปด้วย VSM และวัดโมเมนต์แม่เหล็ก ด้วยฟลักซ์มิเตอร์ โดยตัดตัวอย่างไม้แม่เหล็กด้วยเลื่อยฉลุให้มีขนาด $8 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$ เงื่อนไขละ 3 ตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 53, 56 และ 59

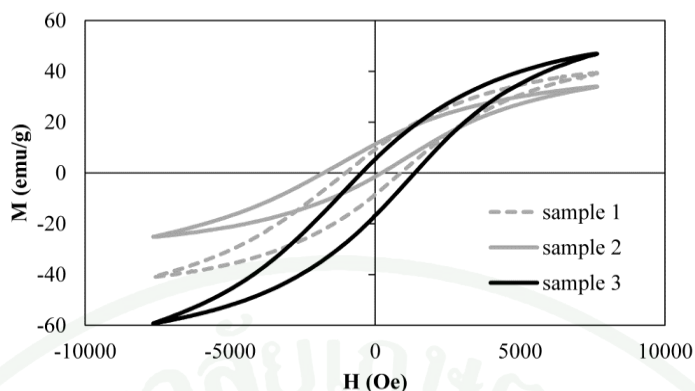
2.2.1 ผลการวิเคราะห์ฮิสเตอร์ิซิสลูป

2.2.1.1 ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที



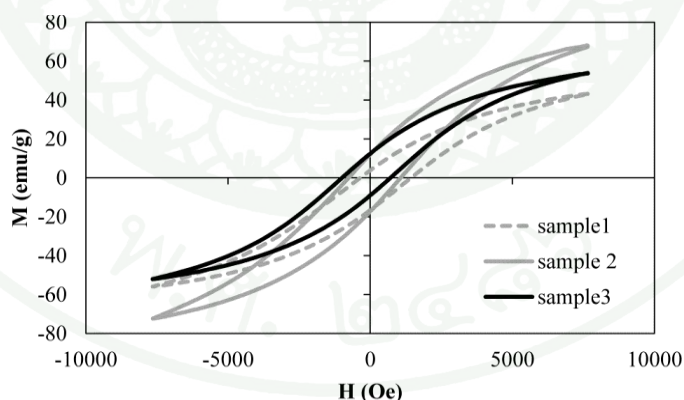
ภาพที่ 53 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% , (ข) 20% , (ค) 30% , (ง) 40% และ (จ) 50 %

จากภาพที่ 53 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบเมื่อใช้ Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 130 นาที เมื่อตัดเป็นชิ้น ตัวอย่างๆ ละ 3 ชิ้น นำไปวัดสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่อง VSM พบว่าไม้แม่เหล็กที่มีอัตราส่วนของ Nd-Fe-B %w/v น้อยๆ ซึ่งมีปริมาณของผง Nd-Fe-B น้อยกว่า มีการเกาะตัวกันบนไม้ และเมื่อมีปริมาณผง Nd-Fe-B เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของผง Nd-Fe-B บนไม้จะสม่ำเสมอขึ้น ผลการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็กเมื่อแปรค่า Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 54-58



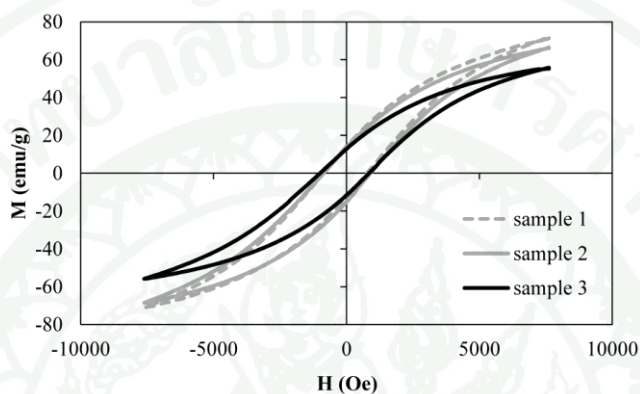
ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %

จากภาพที่ 54 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 950, 995 และ 910 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 8.8, 6.3 และ 11.1 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 40.1, 29.5 และ 53.0 emu/g ตามลำดับ



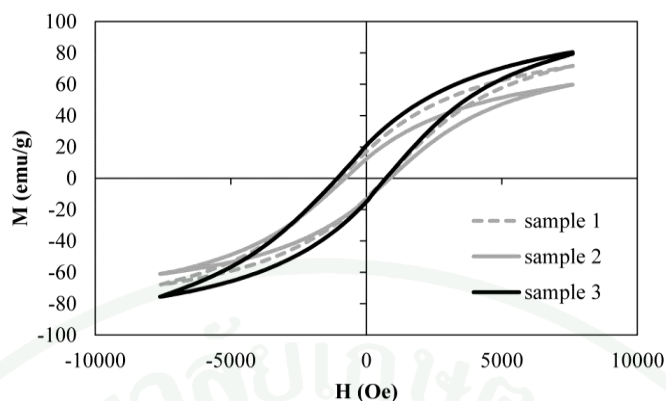
ภาพที่ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %

จากภาพที่ 55 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 900, 915 และ 855 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 10.1, 14.6 และ 10.7 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 49.4, 70.1 และ 52.6 emu/g ตามลำดับ



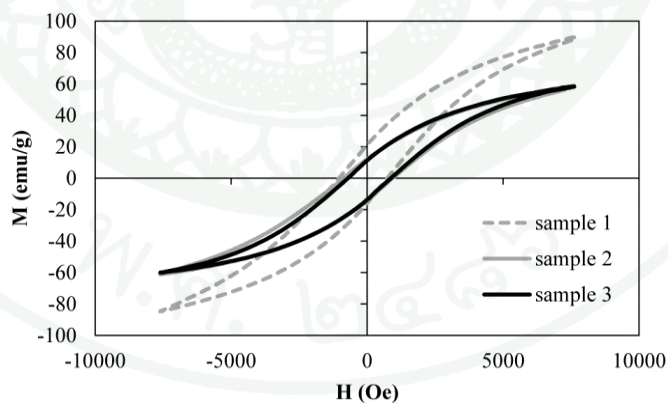
ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %

จากภาพที่ 56 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 820, 880 และ 925 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 13.4, 14.3 และ 12.1 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 71.2, 67.3 และ 55.6 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก
เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %

