

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุแม่เหล็ก

วัสดุแม่เหล็กเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งต้องงานออกแบบทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft (Soft magnetic materials) เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetize) และลบแม่เหล็ก (Demagnetize) ได้ง่าย มักจะถูกนำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Distribution power transformer) หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic transformers) สเตเตอร์ขนาดเล็ก (Stator) และตัวหมุน (Rotor) ในมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นต้น

2. วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard (Hard magnetic materials) เป็นวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำมาใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent magnets) ซึ่งยากต่อการทำให้ลบแม่เหล็กได้ เช่น แม่เหล็กถาวรที่มีอยู่ในลำโพง หูฟัง โทรศัพท์ ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) และ มอเตอร์เริ่มต้น (Starting motor) ในรถยนต์ เป็นต้น [1]

2.2 สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุเป็นผลโดยตรงที่มาจากโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน โมเมนต์แม่เหล็กของการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน และโมเมนต์แม่เหล็กของการหมุนของโปรตอนในนิวเคลียส แต่อิทธิพลของโมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนของโปรตอนมีผลน้อยมาก ซึ่งสามารถแยกสสารออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ตามสมบัติทางแม่เหล็กได้ดังนี้

1. กลุ่มไดอะแมกเนติกส์ (Diamagnetics) เป็นสารที่มีโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนรอบนิวเคลียส และการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนที่อยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมรวมกันเป็นศูนย์ โดยจะเกิดเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนอยู่ครบทุกเชลล์ (Shell) และเมื่อนำไปวางในสนามแม่เหล็กก็จะกลายเป็นแม่เหล็กขึ้นเล็กน้อยแต่มีทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก จึงทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของสารนี้มีค่าเป็นลบ และต่ำมาก ซึ่งพบมากในแร่ควอตซ์ (Quartz) แร่แกรไฟต์ (Graphite) หินอ่อน (Marble) และเกลือหิน (Rock salt) ที่เป็นส่วนประกอบของเปลือกโลก

2. กลุ่มพาราแมกเนติกส์ (Paramagnetics) เป็นสารที่อะตอมมีอิเล็กตรอนในเชลล์ (Shell) เป็นจำนวนคู่ ซึ่งเกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนเมื่อนำไปวางบนสนามแม่เหล็กภายนอก และสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำการเรียงโมเมนต์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของสารเป็นบวกแต่จะมีค่าลดลงอย่างพหุคูณกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ สารในกลุ่มนี้ได้แก่ แร่ไพรอกซีน (Pyroxene) แร่โอลิวีน (Olivine) และแร่ไบโอไทต์ (Biotite) เป็นต้น

3. กลุ่มเฟอร์โรแมกเนติกส์ (Ferromagnetics) เป็นสารที่มีโมเมนต์แม่เหล็กสูง ซึ่งเกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน และโมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละอะตอมในขอบเขตอันหนึ่งที่เรียกว่า โดเมน (Domain) จึงทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กมีค่าสูงแต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และหายไปกลายเป็นสารพาราแมกเนติกส์เมื่อถูกเผาเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สารในกลุ่มนี้ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ [2]

2.3 เฟอร์โรแมกเนติกส์

กลุ่มเฟอร์โรแมกเนติกส์ (Ferromagnetics) ได้แก่วัสดุที่มีสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) มากกว่า 1 มาก ๆ เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกส์ก็จะแสดงอำนาจแม่เหล็กขึ้นมา วัสดุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกส์ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

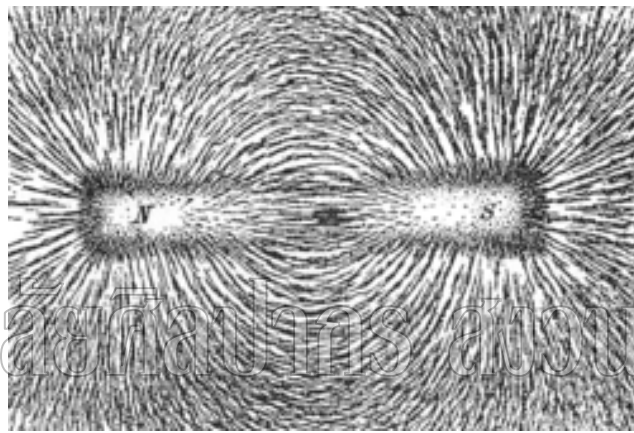
1. แม่เหล็กถาวร (Permanent magnets) คือ เฟอร์โรแมกเนติกส์ที่สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้ภายหลังจากที่สนามแม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำได้หมดไปแล้ว แม่เหล็กถาวรมีทั้งพวกที่เป็นโลหะผสมและพวกที่เป็นเซรามิก ซึ่งเรียกว่าแม่เหล็กเซรามิก (Ceramic magnets) โดยแม่เหล็กถาวรที่ดัดนั้นควรจะให้สนามแม่เหล็กที่สูงและมีน้ำหนักมวลที่ต่ำ ควรจะเสถียรต่อต้านอิทธิพลการลบแม่เหล็ก (Demagnetize) ได้ [2,3] แม่เหล็กถาวรมีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมมอเตอร์ไซค์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหะ อุตสาหกรรมเครื่องจักรอัตโนมัติ และอุตสาหกรรมน้ำมัน เป็นต้น

2. แม่เหล็กอ่อน (Soft magnets) ได้แก่ เฟอร์โรแมกเนติกส์ที่ไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้ภายหลังจากที่สนามแม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำหมดไป โดยมันจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (Permeability) ที่สูงแต่มีค่าสภาพลบด้านแม่เหล็ก (Coercivity) ที่น้อยมาก ตัวอย่างแม่เหล็กอ่อนที่สำคัญได้แก่ เหล็กกล้าผสมซิลิคอน เหล็กกล้าผสมนิกเกิลหรือที่เรียกเป็นชื่อทางการค้าว่า เพอร์มัลลอย (Permalloy)

2.4 หน่วยพื้นฐานต่าง ๆ ของแม่เหล็ก [1]

2.4.1. สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

โลหะจำพวกเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล เป็นธาตุโลหะเพียง 3 ชนิดที่สามารถเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงรอบตัวโลหะเองได้เมื่อถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ธาตุโลหะทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ การเกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งเหล็กที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากการนำผงแม่เหล็กมาโรยบนกระดาษที่มีแม่เหล็กอยู่ข้างใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะสังเกตเห็นแนวเส้นของสนามแม่เหล็กออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง

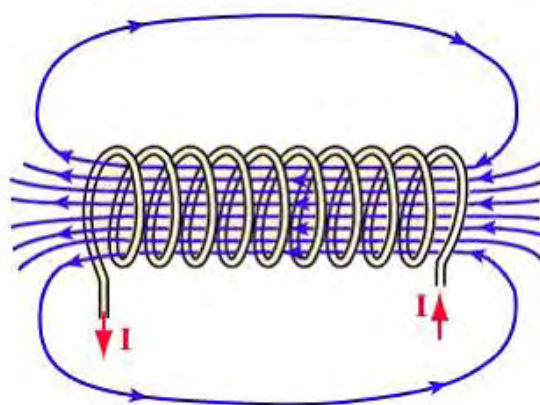


รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก [1]

โดยทั่วไป แม่เหล็กจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ สนามแม่เหล็กสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวนำ เช่นรูปที่ 2.2 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดทองแดง ซึ่งเรียกว่า โซเลนอยด์ (Solenoid) เมื่อมีกระแสไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มดังนี้คือ

$$H = \frac{0.4\pi ni}{l} \quad (2.1)$$

- เมื่อ H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) หรือ เออสเตด (Oersteds; Oe)
 l = ความยาวของขดลวดโซเลนอยด์, เมตร (m)
 n = จำนวนรอบของขดลวดโซเลนอยด์
 i = กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในขดลวดโซเลนอยด์, แอมแปร์ (A)



รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดโซเลนอยด์เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด [1]

หน่วยความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) คือ แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ในระบบหน่วย SI และ เออสเตด (Oersteds; Oe) ในระบบหน่วย cgs ความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 2 หน่วยคือ 1 แอมแปร์ต่อเมตร เท่ากับ $4\pi \times 10^{-3}$ เออสเตด

2.4.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction)

ถ้านำเอาแท่งเหล็กธรรมดาใส่เข้าไปในขดลวดจะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ภายนอกของขดลวดโซเลนอยด์จะมีความเข้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กนั้นถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดด้วย ความเข้มของสนามแม่เหล็กใหม่ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดโซเลนอยด์เองและที่เกิดขึ้นเนื่องจากแท่งแม่เหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น เราอาจเรียกความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction) หรือความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density) หรือ เรียกว่า การเหนี่ยวนำ (Induction) และเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ B ส่วนค่าของโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดจะ

เรียกว่าการทำให้เป็นแม่เหล็กหรือความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) และเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ M

ดังนั้น

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M) \quad (2.2)$$

เมื่อ μ_0 = ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (Permeability) ของช่องว่างอิสระ (Free space) $= 4\pi \times 10^{-7}$

เทสลา.เมตรต่อแอมแปร์ (T. m/A)

B = การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก, เวเบอร์ต่อตารางเมตร หรือ เทสลา (Wb/m²)

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, แอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m)

M = ความเป็นแม่เหล็ก, แอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m)

หน่วยที่กล่าวข้างต้นเป็นหน่วยในระบบ SI สำหรับกรณีหน่วยในระบบ cgs ค่า B จะมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss; G) และค่า H จะมีหน่วยเป็น เออสเตด (Oersted; Oe) สำหรับวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์นั้นค่า $\mu_0 M$ มักจะมีค่ามากกว่า $\mu_0 H$ ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงทำให้สามารถเขียนสมการ 2.2 ใหม่ได้ดังนี้

$$B = \mu_0 M \quad (2.3)$$

และบางครั้งค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) และ ค่าการทำให้เป็นแม่เหล็ก (M) อาจใช้ในความหมายเดียวกันได้

2.4.3. สภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็ก (Magnetic permeability)

ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า เมื่อนำเอาวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กนั้นมีความเข้มเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นนี้อาจบอกได้ด้วยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็ก (μ) ซึ่งถูกนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) และ สนามแม่เหล็ก (H) ดังนี้

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.4)$$

ถ้าเป็นสุญญากาศในสนามแม่เหล็ก

$$\mu = \mu_0 = \frac{B}{H} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ เทสลา.เมตรต่อแอมแปร์ (T.m/A)} \quad (2.5)$$

μ_0 คือค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของช่องว่างอิสระ

ส่วนค่าปริมาณสภาพให้ซึมผ่านได้เชิงสัมพัทธ์ (μ_r) ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่าง μ และ μ_0 ดังนี้

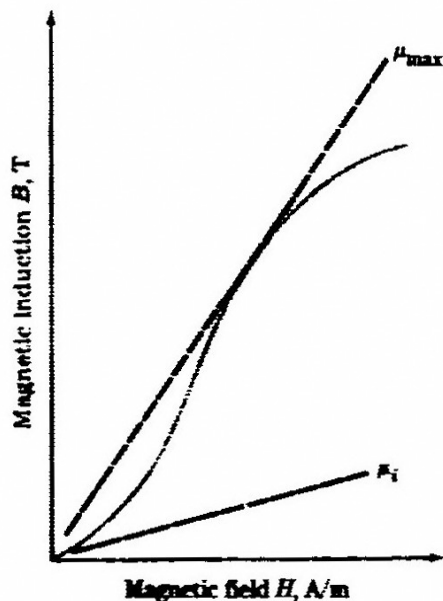
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.6)$$

และจากสมการที่ (2.4) จะได้

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (2.7)$$

ค่า μ_r เป็นค่าปริมาณที่ไม่มีหน่วย

ถ้าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็ก หรือ สภาพให้ซึมผ่านได้เชิงสัมพัทธ์มีค่ามากจะบอกให้ทราบว่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของแท่งแม่เหล็กในขดลวดจะมีค่ามาก



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็ก (B-H curve) ของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ [1]

ในบางครั้งเราอาจเปรียบเทียบสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเหมือนกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก (ฉนวนทางไฟฟ้า) แต่อย่างไรก็ตามค่าสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็กของวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติกส์จะไม่คงที่ ดังนั้นโดยปกติเมื่อกล่าวถึงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กจึงมักจะหมายถึงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ที่เริ่มต้น (μ_i) หรือค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ที่สูงสุด (μ_{max}) ซึ่งสามารถหาได้จากความชันบนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็ก (B-H curve) สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่สามารถถูกทำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่ายจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้แม่เหล็กสูง

2.4.4. สภาพรับไว้ได้แม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

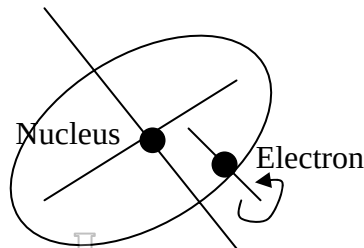
เนื่องจากค่าความเป็นแม่เหล็ก (M) จะเป็นปริมาณโดยตรงกับสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป (H) ดังนั้น จึงอาจเขียนสมการได้ดังนี้

$$M = \chi_m H \quad (2.8)$$

ซึ่งค่า χ_m คือค่า Proportionality factor ซึ่งอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสภาพรับไว้ได้แม่เหล็ก เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย วัสดุที่มีการตอบสนองต่อการเพิ่มของความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยจะถูกวัด ในเทอมของสภาพรับไว้ได้แม่เหล็ก

