

แม่เหล็กถาวรจากวัสดุผสมนาโน: วิธีการจากล่างสู่บน

Nanocomposite Permanent Magnets: A Bottom-up Approach

คมกริช โชคพระสมบัติ¹

บทคัดย่อ

แม่เหล็กถาวรได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ตลอดจนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและอุปกรณ์ทางการแพทย์ ยิ่งไปกว่านั้นการประยุกต์ใช้ทางด้านพลังงาน เช่น รถยนต์ไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมก็ต้องการแม่เหล็กถาวรที่มีความคงทนมากขึ้น ขนาดเล็กลง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งแม่เหล็กถาวรที่ใช้กันมากในปัจจุบันยังไม่เพียงพอเพราะถูกผลิตจากธาตุโลหะหายาก (rare earth elements) ซึ่งมีราคาแพงและไม่สามารถใช้ได้อย่างยั่งยืน แม่เหล็กถาวรแบบใหม่จึงเป็นที่ต้องการ แนวทางที่น่าสนใจมากในปัจจุบันคือการสร้างแม่เหล็กถาวรจากวัสดุผสมนาโนที่ประกอบด้วยสารแม่เหล็กที่มีค่าลบด้านแม่เหล็ก (coercivity) สูงกับสารที่เป็นแม่เหล็กที่มีค่าแมกเนไทเซชัน (magnetization) สูง ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถให้ค่าผลผลิตพลังงาน (energy product) สูงถึง 120 MGOe ในกรณีของวัสดุผสม $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3/\text{FeCo}$ นอกจากนี้วัสดุผสมของอนุภาคนาโนที่ปราศจากธาตุโลหะหายากจะทำให้แม่เหล็กถาวรที่ผลิตได้มีต้นทุนต่ำลงและสามารถใช้ได้อย่างยั่งยืนขึ้น ในบทความนี้ได้ทบทวนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีและไม่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบ รวมถึงแนวทางในการจัดเรียงตัวเองในลักษณะของวัสดุผสมเพื่อประยุกต์ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรชนิดใหม่

คำสำคัญ: แม่เหล็กถาวร; วัสดุผสมนาโนแม่เหล็ก; การจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโน

1. บทนำ

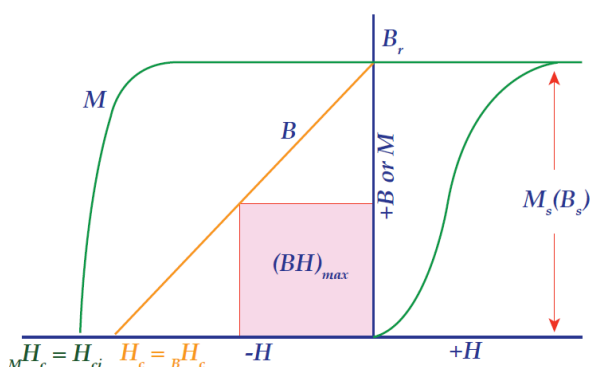
แม่เหล็กถาวรมีความสำคัญอย่างมากในด้านเศรษฐกิจ เนื่องจากเป็น องค์ประกอบ สำคัญ ใน อุปกรณ์ ไฟฟ้าและ

อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมถึงการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างมากในรถยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่และกังหันลมผลิตไฟฟ้าซึ่งมีความสำคัญมากในการลดมลพิษ และการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน นอกจากนี้อุปกรณ์ต่างๆ ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลง แม่เหล็กถาวรในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีขนาดเล็กลง คงทนมากขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น [1]

ประสิทธิภาพของแม่เหล็กถาวรจะวัดด้วยปริมาณที่เรียกว่าผลผลิตพลังงาน (energy product, $(BH)_{\text{max}}$) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก (H) ที่วัดได้จากควอดรนต์ (Quadrant) ที่ 2 ของ hysteresis loop [2] ดังภาพประกอบ 1 ในช่วงเริ่มต้นแม่เหล็กถาวรผลิตจากโลหะผสมของเหล็กหรือเหล็กออกไซด์ ต่อมาถูกพัฒนาให้ดีขึ้นด้วยการสังเคราะห์โลหะผสมของอลูมิเนียม, นิกเกิล, โคบอลต์, และเหล็ก เรียกว่าแม่เหล็ก Alnico ซึ่งทำให้ได้ค่า $(BH)_{\text{max}}$ สูงขึ้น ดังภาพประกอบ 2 การก้าวกระโดดในการใช้งานแม่เหล็กถาวรเกิดจากการค้นพบวัสดุแม่เหล็กชนิดใหม่ที่มีธาตุโลหะหายาก (rare earth) เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$, และ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ เป็นต้น ในปัจจุบันแม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีค่า $(BH)_{\text{max}}$ สูงสุดและมีราคาถูกกว่าแม่เหล็กที่มี Sm เป็นองค์ประกอบ แต่ข้อเสียประการสำคัญของแม่เหล็ก Nd-Fe-B คือ มีอุณหภูมิคูรีต่ำ ทำให้ต้องเจือ Dy (Dysprosium) เพื่อให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ Dy เป็นโลหะหายากที่ราคาสูงมากและมีแนวโน้มที่จะหมดลงในอนาคต การเจือด้วย Dy ยังทำให้ได้ $(BH)_{\text{max}}$ ลดลงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงต้องหาแนวทางในการผลิตวัสดุแม่เหล็กชนิดใหม่ที่มีต้นทุนต่ำลงและสามารถใช้ได้อย่างยั่งยืน แนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากในปัจจุบันคือการสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนแม่เหล็กที่ประกอบไปด้วยสารแม่เหล็กที่ให้ค่าลบด้านแม่เหล็ก (coercivity) สูงกับสารแม่เหล็กที่