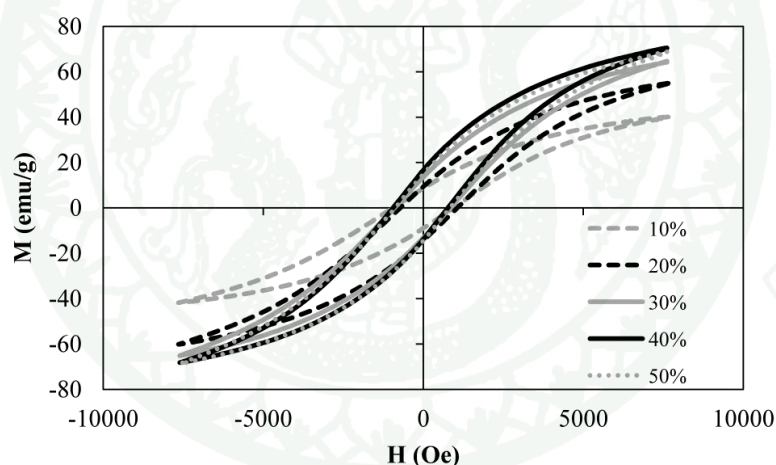
จากภาพที่ 57 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130
นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 840, 825 และ 895
Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 14.8, 12.9 และ 17.9 emu/g ตามลำดับ และค่า
 M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 69.7, 60.1 และ 77.8 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก
เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %

จากภาพที่ 58 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 885, 890 และ 785 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 18.5, 13.1 และ 12.5 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 87.1, 59.4 และ 59.2 emu/g ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาฮิสเตอร์ิซิสลูปของไม้แม่เหล็กดังภาพที่ 54-58 พบว่ามีลักษณะกราฟของแต่ละตัวอย่างไม่ซ้อนกัน เนื่องมาจากการกระจายตัวของผงแม่เหล็กบนไม้แม่เหล็กแต่ละชิ้นต่างกัน เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป การเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กจะไม่เหมือนกัน ส่งผลให้ฮิสเตอร์ิซิสลูปไม่ซ้อนกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลจึงจำเป็นต้องหาค่าแมกนีโตเซชันเฉลี่ยของทั้งสามตัวอย่าง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 59

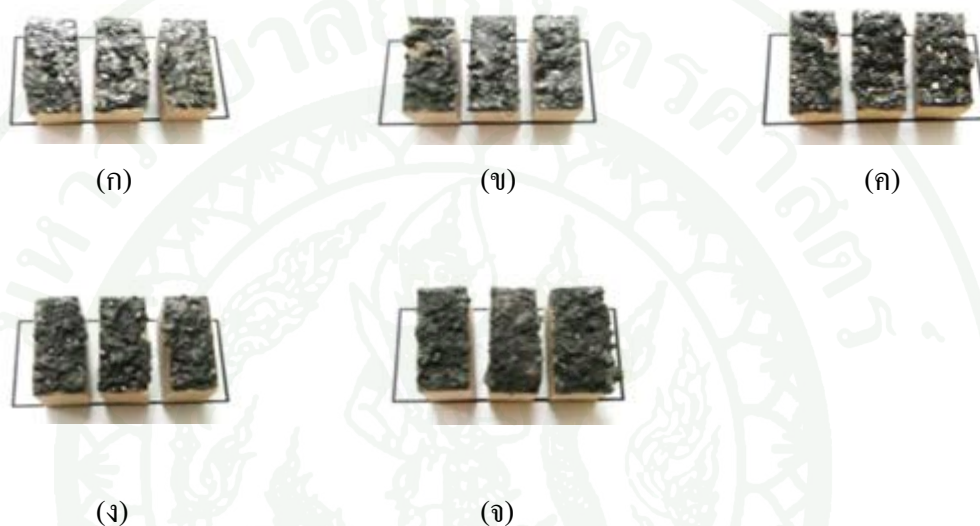


ภาพที่ 59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ยสามตัวอย่าง เมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบด 130 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %

จากภาพที่ 59 พบว่าแมกนีโตเซชันของไม้แม่เหล็กมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับผงแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นผลจากการเพิ่มสัดส่วนของส่วนที่ไม่เป็นแม่เหล็กในไม้แม่เหล็กมากขึ้นจึงทำให้แมกนีโตเซชันลดลง และเมื่อ Nd-Fe-B % w/v เพิ่มขึ้น ค่า M_r และ M_{max} เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่า H_c เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของ Nd-Fe-B ที่ใช้เคลือบเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าค่า H_c

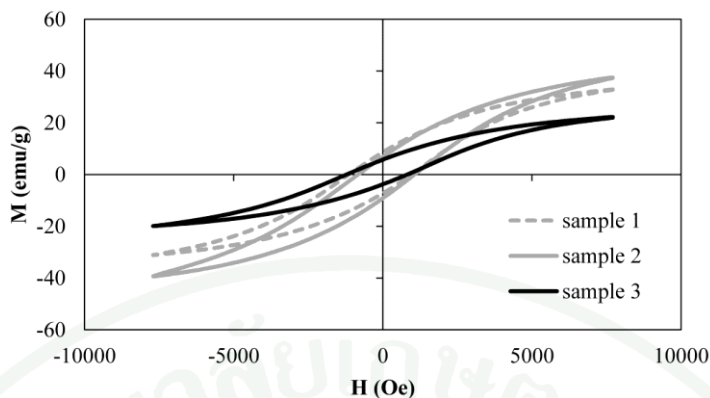
มีผลจากการเปลี่ยนแปลงเวลาในการบดผงแต่กระบวนการเคลือบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า H_c

2.2.1.2 ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที



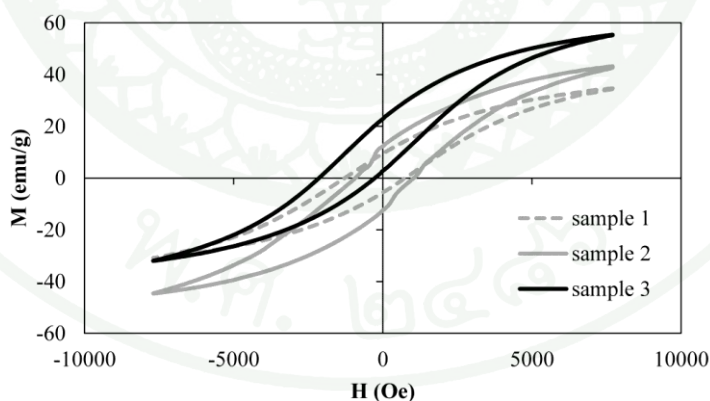
ภาพที่ 60 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10%, (ข) 20%, (ค) 30%, (ง) 40% และ (จ) 50 %