2.5 ชนิดของสภาวะแม่เหล็ก [1]

สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอน เคลื่อนที่ผ่านเส้นลวดตัวนำสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และใน ทำนองเดียวกัน สภาวะแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุก็เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของ อิเล็กตรอนเองและการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส (รูปที่ 2.4)



มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ 2.4 ภาพจำลองของการหมุนอิเล็กตรอนรอบตัวเองและรอบนิวเคลียส [1]

สภาวะแม่เหล็กแบ่งออกได้หลายลักษณะ ดังนี้ คือ

1. Diamagnetism คือ การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัสดุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสียดสีเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด ขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ขึ้นในอะตอม ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก จึงมีผลทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบซึ่งเรียกว่า Diamagnetism ผลของสภาวะแม่เหล็กแบบ Diamagnetism นี้ จะทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้แม่เหล็กเป็นลบเล็กน้อย ($\chi_m \approx -10^{-6}$) สภาวะแม่เหล็ก แบบ Diamagnetism จะเกิดขึ้นได้กับวัสดุทุกชนิด แต่มักจะถูกหักล้างด้วยผลของสภาวะแม่เหล็ก เจริญบวก อย่างไรก็ตามพฤติกรรมสภาวะแม่เหล็กแบบ Diamagnetism จะไม่มีความสำคัญต่องาน ทางด้านวิศวกรรมเท่าใดนัก

2. Paramagnetism คือ วัสดุที่สามารถแสดงสภาพรับไว้ได้แม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) ในเชิงบวกเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก เรียกว่า Paramagnetism และสภาวะ แม่เหล็กแบบ Paramagnetism ของวัสดุจะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็ก วัสดุ

แม่เหล็กแบบ Paramagnetism นี้ มักจะมีค่าสภาพรับไว้ได้แม่เหล็กอยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-2} ซึ่งสภาวะแม่เหล็กแบบ Paramagnetism นี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากการเรียงตัวของ Magnetic dipole moments ของอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทิศทางของการเรียงตัวของ Magnetic dipole moment นี้จะเกิดความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลทำให้สภาวะแม่เหล็กแบบ Paramagnetism นี้ลดลง

3. Ferromagnetism ดังที่ได้กล่าวข้างต้นถึง Diamagnetism และ Paramagnetism จะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกใส่เข้าไปและจะยังคงสภาวะแม่เหล็กนั้นได้ ตราบเท่าที่สนามแม่เหล็กนั้นยังคงอยู่ แต่ยังมีสภาพสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า Ferromagnetism เป็นสภาวะแม่เหล็กที่สามารถทำให้คงอยู่ได้ แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดไปได้ตามต้องการ สภาวะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism จึงมีความสำคัญมากต่องานในด้านวิศวกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กเช่นนี้และมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล นอกจากนี้แกโดลิเนียมซึ่งเป็นธาตุจำพวกแร่หายาก (Rare earth) ก็ยังสามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ได้เช่นกัน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส

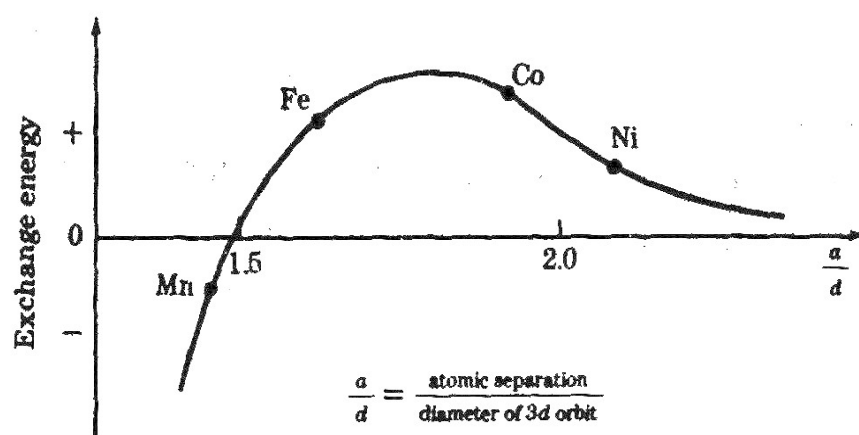
สมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ของธาตุแทรนซิชัน พวกละเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นในเกิดการหมุนรอบตัวเอง และจัดเรียงตัวในโครงผลึก ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่เป็นคู่และหมุนสวนทิศทางกันในระดับพลังงานชั้นในจะไม่ให้ผลของ Magnetic dipole moment นอกจากนี้อิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence electrons) ของอะตอม ก็จะไม่แสดงผลของ Magnetic dipole moment เช่นกันเพราะอิเล็กตรอนนั้นเกิดพันธะทางเคมีกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมอื่น ดังนั้น จึงอาจกล่าวสรุปได้ว่าอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นในของอะตอมเท่านั้นที่จะมีบทบาทสำคัญต่อการแสดงสภาพสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism เช่น เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่อยู่ที่ชั้นระดับพลังงาน 3d ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จำนวน 4, 3 และ 2 ตามลำดับจึงทำให้ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลสามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ได้

อิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ในระดับพลังงาน 3d ของอะตอม เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล จะสามารถจัดเรียงตัวขนานกันตัวเองซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่าการเกิดสภาวะแม่เหล็กได้เอง (Spontaneous magnetization) และจะเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างกันมีค่าเป็นบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะห่างของอะตอม (Atomic spacing; a) และเส้นผ่านศูนย์กลางของ 3d - ออร์บิทัล (d) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.4 - 2.7 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล มีค่าอัตราส่วน a/d อยู่ในช่วงดังกล่าว จึงทำให้ค่า

พลังงานแลกเปลี่ยนเป็นบวก ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ในระดับพลังงาน 3d ของ อะตอมเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล สามารถเกิดการจัดเรียงตัวขนานกันได้เอง ในบริเวณเล็ก ๆ ที่ เรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (Magnetic domains) ในทางตรงกันข้าม แม้ว่าแมงกานีสและโครเมียมจะมี อิเล็กตรอนไม่มีคู่อยู่ในระดับพลังงาน 3d เช่นกัน แต่ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวขนานกันได้ เพราะพลังงานแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Unpaired 3d electrons	Atom	Number of electrons	Electronic configuration 3d orbitals					4s electrons
3	V	23						2
5	Cr	24						1
5	Mn	25						2
4	Fe	26						2
3	Co	27						2
2	Ni	28						2
0	Cu	29						1

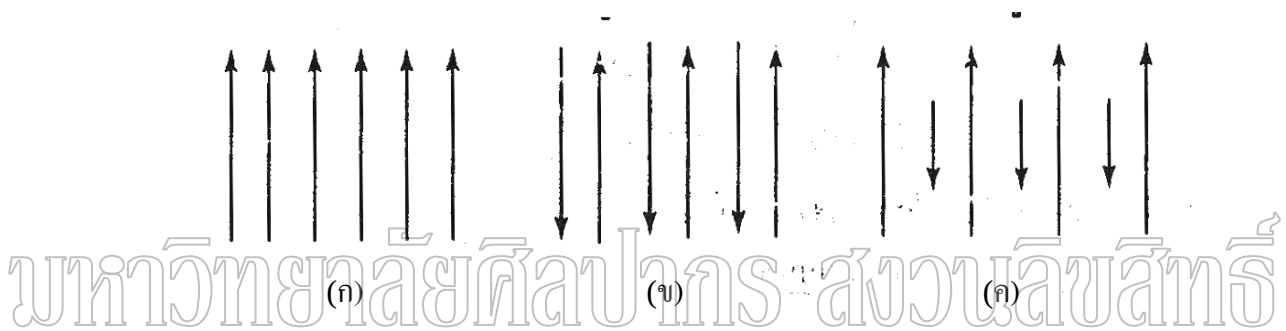
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงอิเล็กตรอนใน 3d-ออร์บิทัลของธาตุแทรนซิชัน [1]



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแลกเปลี่ยนกับค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของอะตอม และเส้นผ่านศูนย์กลางของ 3d-ออร์บิทัล (a/d) ของธาตุแทรนซิชันบางชนิด [1]

โดยปกติอิเล็กตรอนเดี่ยวในระดับพลังงาน 3d จะมีการจัดเรียงตัวขนานกันที่อุณหภูมิห้อง ในบริเวณโดเมนแม่เหล็กหนึ่ง ๆ แต่ถ้าโดเมนแม่เหล็กเกิดการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันเสียก่อนจะทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ได้ ซึ่งกระทำได้โดยการใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปและเมื่อเอาสนามแม่เหล็กนั้นออก การเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กก็ยังคงมีความเป็นระเบียบเช่นเดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สถานะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ก็ยังคงสภาพอยู่เช่นเดิมแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกอยู่แล้วก็ตาม

4. Antiferromagnetism เป็นสถานะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวัสดุบางชนิด กล่าวคือ Magnetic dipoles ของอะตอมของวัสดุที่มีสมบัติเช่นนี้ จะเรียงตัวในทิศทางที่ตรงข้ามกับเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของ Magnetic dipoles ของ (ก) Ferromagnetism (ข) Antiferromagnetism (ค) Ferrimagnetism [1]

วัสดุที่แสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กแบบ Antiferromagnetism เช่น แมงกานีส และโครเมียม เมื่ออยู่ในสภาพของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะแสดงค่าพลังงานแลกเปลี่ยนเป็นลบเนื่องจาก $a/d < 1.4$

5. Ferrimagnetism โดยวัสดุเซรามิกบางชนิดจะประกอบด้วยไอออนต่างชนิดกันซึ่งมี Magnetic moments มากน้อยแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อ Magnetic moments เหล่านี้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน รูปที่ 2.7 (ค) Magnetic moment เหล่านั้นจะไม่หักล้างกันหมด แต่จะยังคงมีค่า Magnetic moment สุทธิในทิศทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กได้ เราเรียกวัดูลเหล่านี้ว่าเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เป็นต้น วัสดุเฟอร์ไรต์จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ จึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กันอย่างกว้างขวาง

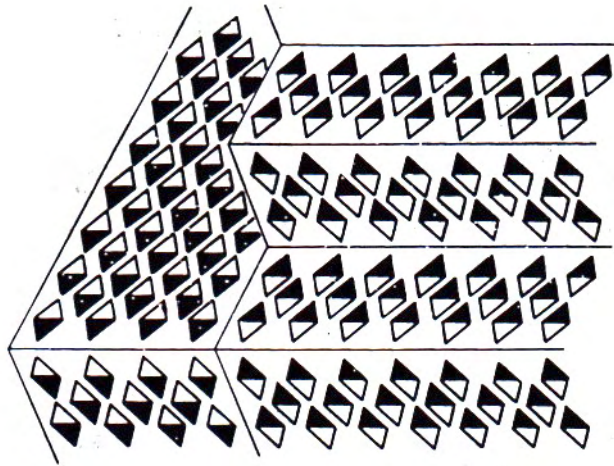
2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism [1]

ณ อุณหภูมิหนึ่งที่สูงกว่า 0 เคลวิน พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ Magnetic dipoles ของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวขนานกันคืออยู่แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไป และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) วัสดุจำพวก Ferromagnetism เดิมจะหมดสภาพไปโดยสิ้นเชิง และวัสดุนั้นจะกลายเป็นวัสดุที่แสดงสถานะแม่เหล็กแบบ Paramagnetism แทน แต่เมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์นั้น ถูกนำมาทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิคูรีอีกครั้ง โดเมนแม่เหล็กจะจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้ง และจะได้วัสดุที่มีสมบัติสถานะแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ดังเดิม อุณหภูมิคูรีของ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล นั้นมีค่าเท่ากับ 770, 1123 และ 358 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