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

ให้ค่าแมกเนไทเซชัน (magnetization) สูง [3] ซึ่งจะสามารถให้ค่า $(BH)_{\max}$ ที่เท่าเทียมหรือดีกว่าแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในปัจจุบันแต่ใช้ปริมาณของสารแม่เหล็กที่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบน้อยลงอย่างมาก ทำให้ต้นทุนต่ำลง Skomki และ Coey [4] ได้ทำนายทางทฤษฎีไว้ว่าวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงโครงสร้างระดับนาโนของ $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3/\text{FeCo}$ จะให้ค่า $(BH)_{\max}$ สูงถึง 120 MGOe ซึ่งคิดเป็น 3 เท่าของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามหากสามารถสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนที่ปราศจากธาตุโลหะหายากโดยยังคงค่า $(BH)_{\max}$ ที่เหมาะสมพร้อมทั้งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ จะเป็นการลดต้นทุนลงอย่างมากและสามารถใช้ได้อย่างยั่งยืน



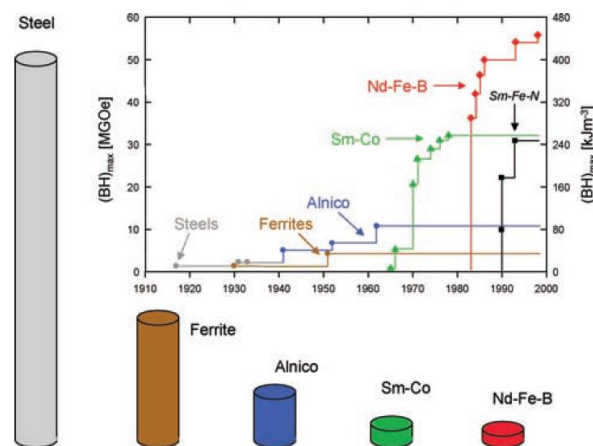
ภาพประกอบ 1 แสดงการหาค่า energy product $(BH)_{\max}$ จาก quadrant ที่ 2 ของ hysteresis loop

ที่มา : Proc IEEE. 78 (1990) 923

ในระยะเริ่มต้นวัสดุผสมนาโนจะถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางฟิสิกส์จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2002, Zeng et al. [5] ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุผสมจากอนุภาคนาโนที่มีขนาดต่างกันของ FePt และ Fe_3O_4 ซึ่งพบว่าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิสูงจะได้วัสดุผสมของ FePt- Fe_3O_4 ซึ่งมีค่า $(BH)_{\max}$ สูงถึง 20.1 MGOe จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจมากในการสังเคราะห์แม่เหล็กถาวรแบบใหม่ที่สามารถควบคุมสมบัติแม่เหล็กด้วยสัดส่วนของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดและโครงสร้างที่ผสมกันอยู่ในระดับนาโน

ในบทความนี้จึงเน้นถึงการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีค่า magnetic anisotropy สูง ด้วยวิธีการทางเคมี โดยจะกล่าวถึงทั้งอนุภาคนาโนที่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบ

และอนุภาคนาโนที่ไม่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะอนุภาคนาโน MnBi จากนั้นจะนำเสนอการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนเป็นซูเปอร์แลตทิซ ซึ่งในทัศนะของผู้เขียนเห็นว่าน่าจะเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไปในการพัฒนาวัสดุผสมนาโนแม่เหล็กเพื่อประยุกต์ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรต่อไป



ภาพประกอบ 2 แผนภาพแสดงค่า $(BH)_{\max}$ ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นแม่เหล็กถาวร

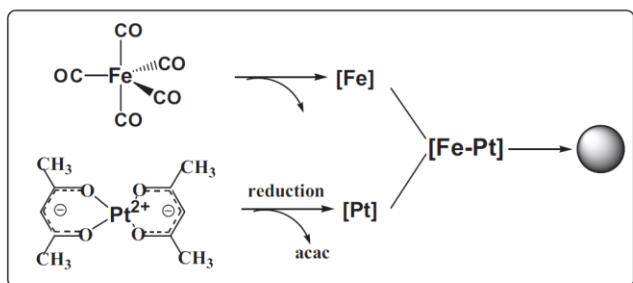
ที่มา : Adv. Mater. 23 (2011) 821 - 842.