จากภาพที่ 60 จะสังเกตเห็นว่าไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ซึ่งจะสังเกตได้ชัดในไม้แม่เหล็กที่มี Nd-Fe-B % w/v 50% เมื่อนำไม้แม่เหล็กที่ได้ในภาพที่ 60 วัดฮิสเตอร์ิซิสด้วยเครื่อง VSM แสดงผลดังภาพที่ 61



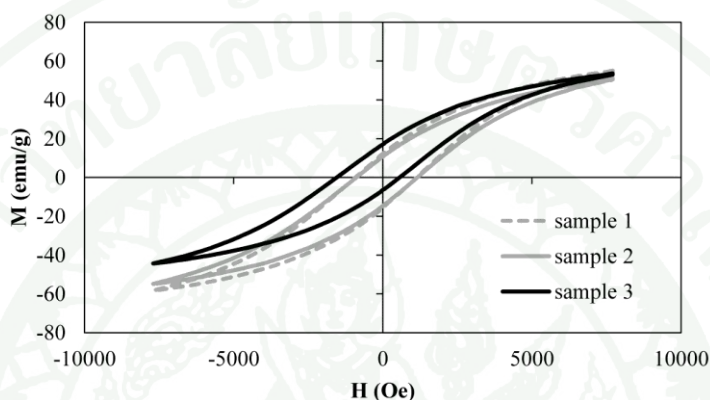
ภาพที่ 61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %

จากภาพที่ 61 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1050, 940 และ 1020 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 7.8, 7.9 และ 4.7 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 31.9, 38.4 และ 21.1 emu/g ตามลำดับ



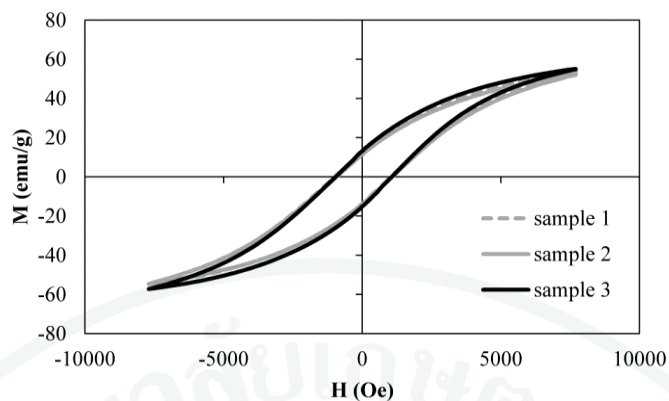
ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %

จากภาพที่ 62 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1010, 975 และ 935 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 7.4, 12.3 และ 10.0 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 32.7, 43.8 และ 43.6 emu/g ตามลำดับ



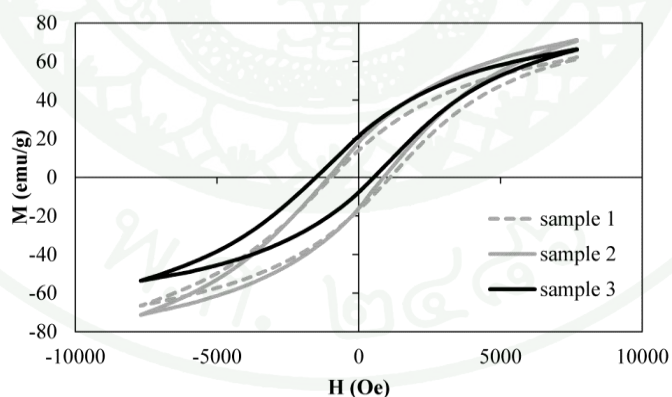
ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %

จากภาพที่ 63 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1025, 1015 และ 1055 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 13.9, 12.6 และ 11.7 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 56.5, 52.9 และ 48.9 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %

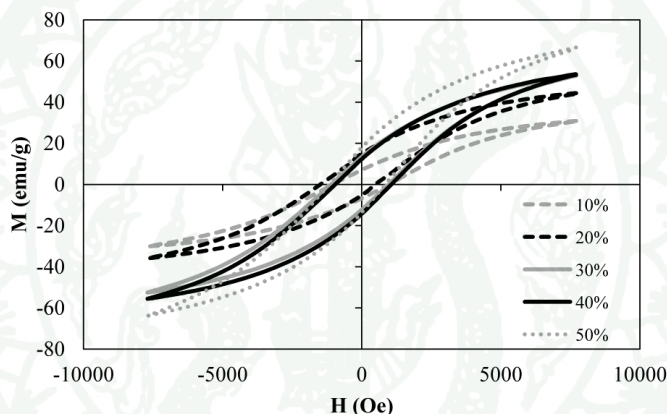
จากภาพที่ 64 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1010, 1005 และ 1015 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 13.1, 12.6 และ 14.1 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 54.0, 53.3 และ 56.1 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %

จากภาพที่ 65 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1030, 965 และ 1020 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 15.4, 17.1 และ 14.5 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 64.2, 71.1 และ 59.6 emu/g ตามลำดับ

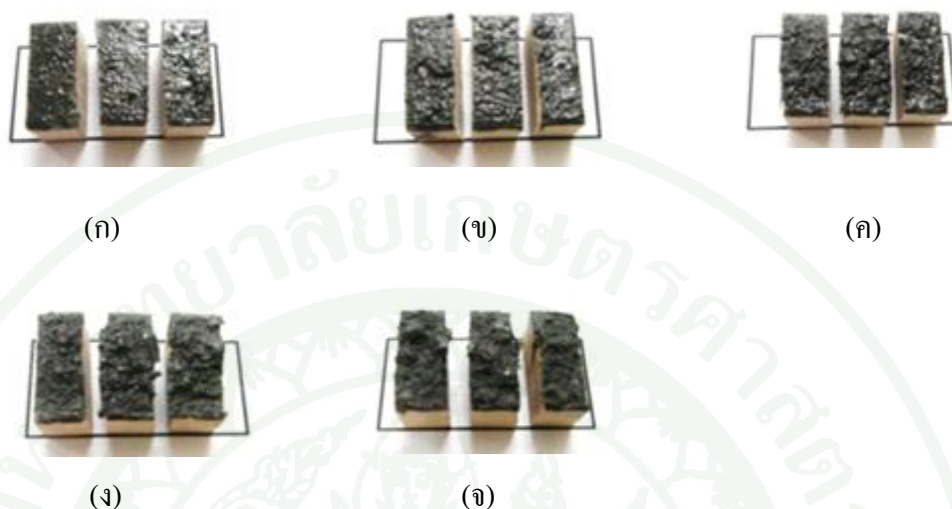
เมื่อนำแมกนีโตเซนของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 180 นาที มาหาค่าเฉลี่ยทั้งสามตัวอย่าง ในขณะที่จ่ายสนามแม่เหล็ก (H) ในปริมาณที่เท่ากัน โดยแปรค่า Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตเซน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ยสามตัวอย่าง เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 180 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %