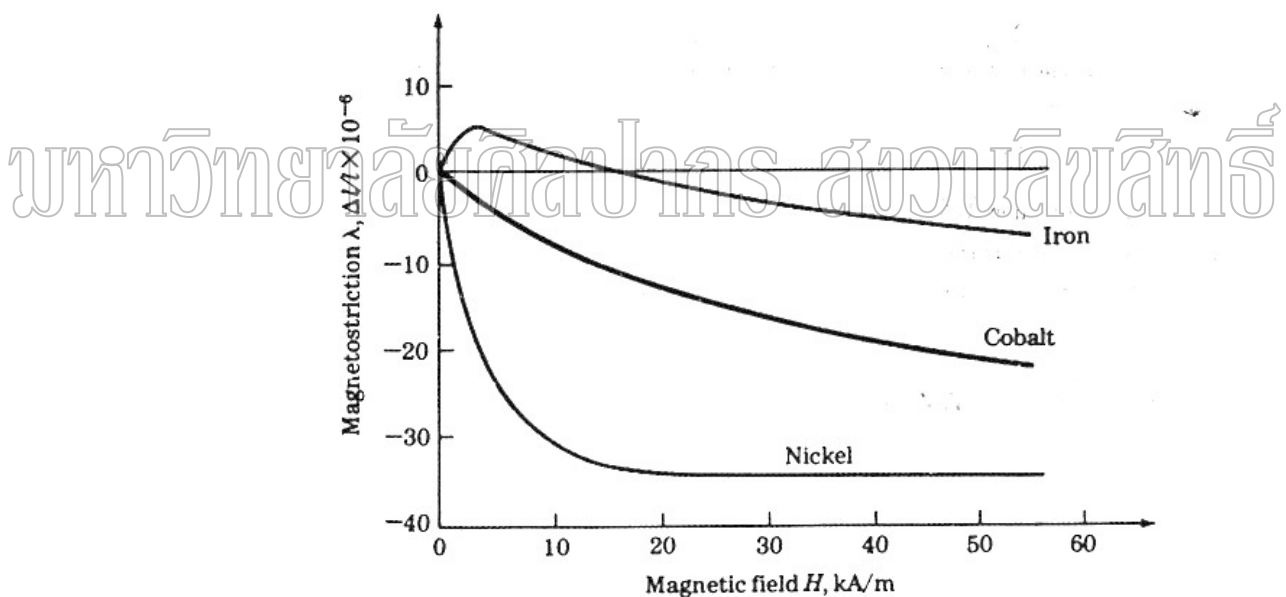
2.7 Ferromagnetic domains [1]

โดยปกติที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 0 เคลวิน พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ Magnetic dipoles moment ของอะตอมของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางที่ขนานกันในบริเวณเล็ก ๆ ที่เรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (Magnetic domains) แต่ในบางครั้งวัสดุนั้นอาจจะยังไม่สามารถแสดงสถานะแม่เหล็กได้ เนื่องจากแต่ละโดเมนยังมีการจัดวางตัวในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบทำให้ผลรวมสุทธิของ Magnetic moment ของวัสดุทั้งชิ้นมีค่าน้อยหรือเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ซึ่งสามารถทำให้โดเมนแต่ละโดเมนมีการจัดเรียงอย่างมีระเบียบไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกได้โดยการเคลื่อนที่และการหมุนของผนังของโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในช่วงแรกของผนังของโดเมนจะเติบโตขึ้นโดยการเริ่มเคลื่อนตัวก่อนที่จะเกิดการหมุน เนื่องจาก การเคลื่อนตัวจะใช้พลังงานน้อยกว่า ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรก ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) หรือ การทำให้เป็นแม่เหล็ก (M) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อโดเมนสิ้นสุดการเคลื่อนตัวแล้ว ถ้ายังมีการเพิ่มของสนามแม่เหล็กภายนอกแล้วจะทำให้โดเมนเกิดการหมุน ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องใช้พลังงานที่มากกว่าการเคลื่อนตัวทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) หรือ การทำให้เป็นแม่เหล็ก (M) ลดน้อยลง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ความชัน ณ จุดต่าง ๆ ของเส้นโค้งการทำให้เป็นแม่เหล็ก (M) และ สนามแม่เหล็ก (H) ลดลง (รูปที่ 2.9)

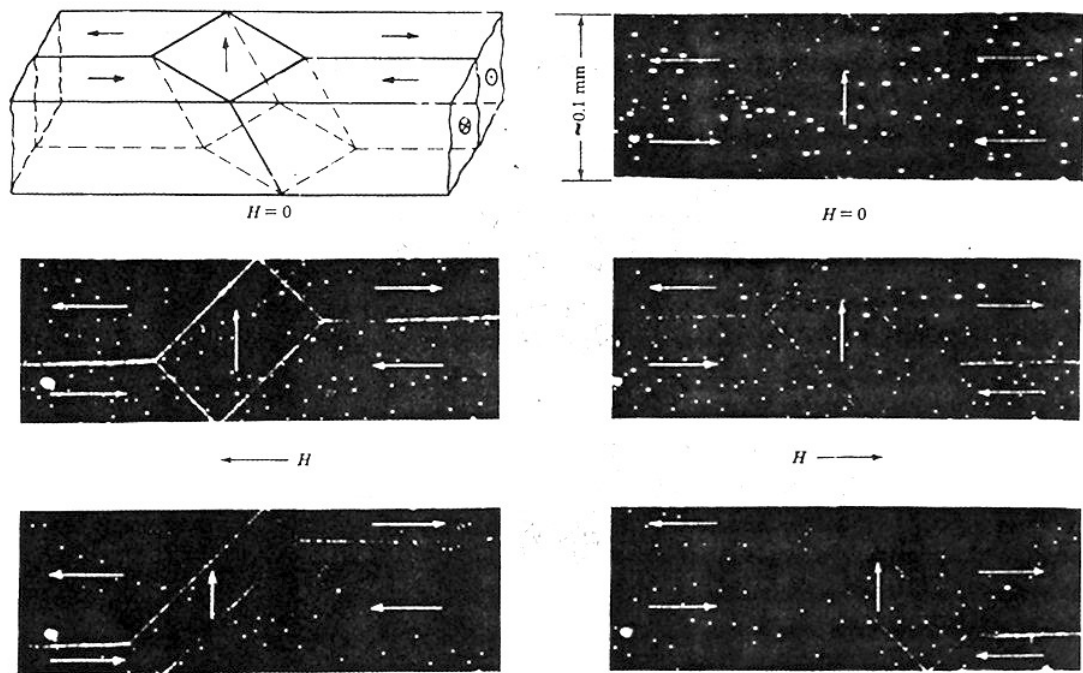


รูปที่ 2.8 โดเมนแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ [1]



รูปที่ 2.9 การเจริญเติบโตและการหมุนของ Magnetic domain เมื่อวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ถูกทำให้เป็นแม่เหล็ก [1]

เมื่อหยุดการป้อนสนามไฟฟ้าขึ้นตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กยังคงรักษาสภาพแม่เหล็กนั้นอยู่ แม้ว่าจะมีความปั่นแม่เหล็กบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากแนวโน้มของโดเมนบางส่วนมีการหมุนตัวกลับสู่ตำแหน่งการเรียงตัวแบบเดิม



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของขอบเขตของโดเมนภายในโครงสร้างของเหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไป จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น โดเมนพร้อมด้วยข้อั้วไดโพลที่เรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กจะใหญ่ขึ้นในขณะที่โดเมนที่มีข้อั้วไดโพลตรงข้ามจะมีขนาดเล็กลง [1]

รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าผนังของโดเมนเกิดการหมุนอย่างไร เมื่อแท่งเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเดียวอยู่ภายใต้สภาวะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคบิตเตอร์ (Bitter technique) ศึกษาผนังของโดเมน ซึ่งจะใช้สารละลายคอลลอยด์ของเหล็กออกไซด์ฉาบบนพื้นผิวของเหล็กที่ถูกขัดจนเรียบ และสังเกตการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนจากจอภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical microscope) โดยวิธีการดังกล่าวทำให้ทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนภายใต้สภาวะที่ถูกป้อนด้วยสนามแม่เหล็ก

2.8 ประเภทต่าง ๆ ของพลังงานที่เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของ Ferromagnetic domains [1]

โครงสร้างของโดเมนของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ถูกกำหนดด้วยพลังงานหลายประเภท และโครงสร้างนั้นจะเสถียรที่สุดก็ต่อเมื่อผลรวมของพลังงานศักย์ทั้งหมดมีค่าต่ำสุด พลังงานที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้คือ

2.8.1 พลังงานแลกเปลี่ยน (Exchange energy)

พลังงานแลกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ที่อยู่ภายในโดเมนของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ พลังงานนี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อโดโพลมีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าพลังงานศักย์นี้จะลดลงแต่ค่าพลังงานศักย์ภายนอกจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดสนามแม่เหล็กภายนอก

2.8.2 พลังงาน Magnetostatic

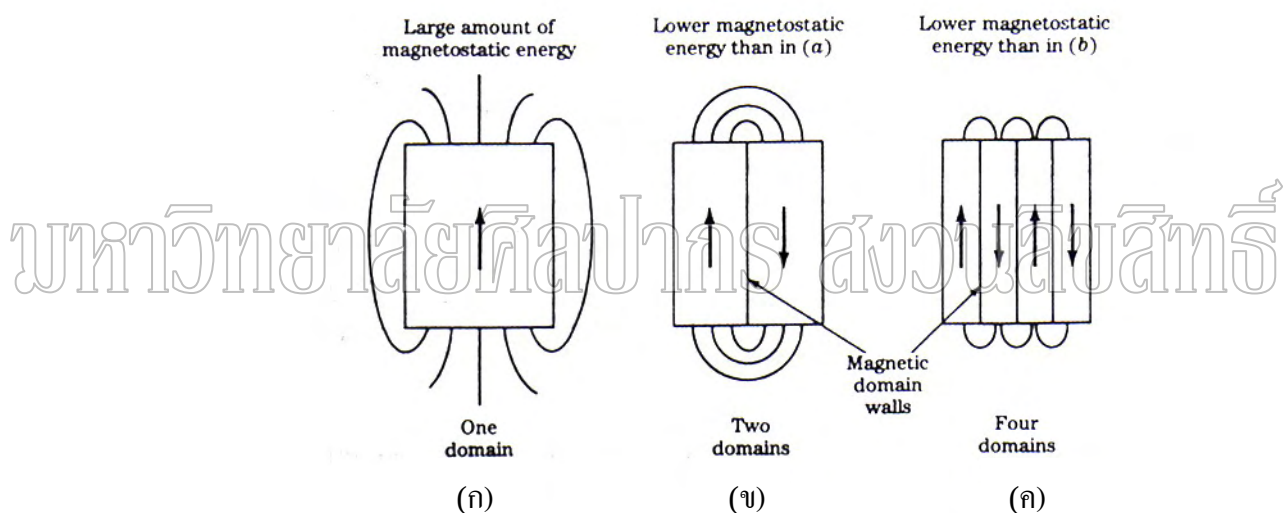
พลังงาน Magnetostatic เป็นพลังงานศักย์ของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานนี้จะสามารถถูกทำให้ต่ำลงได้โดยการเพิ่มจำนวนโดเมนแม่เหล็กจาก 1 เป็น 2 และ 4 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ที่มีปริมาตรหนึ่งหน่วยซึ่งมีโครงสร้างเพียงหนึ่งโดเมนนั้น จะมีพลังงานศักย์สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) แต่ถ้าโดเมนถูกแบ่งออกเป็น 2 โดเมน ความเข้มและปริมาณของสนามแม่เหล็กภายนอกจะลดลง แต่ถ้าแบ่งโดเมนให้มากยิ่งขึ้นเป็น 4 โดเมน สนามแม่เหล็กภายนอกก็จะลดน้อยลงอีก (รูปที่ 2.11 (ค)) เนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับพลังงาน Magnetostatic ของวัสดุนั้น ดังนั้น ถ้ายังมีโดเมนจำนวนมากก็ที่ยังลดค่าพลังงาน Magnetostatic ของวัสดุลง

2.8.3 พลังงาน Magnetocrystalline anisotropy

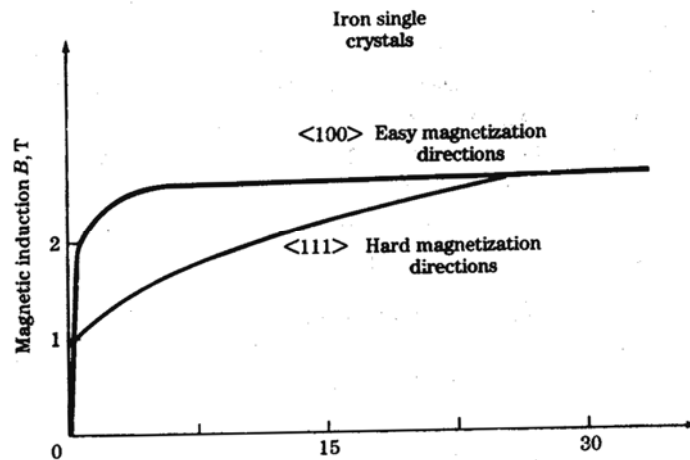
ก่อนที่จะพิจารณาขอบเขตหรือผนังของโดเมน เมื่อพิจารณาถึงผลของทิศทางของโครงสร้างผลึกที่มีต่อค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปให้กับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ที่มีโครงสร้างผลึกเดียวจะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก รูปที่ 2.12 ได้แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับสนามแม่เหล็ก (H) ที่ถูกป้อนเข้าไป สำหรับการเกิดสถานะแม่เหล็กในทิศทาง [100] และ [111] ของเหล็กโครงสร้างผลึกเดี่ยวที่มีโครงสร้างแบบ BCC จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุด (หรือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปสูงที่สุด) บนทิศทาง [111] ดังแสดงในรูปที่ 2.12 หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ทิศทาง [111] เป็นทิศทางที่ยากต่อการเกิดสถานะแม่เหล็กในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ BCC สำหรับนิกเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC นั้น ทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสถานะแม่เหล็กคือ ทิศทาง [111] และทิศทางที่ยากต่อการเกิดสถานะความเป็นแม่เหล็ก คือ ทิศทาง [100] ซึ่งเห็นได้ว่าทิศทางที่ยาก