2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์

2.1 อนุภาคนาโนที่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กให้มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอเป็นงานวิจัยที่ท้าทายและได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่เป็นโลหะผสม ได้แก่ FePt, CoPt, FeCo, และ FeNi และอนุภาคที่มี Sm-Co และ Nd-Fe-B เป็นฐาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ทั้งจากวิธีการทางฟิสิกส์และวิธีการทางเคมี วิธีการทางฟิสิกส์สามารถควบคุมสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ดี แต่ใช้ต้นทุนค่อนข้างสูงและกระบวนการค่อนข้างยุ่งยาก ในขณะที่วิธีการทางเคมีให้อนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอมากกว่าและสามารถหุ้มด้วยสารเคลือบผิว (surfactant) ซึ่งเอื้อต่อการนำไปจัดเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างนาโนที่ซับซ้อนขึ้น ในปี ค.ศ. 2000, Sun et al. [6] ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน FePt ที่มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอด้วยวิธีการทางเคมี จากการแตกตัวด้วยความ

ร้อนของ $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ควบคู่กับการรีดิวซ์ $\text{Pt}(\text{acac})_2$ ในสารละลายอินทรีย์จุดเดือดสูง โดยใช้ oleic acid และ oleylamine เป็นสารเคลือบผิว ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดอนุภาคนาโน

FePt

ที่มา: Adv. Mater. 18 (2006) 393 - 403.

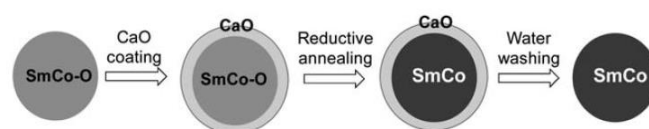
อย่างไรก็ตามอนุภาค FePt ที่สังเคราะห์ได้จะมีโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic (fcc) ซึ่งมีค่า magnetic anisotropy ต่ำ จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของอนุภาคให้เป็นแบบ face-centered tetragonal (fct) แต่ผลจากการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้อนุภาคเกาะตัวกัน (agglomeration) ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ การป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาคขณะถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นงานวิจัยที่ทำหายและจำเป็นในปัจจุบัน

จากความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน FePt อนุภาคนาโนแม่เหล็กอีกหลายชนิดรวมไปถึงอนุภาคนาโนที่มี Sm-Co และ Nd-Fe-B เป็นฐาน ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนพื้นฐานของวิธีการดังกล่าว แต่พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีค่าลบล้างแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของอนุภาคและการมีเฟสปลอมปน อีกทั้งยังขาดเสถียรภาพเมื่ออยู่ในบรรยากาศปกติ [7] ต่อมา Hou et al. [8] ได้สังเคราะห์ SmCo_5 ด้วยวิธีรีดิวซ์อนุภาคคอร์/เชลล์ (core/shell) $\text{Co}@\text{Sm}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสม ($95\% \text{Ar} + 5\% \text{H}_2$) พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าลบล้างแม่เหล็กสูงขึ้นเป็น 12 kOe และมีค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) เป็น 70 emu/g แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจึงทำ

ให้อนุภาคเกาะตัวกัน กลายเป็นอนุภาคใหญ่และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

ในปี ค.ศ. 2011 Zhang et al. [9] ได้พัฒนากระบวนการรีดิวซ์โลหะออกไซด์ดังกล่าวโดยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคด้วยการหุ้มอนุภาคออกไซด์ของ SmCo ด้วย CaO ก่อนรีดิวซ์ที่อุณหภูมิสูงแล้วจึงล้าง CaO ออก พบว่าสามารถป้องกันการเกาะตัวของอนุภาคได้โดยมีค่าลบล้างแม่เหล็กเป็น 7.2 kOe อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ ภาพประกอบ 4 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ตามกระบวนการดังกล่าว

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอนุภาคนาโนที่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีใช้สารเคลือบผิวช่วยขณะบดด้วยลูกบอล (surfactant assisted ball milling) [10] ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและได้อนุภาคนาโนปริมาณมาก แต่ต้องใช้กระบวนการคัดแยกขนาดของอนุภาค และอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ก็ยังมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปจัดเรียงตัวเองให้มีโครงสร้างนาโนที่เป็นระเบียบต่อไป ปัจจุบันการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบให้มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอพร้อมทั้งให้ค่าลบล้างแม่เหล็กที่สูง และมีเสถียรภาพทางเคมียังคงเป็นงานวิจัยที่ทำหาย



ภาพประกอบ 4 แผนภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน SmCo

ที่มา: J. Mater. Chem. 21 (2011) 16873 - 16876.