จากภาพที่ 66 พบว่าเมื่อปริมาณ Nd-Fe-B % w/v เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 50% ส่งผลให้ค่า M_r และค่า M_{max} เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่า H_C เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้เคลือบเปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกับไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่เวลาบด 130 นาที

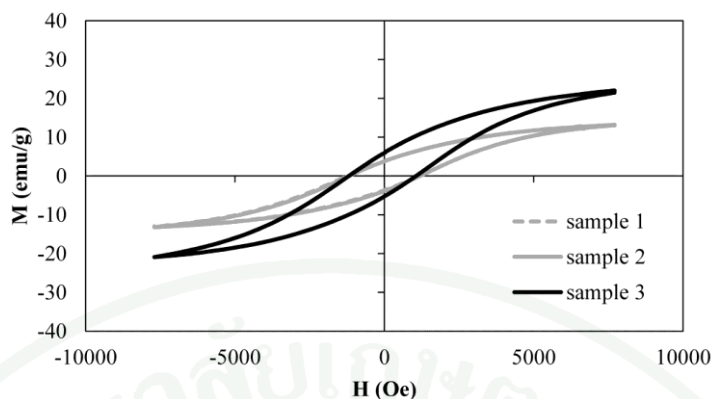
2.1.1.3 ไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที



ภาพที่ 67 แสดงไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบ ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น (ก) 10% (ข) 20% (ค) 30% (ง) 40% และ (จ) 50 %

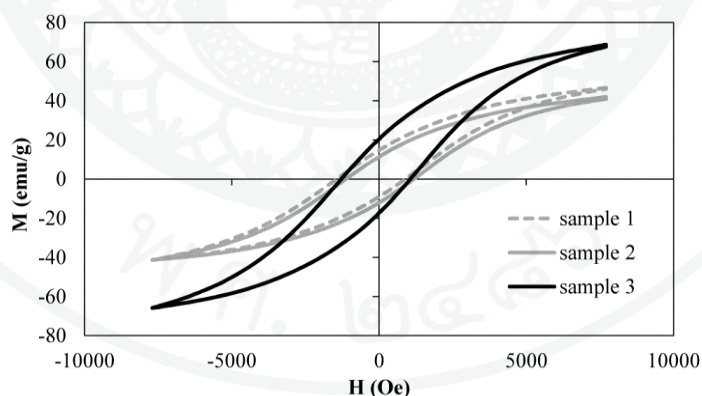
จากภาพที่ 67 พบว่าการกระจายตัวของผงแม่เหล็กบนไม้มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาไม้แม่เหล็กที่มี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10% และ 20% และเมื่อเพิ่มปริมาณผงแม่เหล็กมากขึ้นพบว่ามีการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้พื้นผิวของไม้แม่เหล็กขรุขระมากขึ้น

ผลการวัดฮิสเตอร์ิซิสของไม้แม่เหล็กโดยเครื่อง VSM ของตัวอย่างในภาพที่ 67 แสดงดังภาพที่ 68



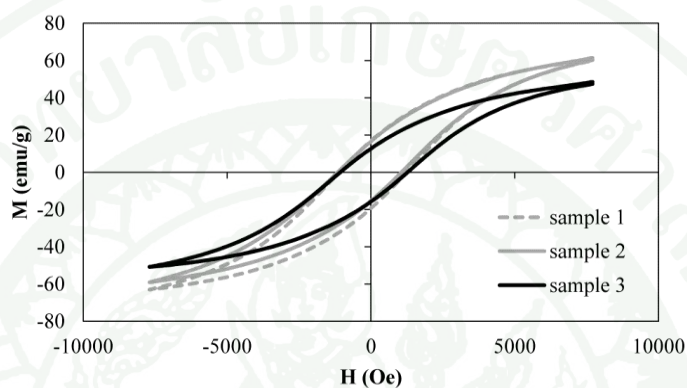
ภาพที่ 68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10 %

จากภาพที่ 68 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 10% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1200, 1185 และ 1125 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 3.7, 3.8 และ 5.5 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 13.1, 13.1 และ 21.4 emu/g ตามลำดับ



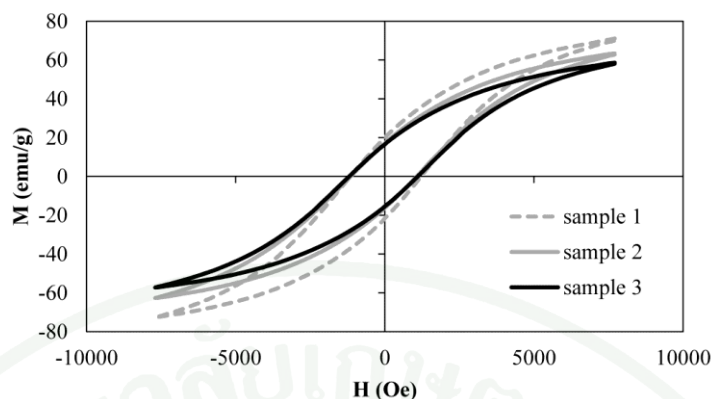
ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20 %

จากภาพที่ 69 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 20% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1160, 1155 และ 1170 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 11.8, 11.6 และ 18.8 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 43.9, 41.5 และ 66.7 emu/g ตามลำดับ



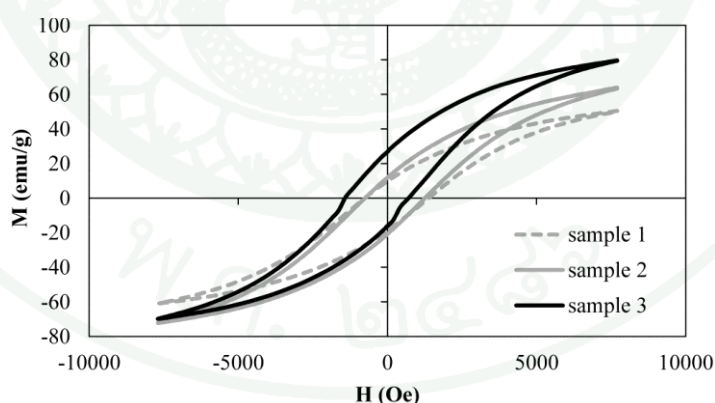
ภาพที่ 70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30 %