ต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กของนิเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จะตรงข้ามกับของเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC

เกรนที่มีอยู่ในวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ที่มีโครงสร้างหลายผลึก เช่น เหล็กและนิเกิล มักจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน เกรนที่มีทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กมักจะให้ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่มากกว่าเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใส่เข้าไปมีค่าน้อย แต่เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปเพิ่มมากขึ้น ทิศทางของเกรนที่ยากต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กนั้นก็จะหมุนเพื่อปรับทิศทางไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น เป็นผลทำให้ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น พลังงานที่ใช้ในการหมุนโดเมนที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของทิศทางของเกรนนี้ จะเรียกว่า พลังงาน Magnetocrystalline anisotropy



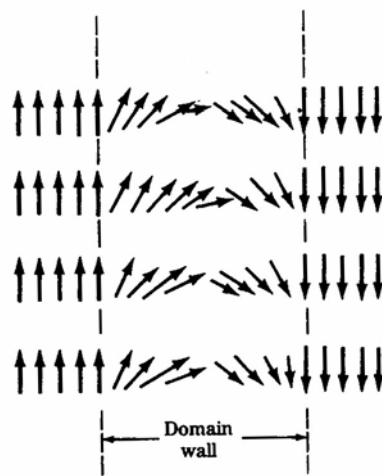
รูปที่ 2.11 การลดลงของพลังงาน Magnetostatic energy เมื่อขนาดของโดเมนเพิ่มขึ้นเป็น (ก) 1 โดเมน (ข) 2 โดเมน และ (ค) 4 โดเมน [1]



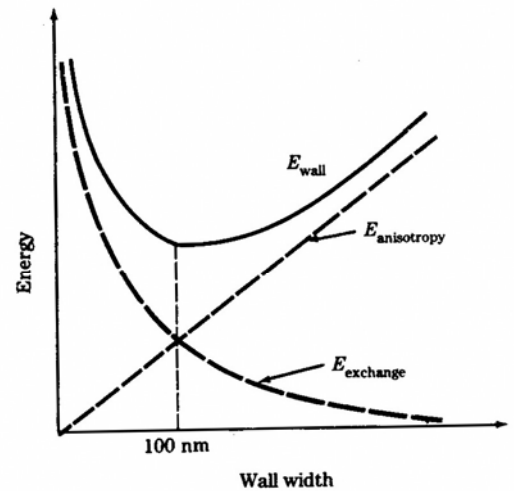
รูปที่ 2.12 พลังงาน Magnetocrystalline anisotropy ในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ BCC [1]

2.8.4 พลังงานโดเมน

ผนังโดเมนหมายถึงขอบเขตที่อยู่ระหว่างโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) ซึ่งคล้ายคลึงกับขอบเขตของเกรน แต่ต่างกันที่ทิศทางของเกรนจะแตกต่างจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่ง โดยที่ผนังที่ ดังนั้นขอบเขตของเกรนจึงแคบมีขนาดประมาณเท่ากับอะตอม 3 อะตอม แต่ในทางตรงกันข้าม ทิศทางของโดเมนจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากโดเมนหนึ่งไปยังอีกโดเมนหนึ่ง โดยไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จึงทำให้ผนังโดเมนกว้างกว่ามีขนาดโดยประมาณเท่ากับอะตอม 300 อะตอม รูปที่ 2.13 (ก) แสดงภาพวาดของขอบเขตของโดเมนที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ Magnetic moment 180 องศา ซึ่งเกิดขึ้นทีละน้อยในบริเวณขอบเขต



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) การจัดเรียงตัวของขั้วแม่เหล็ก (Magnetic dipole) ที่บริเวณผนัง และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแลกเปลี่ยน พลังงาน Magnetocrystalline anisotropy และความกว้างของผนัง [1]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

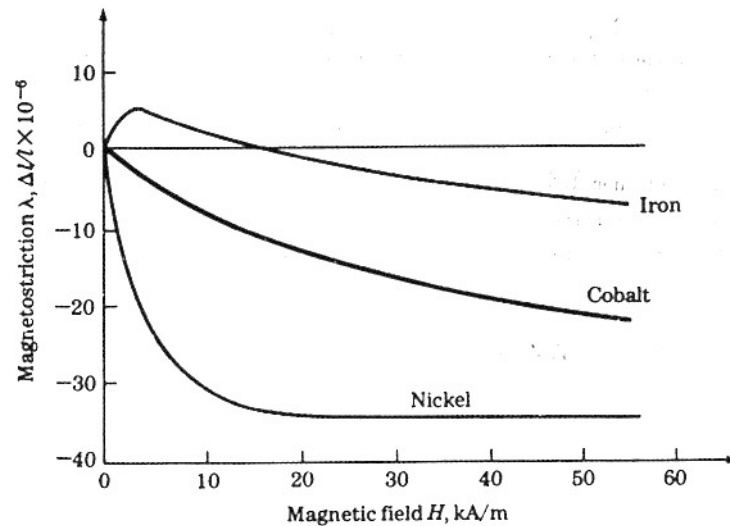
ความกว้างของผนังโดเมนจะขึ้นกับความสมดุลระหว่างพลังงานแลกเปลี่ยน และพลังงาน

Magnetocrystalline anisotropy กล่าวคือ ถ้าทิศทางระหว่างขั้วไดโพลมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย รูปที่ 2.13 (ก) แรงแลกเปลี่ยน (Exchange forces) ระหว่างขั้วไดโพลก็จะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลทำให้พลังงานแลกเปลี่ยนลดลงเช่นกัน (รูปที่ 2.13 (ข)) ด้วยเหตุผลนี้แรงแลกเปลี่ยน (Exchange forces) จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้ผนังโดเมนกว้างขึ้น ในทางตรงกันข้ามผนังโดเมนยิ่งกว้างขึ้นพลังงาน Magnetocrystalline anisotropy จะกลับยิ่งเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 2.13 (ข)) ดังนั้นความกว้างของผนังที่สถานะสมดุลจะอยู่ที่ความกว้างที่ผลรวมของพลังงานทั้งสองมีค่าต่ำที่สุด (รูปที่ 2.13 (ข))

2.8.5 พลังงาน Magnetostrictive

เมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็ก ขนาดของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการยืดตัวหรือหดตัวในทิศทางของการเกิดสถานะแม่เหล็ก (รูปที่ 2.14) ความเครียดแบบยืดหยุ่น (Elastic strain) หรือปรากฏการณ์ยืดตัวหรือหดตัวที่ถูกเหนี่ยวนำเนื่องจากวัสดุถูกทำให้เป็นแม่เหล็กนี้ จะเรียกว่า Magnetostriction และมีค่าในระดับ 10^{-6} พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นทางกลศาสตร์โดย Magnetostriction นี้จะเรียกว่า พลังงาน

Magnetostrictive ในกรณีของเหล็ก ค่า Magnetostriction จะมีค่าเป็นบวกที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำ และมีค่าเป็นลบที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงดังรูปที่ 2.14



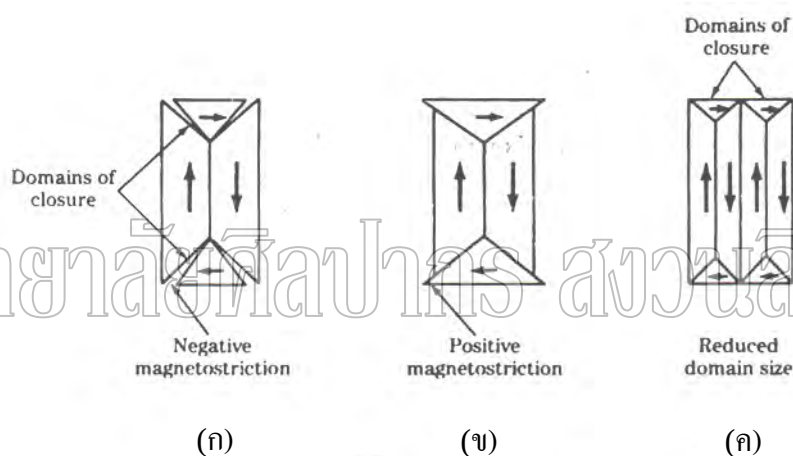
รูปที่ 2.14 ปรากฏการณ์ Magnetostrictive ของธาตุจำพวกเฟอร์ไรต์แม่เหล็ก เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล ค่า Magnetostriction คือค่าแสดงสัดส่วนการยืดตัว (หรือหดตัว) ซึ่งแสดงในหน่วยของ ไมโครเมตรต่อเมตร [1]

สาเหตุของการเกิด Magnetostriction อาจอธิบายได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะระหว่างอะตอมในวัสดุเฟอร์ไรต์แม่เหล็ก โดยไดโพลโมเมนต์เกิดขึ้นได้โดยการหมุนของอิเล็กตรอนเพื่อการจัดเรียงตัวในระหว่างการเกิดสถานะสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะดึงดูดหรือผลักซึ่งกันและกันก่อให้เกิดการหดตัวหรือยืดตัวของพันธะโลหะในขณะการเกิดสถานะแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาผลของการเกิด Magnetostriction ที่มีต่อการเรียงตัวของโครงสร้างโดเมนในวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ซึ่งมีลักษณะสมมาตรกัน การเกิดโดเมนที่มีรูปร่างลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมเรียกว่า Domains of closure ที่บริเวณปลายสุดของโครงสร้างจะสามารถกำจัดพลังงาน Magnetostrictive ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกได้เป็นผลให้พลังงานของวัสดุลดลง โดเมนที่มีขนาดใหญ่มา ๆ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) น่าจะมีการจัดเรียงตัวที่เสถียรมากและมีพลังงานต่ำ แต่ปรากฏว่าไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดความเค้น Magnetostrictive ในระหว่างการเกิดสถานะแม่เหล็กมากกว่าโดเมนที่มี

ขนาดเล็ก ดังนั้นการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) จะสามารถลดความเค้น Magnetostrictive ลงในขณะที่พื้นที่ของผนังโดเมนและพลังงาน Magnetostatic เพิ่มขึ้น ดังนั้น การจัดเรียงตัวจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ก็ต่อเมื่อผลรวมของพลังงาน Magnetostrictive และผนังโดเมนมีค่าต่ำ

อาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างของโดเมนที่เกิดขึ้นในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์จะถูกกำหนดโดยผลรวมของพลังงานที่เกิดขึ้นจากพลังงานชนิดต่าง ๆ ดังที่กล่าวข้างต้น ได้แก่ พลังงานแลกเปลี่ยน พลังงาน Magnetostatic พลังงาน Magnetocrystalline anisotropic พลังงานผนังโดเมน และพลังงาน Magnetostrictive โดยที่การจัดเรียงที่สมดุลและมีความเสถียร คือ การจัดเรียงตัวที่ทำให้ผลรวมของพลังงานมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 2.15 การเกิด Magnetostriction ในวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างลูกบาศก์ โดยแสดง (ก) Magnetostriction เชิงลบ (Negative magnetostriction) (ข) Magnetostriction เชิงบวก (Positive magnetostriction) และ (ค) การลดความเค้น Magnetostrictive โดยการทำให้ขนาดของโครงสร้างโดเมนมีขนาดเล็กลง [1]

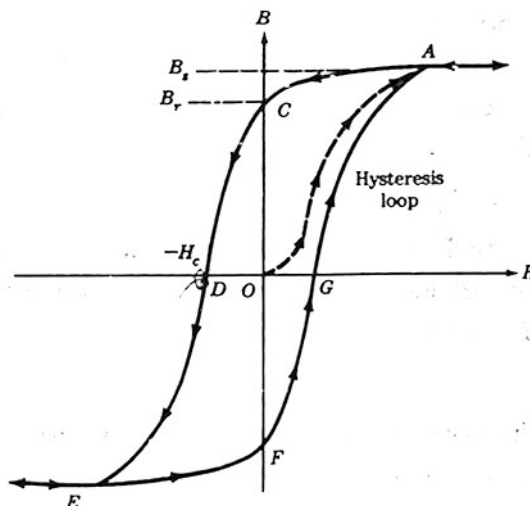
2.9 การทำให้โลหะจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์เกิดสภาวะแม่เหล็ก และหมดสภาวะแม่เหล็ก [1]

โลหะจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ เช่น เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล จะให้ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กค่อนข้างสูงหรือเกิดสภาวะแม่เหล็กค่อนข้างมากเมื่อถูกนำมาวางในสนามแม่เหล็ก และสภาวะแม่เหล็กนั้นจะยังคงเหลืออยู่บางส่วนเมื่อนำออกจากสนามแม่เหล็กแล้ว

เมื่อพิจารณาถึงผลของการใช้สนามแม่เหล็กภายนอก (H) ต่อ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) ของโลหะจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ในระหว่างการทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็ก (Magnetization) และ

ทำให้หมดสถานะแม่เหล็ก (Demagnetization) ซึ่งผลปรากฏว่าสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับสนามแม่เหล็ก (H) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.16