จากภาพที่ 70 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 30% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1175, 1110 และ 1170 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 18.0, 15.9 และ 14.1 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 61.7, 59.5 และ 49.5 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40 %

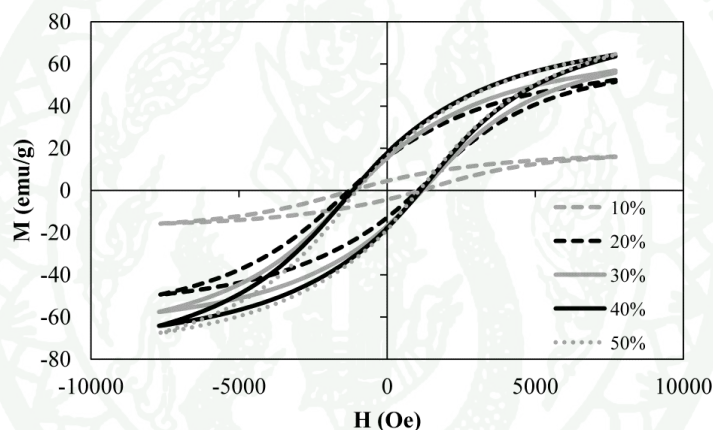
จากภาพที่ 71 ค่า H_c , M_r และ M_{max} ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 40% ได้ค่า H_c ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1185, 1110 และ 1150 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 20.6, 16.6 และ 16.0 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 71.1, 62.9 และ 57.5 emu/g ตามลำดับ



ภาพที่ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50 %

จากภาพที่ 72 ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของแม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v เป็น 50% ได้ค่า H_C ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 1170, 1005 และ 1060 Oe ตามลำดับ ค่า M_r ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 14.1, 16.3 และ 21.4 emu/g ตามลำดับ และค่า M_{max} ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เป็น 55.6, 67.9 และ 74.6 emu/g ตามลำดับ

เมื่อนำแมกนีไทเซชันของแม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่บดนาน 300 นาที มาเฉลี่ยทั้งสามตัวอย่าง ในขณะที่จ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกในปริมาณที่เท่ากัน โดยแปรค่า Nd-Fe-B %w/v ต่างๆ กัน มาเขียนกราฟ แสดงดังภาพที่ 73



ภาพที่ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน (M) กับสนามแม่เหล็ก (H) เฉลี่ยสามตัวอย่าง เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 300 นาที โดยมี Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50 %

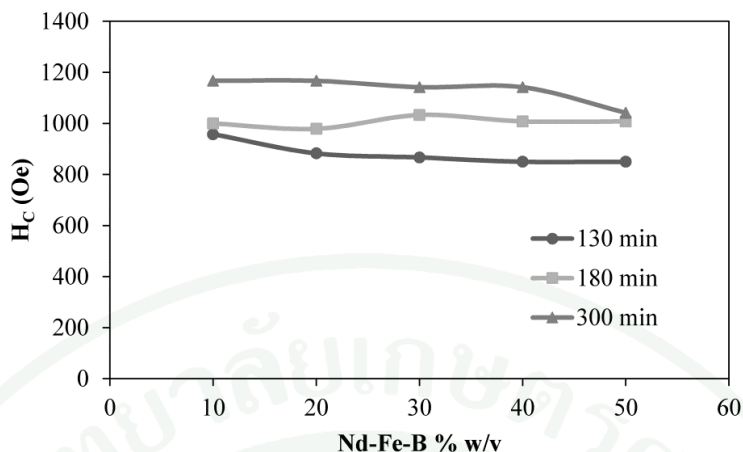
จากภาพที่ 73 พบว่าเมื่อปริมาณ Nd-Fe-B % w/v เพิ่มขึ้น ค่า M_r และค่า M_{max} เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่า H_C เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของผงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้เคลือบเปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกับแม่เหล็กเมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบด 130 และ 180 นาที

จากฮิสเตอร์ิซิสลูปในภาพที่ 59, 66 และ 73 วิเคราะห์หาค่า H_C , M_r , M_{max} และ S^* ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ M_r ต่อ M_{max} แสดงค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าสนามแม่เหล็กกลับล้าง (H_C) แมกนีไทเซชันคงค้าง (M_r) แมกนีไทเซชันสูงสุด (M_{max}) และค่าสแควร์เนส (S^*) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบด 130, 180 และ 300 นาที่ โดยมี Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน

Milling time (min)	Nd-Fe-B % w/v	H_C (Oe)	M_r (emu/g)	M_{max} (emu/g)	S^* (M_r/M_{max})
130	10	958 ± 25	7.1 ± 0.8	40.8 ± 6.8	0.17
	20	883 ± 17	10.1 ± 0.4	57.5 ± 6.4	0.18
	30	867 ± 36	13.3 ± 0.7	64.7 ± 4.7	0.20
	40	850 ± 29	15.3 ± 1.5	69.3 ± 5.1	0.22
	50	850 ± 38	14.7 ± 1.9	68.6 ± 9.2	0.21
180	10	1000 ± 38	6.8 ± 1.0	30.5 ± 5.1	0.22
	20	979 ± 15	10.0 ± 1.4	40.0 ± 3.8	0.25
	30	1033 ± 8	12.8 ± 0.7	52.6 ± 2.2	0.24
	40	1008 ± 8	13.3 ± 0.5	54.4 ± 0.8	0.24
	50	1008 ± 17	15.6 ± 0.7	65.1 ± 3.2	0.24
300	10	1167 ± 27	4.3 ± 0.6	15.8 ± 2.8	0.27
	20	1167 ± 8	14.1 ± 2.3	50.8 ± 8.2	0.28
	30	1142 ± 22	15.9 ± 1.2	57.2 ± 3.9	0.28
	40	1142 ± 22	17.8 ± 1.5	64.2 ± 4.1	0.28
	50	1042 ± 22	17.3 ± 2.2	65.9 ± 5.6	0.26

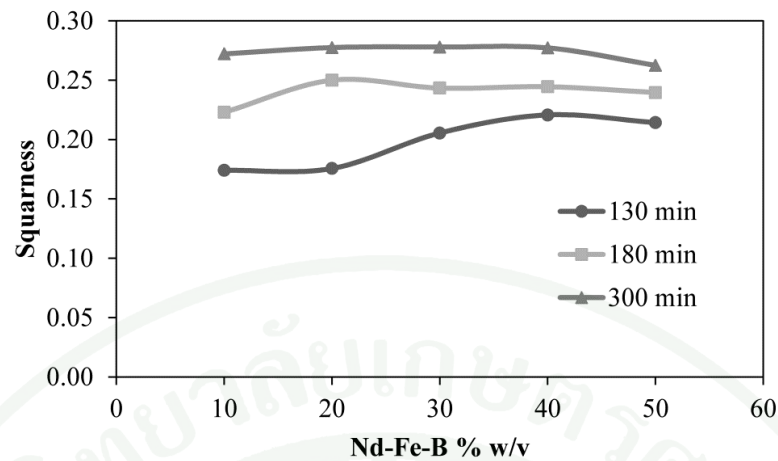
นำค่า H_C และค่า S^* มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ Nd-Fe-B % w/v เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 74 และ 75



ภาพที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v กับค่าสนามแม่เหล็กกลับล่าง (H_c) ของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน

จากภาพที่ 74 ไม้แม่เหล็กที่ใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 130 นาที ค่า H_c มีค่าประมาณ 880 Oe เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้น ค่า H_c มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่เวลาบดนาน 300 นาที ค่า H_c มีค่าประมาณ 1132 Oe ดังนั้นค่า H_c ของไม้แม่เหล็กมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่บดนานขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่า H_c ขึ้นกับขนาดเกรนและการกระจายของขนาดซึ่งเมื่อบดผงนานขึ้น อนุภาคจะมีขนาดเล็กลงและเกิดการรวมกันของอนุภาคผงขนาดเล็กเป็นก้อนมากขึ้น ดังนั้นส่งผลให้จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กสูงในการกลับทิศโมเมนต์แม่เหล็ก ทำให้ค่า H_c สูงขึ้น

การเพิ่ม Nd-Fe-B % w/v หรือการเพิ่มปริมาณของผง Nd-Fe-B ในการเคลือบ จาก 10 ถึง 50% ค่า H_c เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าค่า H_c มีผลจากการเปลี่ยนแปลงเวลาบดผงแม่เหล็ก ส่วนเงื่อนไขในการเคลือบไม่มีผลต่อค่า H_c



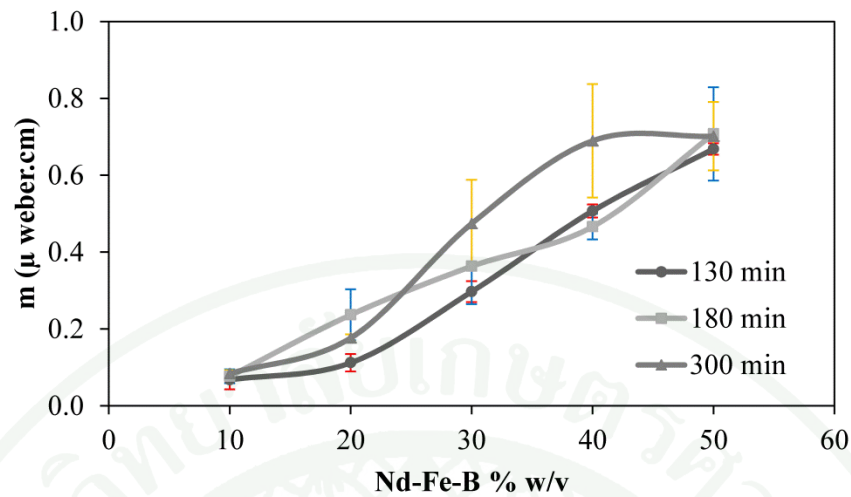
ภาพที่ 75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v กับค่าสแควร์เนสของไม้แม่เหล็ก เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน

ในการหาค่า S^* ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง M_r ซึ่งหาได้จากจุดตัดแกน y กับค่า M_{max} ซึ่งมีค่าเกือบอ้อมตัวในจุดภาคที่หนึ่ง จากภาพที่ 75 พบว่าเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 130 นาที มีค่า S^* ประมาณ 0.20 แต่เมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 300 นาที ส่งผลให้ S^* เพิ่มขึ้น มีค่าประมาณ 0.28 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนานขึ้นส่งผลให้ค่า S^* มีค่าสูงขึ้น ด้วยการเพิ่ม Nd-Fe-B % w/v ทำให้มีปริมาณผง Nd-Fe-B บนไม้แม่เหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแมกนีไทเซชันเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่า S^* ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่ม Nd-Fe-B % w/v จาก 10 ถึง 50%

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบดผง Nd-Fe-B ที่ใช้ในการเคลือบบนไม้ ส่งผลให้ค่าสแควร์เนสของไม้แม่เหล็กเปลี่ยนแปลง ในขณะที่กระบวนการเคลือบโดยการเพิ่มปริมาณของผง Nd-Fe-B บนไม้ ไม่ส่งผลต่อค่าสแควร์เนส

2.2.2 ผลการวัดโมเมนต์แม่เหล็ก

ในการทดลองยังวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของไม้แม่เหล็กเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาและ Nd-Fe-B % w/v ต่างๆ กัน โดยวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยของไม้แม่เหล็กทั้ง 3 ตัวอย่างด้วยฟลักซ์มิเตอร์ แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 76



ภาพที่ 76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nd-Fe-B % w/v และ โมเมนต์แม่เหล็ก (m) เมื่อใช้ผงแม่เหล็กที่ผ่านการบดที่เวลาต่างๆ กัน

จากภาพที่ 76 พบว่าเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดที่เวลาเดียวกัน ค่าโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้นจาก 10 ถึง 50 % และเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรง เมื่อ Nd-Fe-B % w/v มีค่า 20 ถึง 40 % ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กกับเวลาบดผงยังไม่สามารถสรุปได้ แต่พบว่าค่าโมเมนต์แม่เหล็กและค่าแมกนีไทเซชันคงค้างมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยพบว่าเมื่อเวลาบดผงนานขึ้น ค่าโมเมนต์แม่เหล็กและค่าแมกนีไทเซชันคงค้างสูงขึ้นด้วย และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ผง Nd-Fe-B ที่ผ่านการบดนาน 300 นาที