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในโลหะจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากค่าศูนย์ตามเส้นโค้ง OA จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว (Saturation induction) ที่จุด A และเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนถึงศูนย์ เส้นโค้งที่แสดงปริมาณการเหนี่ยวนำแม่เหล็กจะไม่กลับมาตามแนวเส้นโค้งเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง AC ใหม่ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าโลหะจะยังคงแสดงสถานะแม่เหล็กอยู่แม้จะนำเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก ($H=0$) แล้วก็ตาม โดยแสดงค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเท่ากับ B_r (จุด C) จึงถูกเรียกว่า Remanent induction ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กของโลหะจะลดลงเป็นศูนย์หรือหมดสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง เมื่อใส่แม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามในปริมาณความเข้มเท่ากับ H_c (จุด D) ซึ่งเรียกว่า แรงลบด้างแม่เหล็ก (Coercive force) ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศหรือให้ติดลบมากขึ้น ก็จะทำให้โลหะมีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้ง DE ในทิศทางตรงข้ามจากเดิม และจะอิ่มตัวที่จุด E เมื่อหยุดการให้สนามแม่เหล็กกลับทิศนี้ ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กก็จะเปลี่ยนแปลงตามแนวเส้นโค้ง EF และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปอีก เส้นโค้งการเหนี่ยวนำแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็ก (B-H curve) จะดำเนินตามแนว EGA ได้รูป (Loop) ที่สมบูรณ์ครบหนึ่งรอบ ซึ่งเรียกว่า ลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) พื้นที่ภายในทั้งหมดของลูป (Loop) จะแสดงถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียเพื่อใช้ในการทำให้โลหะแสดงสถานะแม่เหล็กหรือทำให้สถานะแม่เหล็กนั้นหมดไป



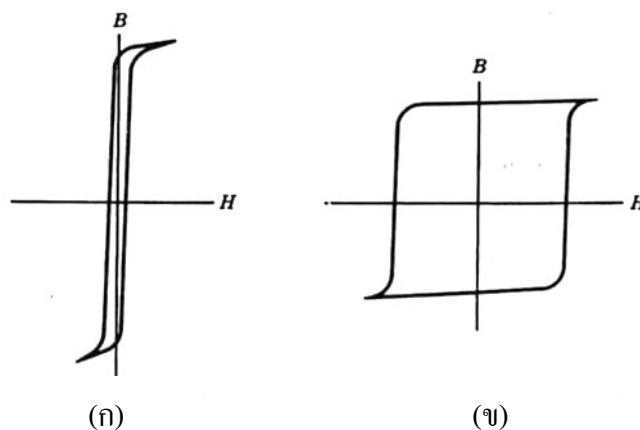
รูปที่ 2.16 ลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ [1]

2.10 วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft [1]

เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กหรือหมดสถานะแม่เหล็กได้ง่าย แต่วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard จะทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กหรือหมดสถานะแม่เหล็กได้ยากกว่า ในอดีตวัสดุแม่เหล็กแบบ Soft และ Hard มักจะอ่อนและแข็งตามสมบัติทางกายภาพตามลำดับ แต่ปัจจุบันนี้ความแข็งของวัสดุแม่เหล็กไม่จำเป็นต้องเป็นตัวบ่งบอกถึงชนิดของวัสดุแม่เหล็กนั้น

วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft เช่น โลหะผสมที่ประกอบด้วยเหล็กและ 3.4 เปอร์เซ็นต์ของซิลิกอน ซึ่งถูกใช้ทำแกนของหม้อแปลงมอเตอร์ และเครื่องปั่นไฟ จะมีลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่เรียวและแคบ ซึ่งมีค่าแรงลบด้างแม่เหล็ก (Coercive forces) ค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ในทางตรงกันข้ามวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard ที่มักถูกใช้เป็นแม่เหล็กถาวรจะมีลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่กว้างซึ่งมีค่าแรงลบด้างแม่เหล็ก (Coercive force) ค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข)

วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft ควรจะมีลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่มีค่าแรงลบด้างแม่เหล็ก (Coercive force) ต่ำและมีรูปร่างที่เรียวและแคบ เพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กและให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (Magnetic permeability) และค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กจนอิ่มตัว (Saturation induction) สูง



รูปที่ 2.17 ลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของ (ก) วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft (ข) วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard [1]

พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กแบบ Soft นั้นมีดังนี้ คือ

1. พลังงานสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis energy losses) เป็นพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ในการพลิกหรือทำให้ผนังโดเมนเคลื่อนที่ในระหว่างการทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็ก (Magnetization) และหมดสภาวะแม่เหล็ก (Demagnetization) เพราะฉะนั้นถ้ามีสิ่งแปลกปลอม หรือความบกพร่องภายในโครงสร้างก็จะทำให้พลังงานสูญเสียนี้นี้มีมากขึ้น ความเครียดแบบยืดหยุ่น (Elastic strain) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation) ภายในวัสดุแม่เหล็กก็จะเพิ่มความสูญเสียของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) เช่นกัน โดยทั่วไปพื้นที่ภายในของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) จะเป็นตัววัดการสูญเสียของพลังงานเนื่องจาก Magnetic hysteresis

ภายในแกนแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่มีกระแสไฟฟ้าความถี่ 60 รอบต่อวินาทีไหลผ่าน จะเกิดลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) 60 ครั้งต่อวินาที และในแต่ละครั้งก็จะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนของวัสดุแม่เหล็กภายในแกนแม่เหล็กภายในแกนของหม้อแปลงนั้น ดังนั้น ถ้าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้การสูญเสียพลังงานฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) เพิ่มขึ้นด้วย

2. พลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy-current energy losses) เมื่อแกนแม่เหล็กถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสลับจะทำให้สนามแม่เหล็กแกว่งไปมา ซึ่งจะก่อให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นและก่อให้เกิดกระแสไหลวนที่เรียกว่า กระแสเอ็ดดี้ (Eddy-current) ขึ้นภายในเนื้อวัสดุ และเนื่องจากภายในเนื้อวัสดุมีความต้านทานเมื่อกระแสไหลวนนี้ไหลผ่านก็จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนซึ่งเรียกพลังงานที่สูญเสียนี้ว่าพลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเพราะชั้นฉนวนระหว่างวัสดุแม่เหล็กนี้จะป้องกันกระแสไหลวนเหล่านี้จากแกนหนึ่งไปยังอีกแกนหนึ่งได้ วิธีป้องกันการเกิดพลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนกระทำได้โดยการใส่แผ่นฉนวนกันระหว่างแกนแม่เหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูง ๆ อาจใช้วัสดุแม่เหล็กแบบ Soft ที่ค่อนข้างจะเป็นฉนวน เช่น วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกออกไซด์ (Ferromagnetic oxides) กันระหว่างแกนแม่เหล็ก

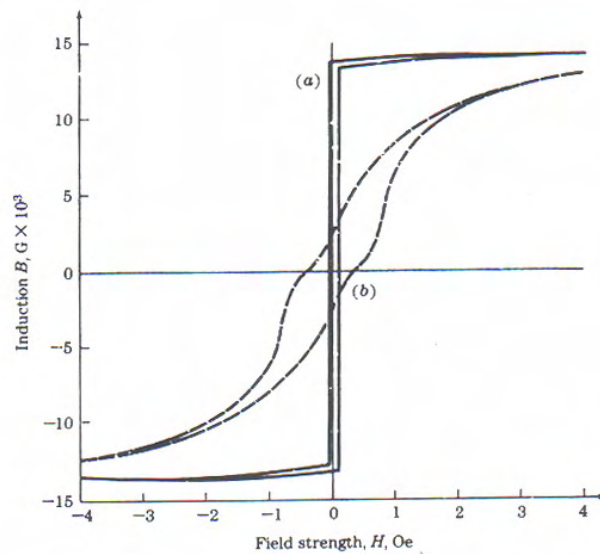
2.11 วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard [1]

โลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับเหล็กจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (Magnetic permeability) สูง เพราะว่าพลังงาน Magnetoanisotropy และ Magnetostriuctive ของโลหะผสมชนิดนี้จะมีค่าต่ำตามสัดส่วนองค์ประกอบที่มีนิกเกิลอยู่ 78.5 เปอร์เซ็นต์ และเหล็กอยู่ 21.5 เปอร์เซ็นต์ แต่มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้วัสดุนี้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วให้ต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิด

โครงสร้างที่มีระเบียบ โครงสร้างที่มีระเบียบที่สภาวะสมดุลในโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับเหล็ก จะมีหน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบ FCC โดยที่อะตอมของนิกเกิลจะอยู่ที่ด้านหน้า ในขณะที่อะตอมของเหล็กจะอยู่ที่มุมของด้านหน้า การเติมโมลิบดีนัมจำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ลงในโลหะผสมที่มีนิกเกิล 78.5 เปอร์เซ็นต์ (โดยที่เหล็กเป็นโลหะผสม) จะสามารถป้องกันการเกิดโครงสร้างที่มีระเบียบเช่นกัน โดยที่ทำให้โลหะผสมนั้นเย็นตัวลงจากอุณหภูมิเหนือ 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราปานกลางก็เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดโครงสร้างที่มีระเบียบได้

ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (Magnetic permeability) เริ่มต้นของโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับเหล็ก ที่ประกอบด้วยนิกเกิล 56-58 เปอร์เซ็นต์จะสามารถถูกทำให้เพิ่มขึ้นสามถึงสี่เท่าได้โดยการอบอ่อน (Annealing) โลหะผสมนั้นภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้นโลหะผสมถูกอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง การทำการอบอ่อนภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็กจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการจัดระเบียบของอะตอมในโครงสร้างระหว่างนิกเกิลกับเหล็กไปในทิศทางเดียวกันและเป็นผลทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เริ่มต้นของโลหะผสมนี้มีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.18 แสดงผลของการทำอบอ่อนโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 65 เปอร์เซ็นต์ กับเหล็ก 35 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop)

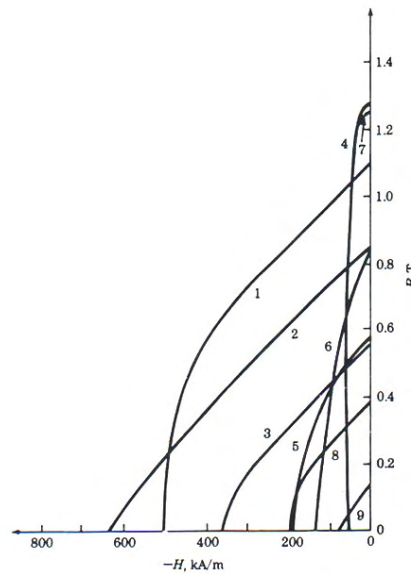
วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard หรือแม่เหล็กถาวร เป็นวัสดุที่ทำให้เป็นแม่เหล็กหรือหมดสภาพแม่เหล็กได้ยาก มีค่า Remanent magnetic induction (B_r) สูงและ แรงลบถ่วงแม่เหล็ก (Coercive force; H_c) มากดังแสดงในรูป 2.17 (ข) จะเห็นได้ว่ารูปร่างของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard จะกว้างและสูง วัสดุเหล่านี้จะถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กได้ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเพียงพอที่จะทำให้โดเมนแม่เหล็กเกิดการจับเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไป พลังงานของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปบางส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ซึ่งจะถูกสะสมอยู่ในแม่เหล็กถาวรนั้น ดังนั้นแม่เหล็กถาวรที่ถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กอย่างเต็มที่จะมีสภาวะพลังงานสูงกว่าแม่เหล็กที่หมดสภาพแม่เหล็ก



รูปที่ 2.18 ผลของการทำอบอ่อนภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อลักษณะของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของโลหะผสมที่ประกอบด้วยนิกเกิล 65 เปอร์เซ็นต์ กับ เหล็ก 35 เปอร์เซ็นต์ (ก) 65 Permalloy ที่ถูกอบอ่อนภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็ก (ข) 65 Permalloy ที่ถูกอบอ่อนโดยไม่

มีสนามแม่เหล็ก [1]

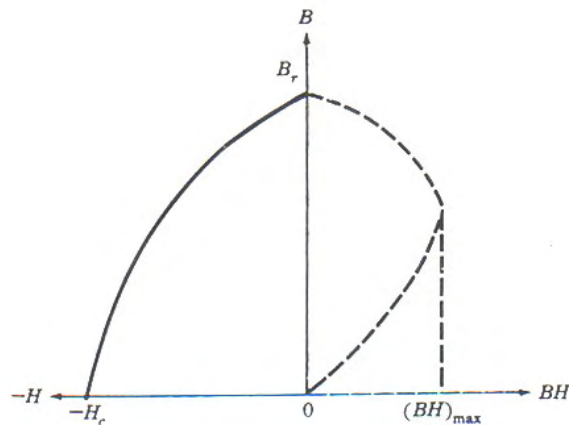
วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard ยากที่จะถูกทำให้หมดสภาวะแม่เหล็กหลังจากที่ถูกทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กแล้ว ความยากง่ายในการทำให้วัสดุแม่เหล็กแบบ Hard หมดสภาวะแม่เหล็กได้นั้นสามารถบอกได้จากพื้นที่ที่อยู่ในจตุภาค (Quadrant) ที่สองของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) และสามารถถูกใช้ในการเปรียบเทียบถึงความแข็งแรงของแม่เหล็กถาวรได้ รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบเส้นโค้ง Demagnetizing ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.19 เส้นโค้ง Demagnetization ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard ชนิดต่าง ๆ 1 : $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu})_{7.4}$; 2 : SmCo_5 ; 3 : Bonded SmCo_5 ; 4 : Alnico 5 ; 5 : Mn-Al-C ; 6 : Alnico 8 ; 7 : Cr-Co-Fe ; 8 : Ferrite ; และ 9 : Bonded ferrite [1]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