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการเตรียมไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบจากผง Nd-Fe-B ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำแท่งแม่เหล็ก Nd-Fe-B มาบดเป็นผงที่เวลาบดต่าง ๆ กัน นำผง Nd-Fe-B ที่เวลาบดนาน 130, 180 และ 300 นาที ผสมกับเลกเกอร์เป็นวัสดุเคลือบ โดยแปรค่าอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง Nd-Fe-B ต่อปริมาตรเลกเกอร์ จาก 10 - 50% เคลือบบนไม้ยางพารา จากผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Nd-Fe-B ทดสอบการดูดติดของไม้แม่เหล็กและวัสดุสมบัติทางแม่เหล็กของไม้แม่เหล็ก ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ค่า H_C , M_r และ M_{max} ของผง Nd-Fe-B จะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มเวลาบดนาน 20 ถึง 130 นาที เนื่องมาจากช่วงแรกของการบดทำให้ผลมีขนาดเล็กลง และมีการกระจายของขนาดผงที่กว้าง ตัวแปรทางแม่เหล็กเหล่านี้มีค่าลดลง แต่เมื่อบดนาน 130 ถึง 300 นาที ทำให้ขนาดอนุภาคที่เล็กลง และมีการรวมเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่า H_C , M_r และ M_{max} มีค่าสูงขึ้น
2. ค่า S^* และ H_C ของไม้แม่เหล็กชนิดเคลือบผง Nd-Fe-B เพิ่มขึ้น เมื่อบดผง Nd-Fe-B นาน 130 ถึง 300 นาที
3. ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก และแมกนีไทเซชันของไม้แม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของผง Nd-Fe-B ในวัสดุเคลือบหรือค่า Nd-Fe-B % w/v สูงขึ้น
4. สนามแม่เหล็กในการดูดติดของไม้แม่เหล็ก ภายใต้สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเพิ่ม Nd-Fe-B % w/v จาก 30 ถึง 50 และระยะห่างระหว่างขดลวดกับไม้แม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ในสภาวะการบดโดยมีเงื่อนไขเดียวกันกับการวิจัยในการครั้งนี้ การเพิ่มอัตราส่วนลูกบดต่อผงแม่เหล็ก สามารถช่วยลดระยะเวลาการบดผง Nd-Fe-B อาจจะทำให้ได้สมบัติทางแม่เหล็กของผงแม่เหล็กใกล้เคียงกัน
2. ในการเตรียมวัสดุเคลือบแม่เหล็ก ในขั้นตอนการเตรียมพบว่าการเกาะกันเป็นก้อนของผง Nd-Fe-B ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้โดยการนำผง Nd-Fe-B ไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีเพื่อให้อำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารสูญเสียไปในระหว่างการแปรรูปเป็นแม่เหล็ก
3. ในการวิจัยครั้งต่อไปเพื่อนำแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้สำหรับดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอาคาร อาจนำวัสดุแม่เหล็กอ่อนมาใช้ในการขึ้นรูปแม่เหล็ก ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์สำหรับใช้ในประเทศไทยซึ่งมีทรัพยากรป่าไม้มาก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Brown, D., M. Bao-min and C. Zhongmin. 2002. Developments in processing and properties of NdFeB-type permanent magnets. **J. Magn. Magn. Mater.** 248: 432-440.
- Buschow K.H.J. and F.R. de Boer. 2003. **Physics of magnetism and magnetic materials.** Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York.
- Chen, Z., Y. Sui and Z. Guo. 2010. Magnetic properties of NdFe₁₄B/ α -Fe nanocomposite magnets with yttrium addition. **Rare Met.** 29: 265.
- Cheng, W.H., W. Li, C.J. Li and S.Z. Dong. 2001. The magnetic properties, thermal stability and microstructure of Nd-Fe-B/ Ga sintered magnets prepared by blending method. **J. Magn. Magn. Mater.** 234: 274-278.
- Croat, J.J., J.F. Herbst, R.W. Lee and F.E. Pinkerton. 1984. High-energy product Nd-Fe-B permanent magnets. **Appl. Phys. Lett.** 44: 148.
- Czichos, H., T. Saito and L. Smith. 2006. **Springer handbook of materials measurement methods.** Springer Science + Business media, Inc, Wurzburg.
- Davies, H.A. and Z.W. Liu. 2005. The influence of processing, composition and temperature on the magnetic characteristics of nanophase RE-Fe-B alloys. **J. Magn. Magn. Mater.** 294: 213-225.
- Li, D., S. Gaiffi, D. Kirk, K. Young and J. Herchenroeder. 1999. Liquid coated melt-spun Nd-Fe-B powders for bonded magnets. **J. Appl. Phys.** 85: 4871-4873.

- Oka, H., A. Hojo, H. Osada, Y. Namizaki and H. Taniuchi. 2004. Manufacturing methods and magnetic characteristics of magnetic wood. **J. Magn. Magn. Mater.** 272-276: 2332-2334.
- Oka, H., A. Hojo, K. Seki and T. Takashiba. 2002. Wood construction and magnetic characteristics of impregnated type magnetic wood. **J. Magn. Magn. Mater.** 239: 617-619.
- Oka, H. and F. Hiromitu. 1999a. Experimental study on magnetic and heating characteristics of magnetic wood. **J. Appl. Phys.** 85: 5732-5734.
- Oka, H. and F. Hiromitu. 1999b. Heating characteristics of magnetic wood by induction heating. **IEEE Trans. Magn.** 35: 3520-3522.
- Oka, H., F. Hiromitu and K. Seki. 2000. Composition and heating efficiency of magnetic wood by induction heating. **IEEE Trans. Magn.** 36: 3715-3717.
- Oka, H., H. Hamano and S. Chiba. 2004. Experimental study on actuation functions of coating-type magnetic wood. **J. Magn. Magn. Mater.** 272-276: e1693-e1694.
- Oka, H., H. Hayakawa, H. Osada, A. Kano, H. Taniuchi and O. Sawabe. 2002. Laminated impregnated magnetic wood manufacturing methods and magnetic characteristics from dc to 13.5 GHz band. **IEEE Trans. Magn.** 38: 3327-3328.
- Oka, H., H. Tokuta, Y. Namizaki and N. Sekino. 2004. Effects of humidity on magnetic and woody characteristics of powder-type magnetic wood. **J. Magn. Magn. Mater.** 272-276: 1515-1517.