กำลังหรือพลังงานภายนอกของวัสดุแม่เหล็กถาวรจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของวัสดุนั้น ๆ พลังงานศักย์ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard จะถูกวัดโดยค่า Maximum energy product ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของผลคูณของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับสนามแม่เหล็ก (H) ที่หาได้จากเส้นโค้ง Demagnetizing ของวัสดุ รูปที่ 2.20 แสดงเส้นโค้ง Energy product (B และ BH) ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard ที่สมมติขึ้น และค่า Maximum energy product, $(BH)_{\max}$ ของวัสดุนั้น โดยพื้นฐาน ค่า Maximum energy product ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard คือพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวางลงในจุดภาคที่สองของลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของวัสดุ หน่วย SI ของ Energy product $(BH)_{\max}$ จะเท่ากับกิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m^2) หรือในระบบ cgs จะเท่ากับผลคูณของหน่วยเกาส์กับหน่วยเอสเตด ($\text{G} \cdot \text{Oe}$) หน่วย SI ของ Energy product $(BH)_{\max}$ ที่เท่ากับจูลต่อตารางเมตร (J/m^2) จะสมมูลกับหน่วยของผลคูณของหน่วยเทสลา (T) ของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) กับหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m) ของสนามแม่เหล็ก (H) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพของเส้นโค้ง Energy product (B และ BH) ของวัสดุแม่เหล็กแบบ Hard เช่น โลหะผสมแอลนิโก (Alnico) ถูกแสดงเส้นประทางด้านขวาของแกนการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) [1]

2.12 เฟอร์ไรต์ [1]

เป็นวัสดุแม่เหล็กจำพวกเซรามิกที่ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) รวมกับออกไซด์อื่น ๆ หรือพวกคาร์บอเนตที่อยู่ในลักษณะเป็นผงแล้วนำอัดและเผาที่อุณหภูมิสูง และในบางครั้งจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ (รูปที่ 2.27) ค่าการอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Magnetic saturation) จะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ โครงสร้างโดเมนและลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของพวกเฟอร์ไรต์จะเหมือนกับวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกส์ และแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบ Soft และแบบ Hard



มหาวิทยาลัยศิลปากร ลงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ 2.21 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำจากวัสดุจำพวกเฟอร์ไรต์แบบ Soft ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [1]

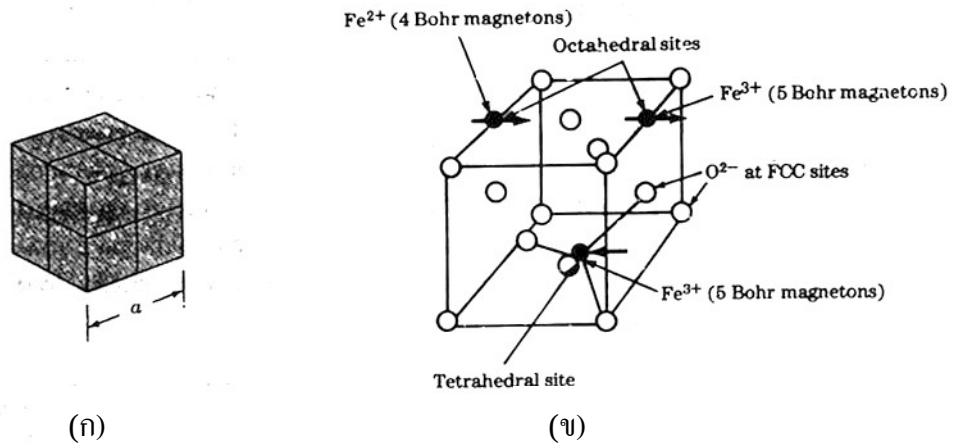
2.12.1 วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ soft จะแสดงสถานะแม่เหล็กแบบ Ferrimagnetism ซึ่งมีค่า Magnetic moment สุทธิ ที่มีค่าไม่ถึงศูนย์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในวัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft มีค่า Magnetic moment สุทธิ เนื่องจากค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ออร์บิทัลภายในแต่ละชุดมีทิศทางตรงกันข้าม แต่ไม่หักล้างกันจนหมด (รูปที่ 2.7 (ค))

2.12.2 องค์ประกอบของโครงสร้างของวัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft จะมีองค์ประกอบดังนี้คือ $MO \cdot Fe_2O_3$ เมื่อ M คือโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electrons) เท่ากับ 2 เช่น Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} และ Zn^{2+} และมีโครงสร้างแบบ Inverse spinel ซึ่งดัดแปลงมาจากโครงสร้างแบบ Spinel ($MgO \cdot Al_2O_3$) โครงสร้างแบบ

Inverse spinel ของเฟอร์ไรต์แบบ Soft จะประกอบด้วย 8 ซับเซลล์ (Subcell) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก)



รูปที่ 2.22 (ก) หน่วยเซลล์ของวัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft ($\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (ข) ซับเซลล์ของ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Ferrite [1]

แต่ละซับเซลล์จะประกอบด้วย $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 7 โมเลกุล และเนื่องจากใน 1 โมเลกุลของ $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีไอออนอยู่ 7 ไอออน ดังนั้นในแต่ละหน่วยเซลล์จึงมีจำนวนไอออนทั้งหมดเท่ากับ 7 ไอออนคูณ 8 ซับเซลล์เท่ากับ 56 ไอออนต่อเซลล์หน่วย

แต่ละซับเซลล์มีโครงสร้างแบบ FCC ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ข) โดยที่ออกซิเจนไอออนอยู่ที่จุดแลตทิซ (Lattice point) และไอออนของ M^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 0.07-0.08 นาโนเมตร อยู่ในช่องระหว่างไอออนของออกซิเจน

ในหน่วยเซลล์ของโครงสร้าง Spinel ปกติจะมี $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ทั้งหมด 8 โมเลกุล และในโครงสร้างนี้ M^{2+} 8 ไอออนจะอยู่ที่ช่องของเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) 8 ช่อง และ Fe^{3+} 16 ไอออนจะอยู่ที่ช่องของออกเตดราฮีดรอน (Octahedral) 16 ช่อง แต่ในโครงสร้าง Inverse spinel จะมีการจัดวางของไอออนที่แตกต่างกับในโครงสร้าง Spinel ปกติ กล่าวคือ M^{2+} 8 ไอออนจะอยู่ที่ช่องของออกเตดราฮีดรอน (Octahedral) 8 ช่อง และ Fe^{3+} 16 ไอออน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ 8 ไอออนจะอยู่ที่ช่องออกเตดราฮีดรอน (Octahedral) และอีก 8 ไอออนจะอยู่ที่ช่องของเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) 8 ช่อง

ค่า Magnetic moments สุทธิเกิดขึ้นใน 1 ซับเซลล์ของ $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ferrite ที่มีโครงสร้างแบบ Inverse spinel สามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ

เมื่ออะตอมของ Fe ถูกไอออไนซ์ไปเป็น Fe^{2+} ไอออนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d - ออร์บิทัล จำนวน 4 ตัว หลังจากที่ย้ายอิเล็กตรอนใน 4s-ออร์บิทัลไป 2 ตัว และเมื่อถูกไอออไนซ์ไปเป็น Fe^{3+} ไอออนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d-ออร์บิทัล จำนวน 5 ตัว หลังจากที่ย้ายอิเล็กตรอนใน 4s-ออร์บิทัลไป 2 ตัว และใน 3d-ออร์บิทัล 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และจากที่ได้เคยกล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่าอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 ตัว จะมีค่า Magnetic moment เท่ากับ 1 โบร์แมกนีตอน (Bohr magneton) ดังนั้น Fe^{2+} ไอออนจึงมี 4 โบร์แมกนีตอน (Bohr magneton) และ Fe^{3+} ไอออนจึงมี 5 โบร์แมกนีตอน (Bohr magneton) เมื่อนำวัสดุ ferrite วางในสนามแม่เหล็ก Magnetic moments ของไอออนที่อยู่ในตำแหน่งออกตะระฮีดรอน (Octahedral site) และ ตำแหน่งเตตระฮีดรอน (Tetrahedral site) จะสวนทางกัน (รูปที่ 2.22(ข)) ดังนั้นถ้าวัสดุเฟอร์ไรต์ คือ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ทำให้ Magnetic moments ของ Fe^{3+} ในตำแหน่งออกตะระฮีดรอน (Octahedral site) จะหักล้างกับ Fe^{3+} ในตำแหน่งเตตระฮีดรอน (Tetrahedral site) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือเกิด Magnetic moment สุทธิ ที่สืบเนื่องมาจาก Fe^{2+} ในตำแหน่งออกตะระฮีดรอน (Octahedral site) เท่ากับ 4 โบร์แมกนีตอน (Bohr magneton) ใน 1 เซลล์ หรือ 4 คูณ 8 เท่ากับ 32 โบร์แมกนีตอน (Bohr magneton) ใน 1 หน่วยเซลล์

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนวนลิขสิทธิ์

Ion	Number of electrons	Electron configuration 3d orbitals					Ionic magnetic moment (Bohr magnetons)
Fe^{3+}	23						5
Mn^{2+}	23						5
Fe^{2+}	24						4
Co^{2+}	25						3
Ni^{2+}	26						2
Cu^{2+}	27						1
Zn^{2+}	28						0

รูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและค่า Ionic magnetic moments ของไอออนธาตุ 3d- แทรนซิชันบางชนิด [1]

วัสดุเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิลเฟอร์ไรต์ (Nickel ferrites) ทั้งหมดจะมีโครงสร้างแบบ Inverse spinel และมีสมบัติสถานะแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกส์ เนื่องจากค่า Magnetic moment สุทธิในโครงสร้างไอออนิกของวัสดุนี้ โดยทั่วไปวัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

มักจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ชนิดต่าง ๆ ผสมเข้าด้วยกันเนื่องจากจะทำให้สามารถเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetizations) ได้ วัสดุเฟอร์ไรต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ นิกเกิลสังกะสีเฟอร์ไรต์ (Ni-Zn-ferrite; $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{2-y}\text{O}_4$) และ แมงกานีสสังกะสีเฟอร์ไรต์ (Mn-Zn-ferrite; $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{2+y}\text{O}_4$)

2.12.3 วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Hard

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Hard มักถูกนำมาใช้เป็นแม่เหล็กถาวร โดยทั่วไปจะมีสูตรดังนี้คือ $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ และมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) วัสดุเฟอร์ไรต์ที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้คือแบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งถูกค้นพบในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยบริษัทฟิลิปป์ (Philips) ในปี ค.ศ. 1952 ภายใต้ชื่อทางการค้าที่ว่า Ferroxdure ในปัจจุบันนี้แบเรียมเฟอร์ไรต์ถูกแทนที่ด้วยสตรอนเชียมเฟอร์ไรต์บางส่วน วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Hard เหล่านี้มักจะถูกผลิตขึ้นด้วยวิธีการที่เกือบจะเหมือนกับที่ใช้ในการผลิตวัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Soft กล่าวคือ วัสดุจะถูกเตรียมขึ้นโดยการอัดแบบเปียกในสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคไปในทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็ก

วัสดุเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) จะมีความหนาแน่นต่ำและมีค่าแรงผลักแม่เหล็ก (Coercive force) สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ความแข็งแรงเชิงแม่เหล็กที่สูงของวัสดุเหล่านี้เนื่องมาจากการที่วัสดุเหล่านี้มี Magnetocrystalline anisotropy ที่สูง โดยทั่วไปค่า $(BH)_{\text{max}}$ Energy products ของวัสดุเหล่านี้จะมีค่าประมาณ 14-28 กิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m^3)

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบ Hard นี้มักจะถูกใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รีเลย์ (Relay) และมอเตอร์ นอกจากนี้ยังถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แม่เหล็กในลำโพงเครื่องเสียง โทรศัพท์ และเครื่องรับ รวมถึงของเด็กเล่น เป็นต้น

2.13 แบเรียมเฟอร์ไรต์ (Barium ferrite ; $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)

แบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) เป็นแม่เหล็กถาวรชนิดหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นกว่าแม่เหล็กถาวรชนิดอื่นคือมีราคาถูก มีพลังงานที่สูงเป็นจนวนไฟฟ้าที่ดี มีค่าแอนไอโซทรอปีแม่เหล็ก (Magnetic anisotropy), สภาพผลักแม่เหล็ก (Coercivity) และความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) ที่สูง รวมทั้งมีความเสถียรทางเคมี (Chemical stability) ที่ค่อนข้างดี จากสมบัติที่กล่าวมาจึงส่งผลให้แบเรียมเฟอร์ไรต์มีบทบาทในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย [4-16]

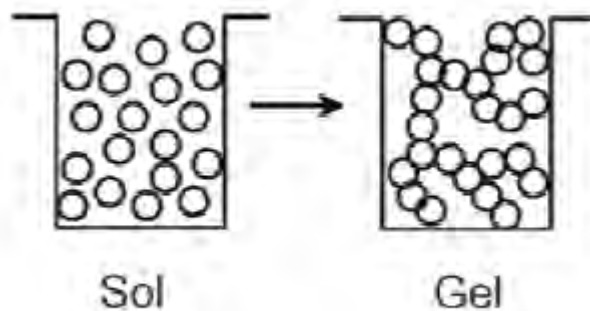
หลายปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทำการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ให้มีขนาดเล็ก โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ มากมาย เช่นเทคนิคเซรามิก (Ceramic method) [4,9] เป็นวิธีการดั้งเดิมโดยมีขั้นตอนการเตรียมที่ซับซ้อน และสิ้นเปลืองพลังงานสูง, การตกตะกอนรวม (Coprecipitation) [6-7] ซึ่งพบว่าให้อนุภาคของแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่และการกระจายขนาดของอนุภาคที่กว้าง, เทคนิคการบดแบบลูกหินพลังงานสูง (High-energy ball milling) [8,12] เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงานอย่างมากและทำให้สมบัติทางแม่เหล็กมีค่าลดลง เช่นทำให้ความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) และสภาพลบด้านแม่เหล็ก (Coercivity) มีค่าลดลง และวิธีการหลอมเหลวของแอมโมเนียมไนเตรต (Ammonium nitrate melt) [16] ซึ่งพบว่ามีปัญหาเรื่องของสิ่งปนเปื้อนที่ไม่สามารถกำจัดออกได้หมดโดยจะส่งผลให้สมบัติทางแม่เหล็กของแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่ได้มีค่าลดลง เป็นต้น จากข้อจำกัดที่กล่าวมาของวิธีการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ต่าง ๆ จึงได้นำไปสู่กระบวนการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์จากสารตั้งต้นที่ผ่านการสังเคราะห์ขึ้นเองจากกระบวนการ Oxide one pot synthesis (OOPS) และทำการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ผ่านกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel)

2.14 Oxide one pot synthesis (OOPS)

กระบวนการ Oxide one pot synthesis เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์โลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxide) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในกระบวนการโซล-เจล สังเคราะห์พวกโลหะออกไซด์ (Inorganic metal oxides) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คอมโพสิต (Composite) และพวกวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (Electroc ceramic) การเคลือบ (Coating) และเส้นใย (Fibers) โดยข้อดีของกระบวนการนี้คือ ใช้วัตถุดิบที่มีราคาถูกสามารถหาซื้อได้ง่าย มีขั้นตอนการเตรียมขั้นตอนเดียวไม่เหมือนกับวิธีการอื่น ๆ ที่มีขั้นตอนการเตรียมหลายขั้นตอนและมีราคาแพง สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยสารที่เตรียมได้จะมีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน [29-32]

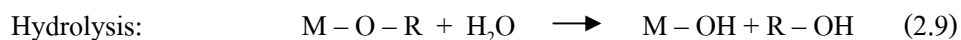
2.15 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process)

กระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการสำหรับผลิตเซรามิก และผลิตภัณฑ์แก้ว โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลจะหมายถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากระบบที่เป็นของเหลว (Sol) ส่วนมากมักอยู่ในรูปคอลลอยด์ (Colloid) เป็นระบบที่เป็นเจลของแข็ง (Gel) [39]



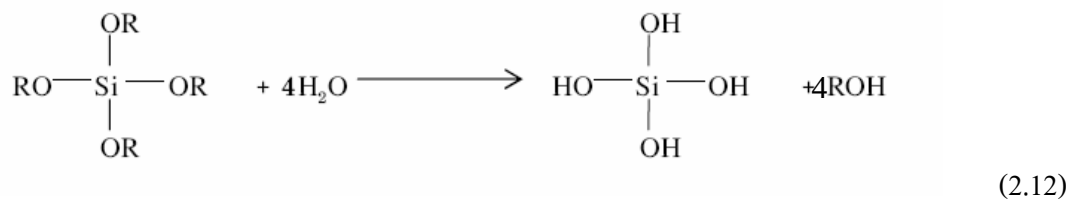
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล [34]

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นของน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการที่ (2.9) ถึง (2.11) มีปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจลคือความเป็นกรด-เบส (pH) ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติทางโครงสร้างที่ต่างกัน

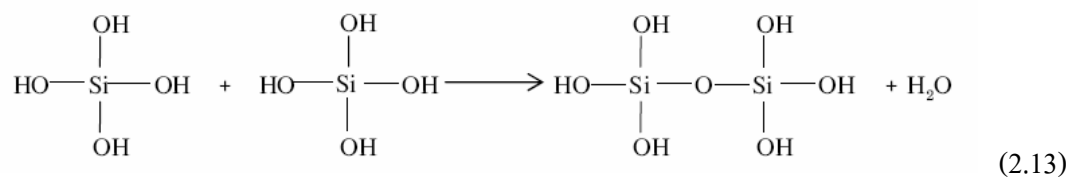


เมื่อ M แทนโลหะได้แก่ ซิลิกอน (Si) เซอร์โคเนียม (Zr) ไทเทเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) ดีบุก (Sn) หรือ ซีเรียม (Ce) และ OR แทนหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group)

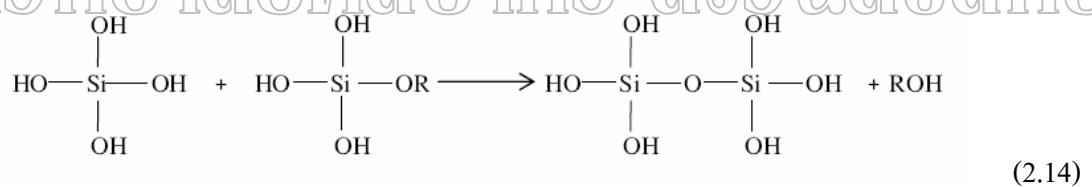
ขั้นตอนแรกของการทำโซลเจลคือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่น โลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxide) เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) เช่น Si(OR)_4 ซึ่ง R คือ หมู่เมทิลสำหรับ Tetramethoxysilane หรือ หมู่เอทิลสำหรับ Tetraethoxysilane จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการที่ (2.12) [33-39]



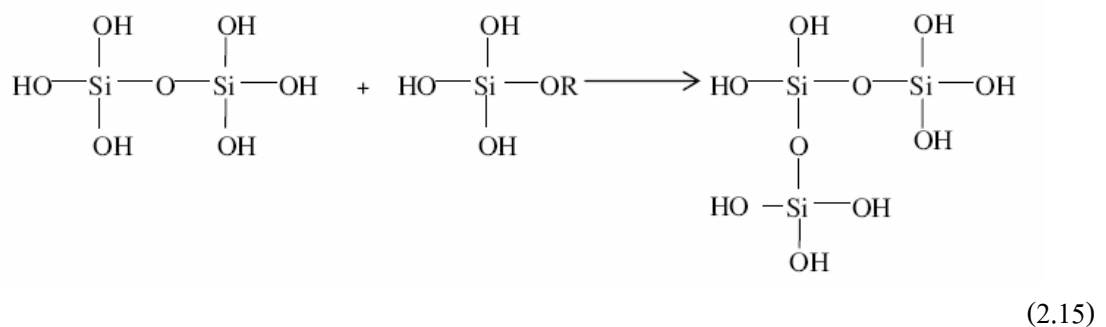
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) ได้ผลผลิตพลอยได้ (By-product) คือน้ำดังสมการที่ (2.13)



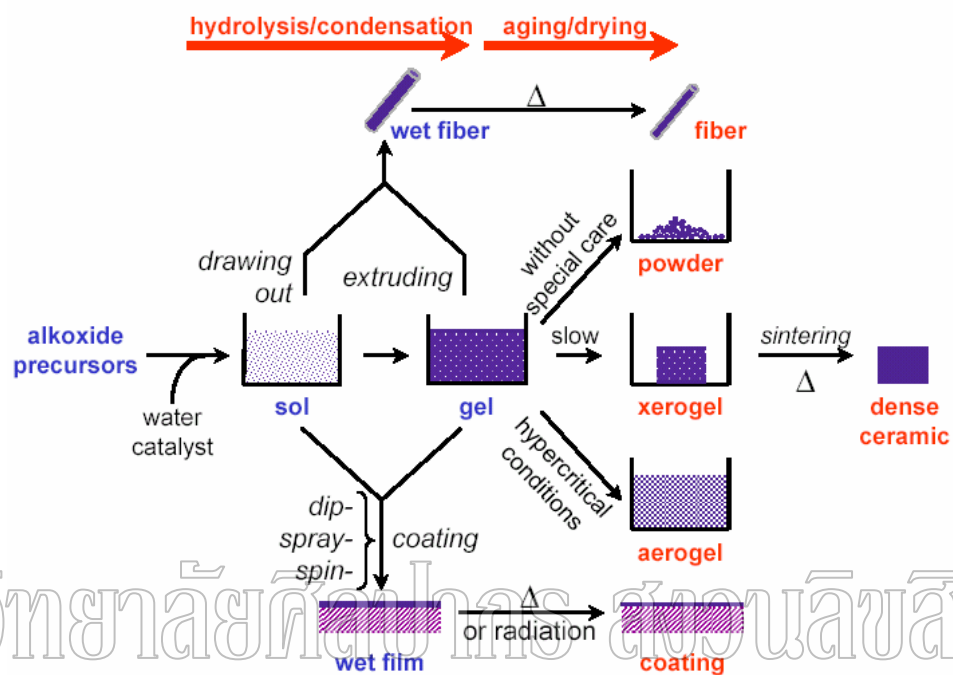
หรือ การควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการที่ (2.14)



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงร่างซิลิกา อยู่ในสภาวะที่เรียกว่าเจล จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า Polycondensation reaction ดังสมการที่ (2.15)



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย Aerogel Xerogel ผง และฟิล์ม เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 2.25 เทคโนโลยีโซล-เจลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคโนโลยีโซล-เจล [34]

การนำเทคโนโลยีโซล-เจล (Sol-gel technology) มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงลอะเลียด ฟิล์มบาง เส้นใย และ วัสดุก้อน [33-34] ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป เช่น แก้วซีกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูง [34-36] เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล [34]

กระบวนการโซล-เจลมีข้อดีดังต่อไปนี้ สามารถสังเคราะห์แบบเรียบเฟอร์ไรต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง [34-39] และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) [34-39] ได้ ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนและมีขั้นตอนการเตรียมที่ง่ายรวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ยังต่ำกว่าด้วย

2.16 ตัวอย่างงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Zhong และคณะ [17] ได้ทำการสังเคราะห์แบบเรียบเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิคโซล-เจลโดยศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างทางจุลภาคพบว่า การให้ความร้อนแก่เจลก่อนในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาหลายชั่วโมง และสามารถป้องกันการเกิดของ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ได้ ทำให้สามารถได้แบบเรียบเฟอร์ไรต์ที่มีความละเอียดยิ่งยวด (Ultrafine) ที่มีขนาดเล็กสามารถปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็กและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบที่อุณหภูมิต่ำได้และจะได้แรงลบถ่วงแม่เหล็ก (Coercive Force) และการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ที่ตรงตาม

ทฤษฎี โดยสารตั้งต้นที่เลือกใช้จะเป็นเกลือไนเตรดที่ละลายน้ำและทำการตกตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนีย แล้วนำตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำจนกระทั่งเป็นกลางเพื่อกำจัดแอมโมเนียมไนเตรดหลังจากนั้นละลายในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยอัตราส่วนระหว่างเหล็กต่อน้ำเท่ากับ 11.6 ปริมาณของแบเรียมคาร์บอเนตถูกเติมลงไปเป็นปริมาณที่เหมาะสมทำให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันในเวลาเพียงเล็กน้อย นอกจากกรดซัลฟิวริกแล้วยังทำการเติมเอทิลีนไกลคอลและกรดเบนโซอิกลงไปด้วย จากนั้นทำการระเหยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีความหนืดสูงพอที่จะเกิดเป็นเจลในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แล้วใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการทำทรีตเมนต์โดยเจลที่ได้จะผ่านการทรีตเมนต์ 2 วิธี วิธีแรก ทำการทรีตเมนต์โดยตรงที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส และวิธีที่สอง ก่อนที่จะให้ความร้อนที่ 500 และ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะถูกให้ความร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงก่อน แล้วทำการวิเคราะห์ต่อไป