- Oka, H., K. Tanaka, H. Osada, K. Kubota and F.P. Dawson. 2009. Study of electromagnetic wave absorption characteristics and component parameters of laminated-type magnetic wood with stainless steel and ferrite powder for use as building materials. **J. Appl. Phys.** 105: 07E701.
- Oka, H., Y. Kataoka, H. Osada, Y. Aruga and F. Izumida. 2007. Experimental study on electromagnetic wave absorbing control of coating-type magnetic wood using a grooving process. **J. Magn. Magn. Mater.** 310: e1028-e1029.
- Shiyan, Z., X. Hui, T. Xiaohua, N. Jiansen and D. Yuanda. 2007. Influence of Zirconium addition on magnetic properties and temperature coefficient for nanocomposite $\text{Nd}_{10}\text{Fe}_{78.5-x}\text{Co}_3\text{Zr}_x\text{B}_{6.5}$ magnets. **J. Rare Earths** 25: 121.
- Siwu, T., L. Xin, T. Jianjun, Q. Xuanhui, Y. Honkura, H. Mitarai and K. Noguchi. 2009. Magnetic properties and thermal stability of anisotropic bonded Nd-Fe-B magnets by warm compaction. **Rare Met.** 28: 245.
- Suryanarayana, C. 2001. Mechanical alloying and milling. **Prog. Mater. Sci.** 46: 1-184.
- Velicescu, M., W. Fernengel, W. Rodewald, P. Schrey and B. Wall. 1996. High-energy sintered Nd-Dy-Fe-B magnets with Co and Cu additions. **J. Magn. Magn. Mater.** 157/158: 47-48.
- Weickhmann, M. 2009. **Nd-Fe-B Magnets**. Properties and Applications. Available Source: [http:// www.vacuumschmelze.de/](http://www.vacuumschmelze.de/), August 5, 2011.
- Wu, Y.Q., D.H. Ping, X.Y. Xiong and K. Hono. 2002. Magnetic properties and microstructures of $\alpha\text{-Fe/Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ nanocomposite microalloyed with Zr. **J. Appl. Phys.** 91: 8174-8176.

- Xiuhai, Z. and X. Weihao. 2009. Effect of bonding process on the properties of isotropic epoxy resin-bonded Nd-Fe-B magnets. **Rare Met.** 28: 248.
- Yan, G.H., R.J. Chen, Y. Ding, S. Guo, D. Lee and A.R. Yan. 2011. The preparation of sintered NdFeB magnet with high-coercivity and high temperature-stability. **J. Phys.: Conf. Ser.** 266: 012052.
- Yu, L.Q., Y.H. Wen and M. Yan. 2004. Effects of Dy and Nb on the magnetic properties and corrosion resistance of sintered NdFeB. **J. Magn. Magn. Mater.** 283: 353-356.
- Zhao, T.S., B. Y.B. Kim and W.Y. Jeung. 2000. Magnetic properties and microstructure of NdFeB sintered magnets by the addition of Ag powder. **IEEE Trans. Magn.** 36: 3318-3320.



ตารางผนวกที่ 1 ขนาดอนุภาคจากภาพ SEM ของผง Nd-Fe-B ที่เวลาบดต่างๆ วัดด้วยโปรแกรม
อิมเมจ-เจ

Milling time (min)	Pic.	Size _{max} (μm)				Size _{min} (μm)			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
20	1	4.227	2.799	2.332	3.12	0.351	0.292	0.297	0.31
	2	5.343	5.3	7.667	6.10	0.61	0.553	0.582	0.58
	3	2.817	2.672	2.497	2.66	0.667	0.454	0.638	0.59
	4	4.316	7.545	8.394	6.75	0.538	0.434	0.66	0.54
	5	2.303	2.028	2.04	2.12	0.585	0.665	0.538	0.60
40	1	6.676	4.361	4.305	5.11	0.397	0.369	0.38	0.38
	2	3.146	1.599	2.694	2.48	0.577	0.5	0.374	0.48
	3	5.984	3.397	3.553	4.31	0.697	0.551	0.644	0.63
	4	7.442	3.747	3.615	4.93	0.77	0.624	0.519	0.64
	5	3.46	8.108	2.759	4.78	0.618	0.526	0.509	0.55
60	1	4.352	2.877	2.69	3.31	1.261	1.295	0.683	1.08
	2	3.933	2.427	4.347	3.57	0.588	0.732	0.744	0.69
	3	3.808	3.929	2.075	3.27	0.465	0.494	0.424	0.46
	4	3.887	3.96	2.111	3.32	0.559	0.408	0.523	0.50
	5	4.876	5.054	2.987	4.31	0.535	0.475	0.37	0.46
80	1	3.054	2.721	2.216	2.66	0.598	1.07	1.125	0.93
	2	3.692	3.601	3.538	3.61	0.462	0.713	0.543	0.57
	3	2.388	1.971	2.024	2.13	0.787	0.612	0.729	0.71
	4	4.532	3.48	4.198	4.07	0.35	0.496	0.555	0.47
	5	6.831	5.036	4.942	5.60	0.349	0.427	0.493	0.42

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Milling time (min)	Fic.	Size _{max} (μm)				Size _{min} (μm)			
		1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
130	1	6.119	5.627	5.889	5.88	0.525	0.583	0.486	0.53
	2	3.401	2.332	3.014	2.92	0.87	0.725	0.638	0.74
	3	8.372	3.508	3.462	5.11	0.718	0.552	0.581	0.62
	4	9.883	6.735	4.234	6.95	0.505	0.661	0.408	0.52
	5	4.07	5.55	4.999	4.87	0.62	0.562	0.485	0.56
180	1	5.838	10.216	4.358	6.80	0.426	0.559	0.378	0.45
	2	4.385	4.664	4.69	4.58	0.536	0.425	0.534	0.50
	3	7.094	5.215	4.198	5.50	0.612	0.736	0.7	0.68
	4	2.938	3.953	3.07	3.32	0.698	0.495	0.368	0.52
	5	5.36	3.981	6.06	5.13	0.321	0.408	0.467	0.40
300	1	5.175	5.145	2.268	4.20	0.7	0.584	0.729	0.67
	2	4.264	4.991	4.849	4.70	0.583	0.536	0.721	0.61
	3	2.122	4.036	6.802	4.32	0.581	0.408	0.263	0.42
	4	7.193	0.851	0.899	2.98	0.487	0.468	0.433	0.46
	5	5.039	6.471	4.017	5.18	0.407	0.52	0.573	0.50

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวจรีพร หนูคำ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 พฤศจิกายน 2526
สถานที่เกิด	พัทลุง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับ 2 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ป.บัณฑิต (วิชาชีพครู) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
ตำแหน่งปัจจุบัน	ครู คศ.1
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงเรียนพัทลุง 270 ถ.รามесวรรค์ ต.คูหาสวรรค์ อ.เมือง จ.พัทลุง 93000