Liu และคณะ [18] ได้ศึกษาการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โดยทำการละลายแบเรียมไนเตรดในสารละลายเฟอร์ริกไนเตรด จากนั้นให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200-240 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างไฮดรอกไซด์ต่อไนเตรดที่ 1 ต่อ 1 ถึง 5 ต่อ 1 เมื่ออัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็ก เป็น 1 ต่อ 8 และศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อ ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) และค่า Intrinsic coercive พบว่า จะสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างเป็นโดเมนเดี่ยว (Single-domain) ได้ที่อัตราส่วนระหว่างระหว่างไฮดรอกไซด์ต่อไนเตรด เป็น 2 ต่อ 1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 230 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ซึ่งวิเคราะห์ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นจาก 400 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 46 ไปเป็น 64 emu/g และ ค่า Intrinsic coercive จะมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 1.6 ไปเป็น 2.3 กิโลเอสเทด แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวและค่า Intrinsic coercive จะมีค่าลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโดเมนเดี่ยว (Single-domain) ไปเป็นพหุโดเมน (Multi domain) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Laobuthee และคณะ [30] ได้ทำการเตรียมผง $MgAl_2O_4$ spinel จากกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงและวัตถุดิบเริ่มต้นที่หาได้ง่ายคือ กระบวนการ Oxide one pot synthesis ซึ่งผง $MgAl_2O_4$ spinel ที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้เตรียมวัสดุสำหรับตัวรับรู้ความชื้น (Humidity sensor) ได้ โดยจะให้สมบัติที่ดีกว่าวิธีการเตรียมอื่น ๆ

Wu และคณะ [19] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิคโซล-เจล ซึ่งทำการศึกษาผลของการเตรียมสารตั้งต้นในระบบสุญญากาศที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง พบว่า สารตั้งต้นที่เตรียมในระบบสุญญากาศสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างเป็น Spinel บนฟิล์มบางได้เนื่องจากในระบบสุญญากาศจะเกิดเจลขึ้นจากเหล็กไนเตรตเป็นเจลเหล็ก (Iron gel) และดูดซับแบเรียมไอออน แต่ถ้าเตรียมภายใต้บรรยากาศปกติแบเรียมไอออนจะเกิดการแยกเฟสกับออกไซด์ทำให้ไม่สามารถเกิดแบเรียมเฟอร์ไรต์ได้

Wu และคณะ [20] ได้ทำการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มโดยใช้เทคนิคโซล-เจลโดยศึกษาอิทธิพลของการเตรียมในระบบสุญญากาศและการเตรียมภายใต้บรรยากาศปกติ และศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็ก ที่ 1 ต่อ 11.4 และ 1 ต่อ 2.28 โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และ X-ray Absorption พบว่าการเตรียมผ่านระบบสุญญากาศนั้นจะให้แบเรียมเฟอร์ไรต์ที่เป็นเฟสเดียว (Single phase) และที่อัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็กเท่ากับ 1 ต่อ 2.28 จะให้แบเรียมเฟอร์ไรต์ที่เป็นเฟสเดียว (Single phase) และให้สมบัติทางแม่เหล็กที่ดีกว่าที่อัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็กเป็น 1 ต่อ 11.4

Janasi และคณะ [21] ได้ศึกษาการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์จากกระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) โดยศึกษาอิทธิพลของการเตรียม อุณหภูมิและเวลาในการเผา ซึ่งพบว่า ถ้าเตรียมโดยนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) และแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride) เติมลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) จะให้ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) และ Intrinsic coercive ที่น้อยกว่าการเตรียมโดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตเติมลงในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และแบเรียมคลอไรด์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดเฟสที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กที่ต่างกัน และสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ได้ที่อุณหภูมิในการเผา 800 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ค่า Intrinsic coercive และ ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) จะมีค่าต่ำลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งวิเคราะห์ได้จากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยเวลานั้นมีผลเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีผลต่อค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) และ Intrinsic coercive เลย

Suarez และคณะ [22] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิคโซล-เจล ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็ก อุณหภูมิและเวลาในการเผาที่มีต่อสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างของแบเรียมเฟอร์ไรต์ จากงานวิจัยสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ได้ที่อัตราส่วนระหว่างแบเรียมต่อเหล็กเป็น 1 ต่อ 12 ที่มีขนาดผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรต์อยู่ในช่วง 50-

150 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้นค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) จะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Coercive) จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

Thititun และคณะ [35] ได้ทำการศึกษากระบวนการโซล-เจลของ Spirosilicate ภายใต้สภาวะกรดและเบส (pH) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการควบแน่น โดยศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิว่ามีผลต่อสมบัติของเจลที่ได้รับอย่างไร โดยข้อดีของการกระบวนการนี้คือ มีอุณหภูมิต่ำ และให้โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก โดยสารตั้งต้นที่ใช้จะสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Oxide One pot Synthesis ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ราคาถูก เป็นกระบวนการที่มีความเสถียรภาพ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม พบว่า Spirosilicate สามารถทำหน้าที่เป็นโลหะอัลลอยด์ที่ว่องไวต่อกระบวนการโซล-เจลที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่สูงไม่มากได้ โดยมีแนวโน้มที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีผลได้เซรามิก (Ceramic Yield) ที่สูง และมีการหดตัวที่ต่ำซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมทางวิศวกรรมได้

Thanabodeekij และคณะ [31] ได้ทำการเตรียมผง $MgAl_2O_4$ spinel ที่มีความบริสุทธิ์สูงผ่านกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งคือกระบวนการ Oxide one pot synthesis เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการเตรียมโครงสร้างที่เป็น Spinel โดยผ่านกระบวนการ โซล-เจลซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวรับรู้ความชื้น (Humidity sensor)

Ksapabutr และคณะ [36] ได้ทำการเตรียม Bimetallic glycolato zirconate และ Homometallic glycolato cerate ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการเตรียมโซเดียมเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Sodium zirconium oxide) และซีเรีย (Ceria) จากกระบวนการ Oxide one pot synthesis โดยทำการเตรียมจากเซอร์โคเนียมไฮดรอกไซด์ (Zirconium hydroxide) และซีเรียไฮดรอกไซด์ (Cerium hydroxide) ที่มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารตั้งต้นและตัวทำละลาย ภายใต้สภาวะในโตรเจนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค ฟลูอิดเรโซแนนซ์โพรมิเตอร์ อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ในโตรเจน และออกซิเจน (Elemental analysis) การวิเคราะห์ Energy dispersive x-ray micro analysis system และ แมสสเปกโตรสโกปี

Lin และคณะ [23] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิค Citrate precursor ร่วมกับเทคนิคการพ่นฝอย (Spray) โดยสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) ได้ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยผลึกของแบเรียมเฟอร์ไรต์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่อุณหภูมิในการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงกว่า 680 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผงของแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีความบริสุทธิ์ขึ้น

Topal และคณะ [24] ได้ทำการเตรียมแบรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิคการหลอมเหลวของแอมโมเนียมไนเตรด (Ammonium nitrate melt) ซึ่งเป็นการละลายโลหะออกไซด์ในแอมโมเนียมไนเตรดเพื่อให้เกิดเป็นโลหะไนเตรด (Metal nitrate) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดแบรียมเฟอร์ไรต์ซึ่งพบว่าสามารถเตรียมแบรียมเฟอร์ไรต์ได้ที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียสซึ่งถือได้ว่าเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการเตรียมโดยวิธีเซรามิกโดยขนาดของเกรนที่เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จะมีขนาด 0.3-0.5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดการกระจายตัวที่แคบ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะที่เป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส อนุภาคจะมีลักษณะที่เป็นพหุโดเมน (Multi domain) ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางแม่เหล็กลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเซรามิกแล้ว จะมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ดีกว่าแต่ค่าที่ได้ยังห่างจากค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

Ksapabutr และคณะ [33] ได้ศึกษาเทคนิคเจลลูมินาเกิดผ่านกระบวนการโซล-เจล โดยใช้อะลูมาทราน (Alumatrane) เป็นสารตั้งต้นซึ่งสารนี้สามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงจากสารที่ทำให้อัดง่ายและราคาถูกได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และไตรไอโซโพรพานอลามีน ตัวแปรของกระบวนการโซล-เจล เช่น เวลาในการเกิดเจล สัมพันธ์กับตัวแปรของกระบวนการ เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อุณหภูมิ การแตกตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) และอัตราส่วนการแตกตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis ratio) โซล-เจลของอะลูมาทรานในแอลกอฮอล์ตรวจสอบได้จากการวัดวิหยากระแส (Rheological measurement) ส่วนเวลาในการเกิดเจลติดตามจากการเปลี่ยนแปลงของค่า Storage (G') และค่า loss (G'') โมดูล (Moduli) ตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยใช้หลักการของ Winter Chambon จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรด-เบส (pH) อัตราส่วนการแตกตัวด้วยน้ำ และ/หรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะช่วยเร่งจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยน้ำ-การควบแน่น (Hydrolysis-condensation reaction) ส่งผลให้เวลาในการเกิดเจลลดลง พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Cross-linking) ในการเกิดเจลมีค่าประมาณ 139 กิโลจูลต่อโมล คำนวณได้จากเวลาในการเกิดเจล ณ อุณหภูมิต่าง ๆ และไม่ขึ้นกับอัตราส่วนการแตกตัวด้วยน้ำ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์อะลูมินาที่เตรียมได้หลังจากผ่านความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส อาศัยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และ วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (BET surface area analysis) อีกด้วย

Qiu และคณะ [25] ได้ทำการเตรียมแบรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิค Gel self-propagating combustion (GSPC) ซึ่งใช้ไกลซีน (Glycine) เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาจะมีค่าต่ำคือ 160 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาอิทธิพลของ ค่า G/N (อัตราส่วนโดยโมลของไกลซีนต่อไนเตรดแรดิกัล) ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และอุณหภูมิในการเผา ที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งพบว่าสามารถเตรียมแบรียมเฟอร์ไรต์ที่เป็นเฟสเดี่ยว (Single phase) ได้ที่อุณหภูมิ 850

องศาเซลเซียส และพบว่า ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization) และ ค่าสภาพลบ
ล้างแม่เหล็ก (Coercive) จะมีค่าเท่ากับ 56.10 แอมแปร์ตารางเมตรต่อกิโลกรัม และ 398 กิโลแอมแปร์
ต่อเมตร เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไกลซีนต่อไนเตรดเรดิคัล (G/N) และ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)
เป็น 1 และ 7 ตามลำดับ

Qiu และคณะ [12] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิค Gel self-propagating
combustion (GSPC) ร่วมกับ เทคนิคการบดแบบลูกหินพลังงานสูง (High-energy ball milling ;
HEMB) โดยพบว่าในระหว่างที่ทำการบดจะเกิดเฟสของสารมัธยันต์ (Intermediate) คือแบเรียมโม
โนเฟอร์ไรต์ (BaFe_2O_4) ที่จะทำให้เกิดแบเรียมเฟอร์ไรต์ต่อไป ซึ่งพบว่าสามารถเตรียมแบเรียมเฟอร์
ไรต์ได้หลังจากทำการบดเป็นเวลา 60 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากการ
วิเคราะห์พบว่าจะให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเท่ากับ 425.74 กิโลแอมแปร์ต่อเมตร

Topal และคณะ [26] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้เทคนิคการหลอมเหลวของ
แอมโมเนียมไนเตรด (Ammonium nitrate melt) และทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
เนื่องจากสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ได้จากการศึกษาก่อนหน้านี้มีค่าต่างจากค่าที่คำนวณได้ทาง
ทฤษฎี ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารปนเปื้อน หรือการที่อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่
กว่าขนาดวิกฤตของโดเมนเดี่ยว (Single domain) จึงต้องทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกและ
ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาในช่วง 800-1,200 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็ก
ซึ่งพบว่าสามารถเกิดแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างเป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) ในช่วง
อุณหภูมิ 850-1,000 องศาเซลเซียส โดยจะให้ค่า Coercive field ที่สูงประมาณ 4,500 เอสเตด และ
ความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว 60 emu/g แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ค่า Coercive field
จะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดเกรนที่เป็นพหุโดเมน (Multi-domain) แต่ทั้งนี้ก็ยังสามารถปรับปรุง
สมบัติทางแม่เหล็กนี้ได้โดยการเจือ (Doping) ด้วยโคบอลต์ หรือสังกะสี หรือการหาอัตราส่วน
ระหว่างแบเรียมต่อเหล็กที่เหมาะสมที่สุดก็ได้

Wang และคณะ [28] ได้ทำการเตรียมแบเรียมเฟอร์ไรต์ที่มีรูปร่างเป็นแท่งโดยใช้เทคนิค
ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ร่วมกับการอบอ่อนโดยผสมแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) แบเรียม-
ไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) และเหล็กคลอไรด์ (FeCl_3) ในงานเพาะเชื้อและนำเข้าหม้อนึ่งอัดไอ
(Autoclave) จากนั้นให้ความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปล้าง
ด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้งที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบภายใต้บรรยากาศที่
800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะพบว่าแท่งที่ได้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนและจะให้ค่าความ
เป็นแม่เหล็กอิ่มตัว และ Coercive field มีค่าเท่ากับ 4,511 เอสเตด และ 67.30 emu/g ตามลำดับ