2.2 อนุภาคนาโนที่ไม่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบ

อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มี magnetic anisotropy และอุณหภูมิคูรีสูง และไม่มีองค์ประกอบเป็นธาตุโลหะหายากมีประโยชน์อย่างยิ่งในด้านการลดต้นทุนการผลิตและการใช้งานอย่างยั่งยืนดังได้กล่าวมา ปัจจุบันจึงมีความพยายามจากนักวิจัยหลายกลุ่มในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ไม่มีธาตุโลหะ

หายากเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น MnBi [11], Fe₁₆N₂ [12], Co_nC (n=1-6) [13], และ FeNi [14] ในบรรดาสารดังกล่าว MnBi ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจาก มีค่า magnetic anisotropy สูง มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิและมีค่า (BH)_{max} ในทางทฤษฎีเป็น 16 MGOe แต่ในปัจจุบันการสังเคราะห์อนุภาคนาโน MnBi ยังไม่ประสบผลสำเร็จมากนัก โดยเฉพาะวิธีการทางเคมีซึ่งจำเป็นสำหรับการผลิตวัสดุนาโนผสมตามแนวทางจากล่างสู่บน ในปี ค.ศ. 2015, Ren et al. [15] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโน MnBi ด้วยกระบวนการรีดักชันโดยใช้ Mn₂(CO)₁₀ เป็นทั้งสารตั้งต้นและตัวรีดิวซ์ (reducing agent) พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีค่า ลบถ้างแม่เหล็กสูงถึง 15 kOe และมีค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว ที่ 49 emu/g แต่ขนาดและรูปร่างของอนุภาคยังไม่สามารถควบคุมได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 กลุ่มวิจัยเดียวกันได้นำอนุภาคนาโน MnBi ที่สังเคราะห์ได้ไปผสมกับเส้นใยนาโน FeCo ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าเมื่อผสมเส้นใย FeCo ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าแมกเนไทเซชันคงค้าง (remanent magnetization) เพิ่มขึ้นแต่ค่าลบถ้างแม่เหล็ก และค่าผลผลิตพลังงานกลับลดลง [16] ล่าสุดเมื่อต้นปี ค.ศ. 2018 นี้ Liu et al. [17] ได้รายงานวิธีการใหม่สำหรับการสังเคราะห์อนุภาค MnBi โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโน Mn และอนุภาคนาโน Bi ที่หุ้มด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์ จากนั้นนำมาผสมกันในเฮกเซน (hexane) ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 250 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาแตกต่างกัน พบว่าเวลาเผาที่ 6 ชั่วโมง จะให้อนุภาค MnBi ที่มีค่าลบถ้างแม่เหล็กสูงที่สุดประมาณ 8.8 kOe อย่างไรก็ตามอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีขนาดและรูปร่างที่ไม่แน่นอน

3. แนวทางวิจัยในอนาคต

วิธีการจากล่างสู่บน (bottom-up approach) เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการสร้างอุปกรณ์นาโนหรือโครงสร้างนาโนที่มีสมบัติแปลกใหม่ เนื่องจากต้นทุนต่ำ และสะดวกกว่าวิธีจากบนสู่ล่าง (top-down approach) อีกทั้งมีความยืดหยุ่นมากกว่าเนื่องจากวัสดุนาโนที่มีขนาดและรูปร่างหลากหลายสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการทางเคมี การสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่สามารถจัดเรียงตัวเองเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจ

การสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่า (BH)_{max} สูงขึ้นจากการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโนสองชนิด ได้รับความสนใจอย่างมากจากงานวิจัยของ Hao Zeng และคณะ [5] ซึ่งได้นำอนุภาคนาโน FePt ซึ่งมี magnetic anisotropy สูงมาผสมกับอนุภาคนาโน Fe₃O₄ ด้วยสัดส่วนและขนาดของอนุภาค Fe₃O₄ ที่แตกต่างกัน ภายใต้การเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสม (95%Ar, 5%H₂) ที่ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อนุภาคนาโน FePt เปลี่ยนเฟสจาก fcc เป็น fct และ Fe₃O₄ ถูกรีดิวซ์เป็นอะตอม Fe การกระจายรวมเข้ากับ FePt บางส่วนกลายเป็น Fe₃Pt อันตรกิริยาแม่เหล็กระหว่าง FePt และ Fe₃Pt ทำให้ได้ค่า (BH)_{max} สูงกว่าเฟสเดี่ยวของ FePt มากกว่า 50%

อาศัยแนวทางดังกล่าว งานวิจัยในอนาคตในการสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนแม่เหล็กที่มีสมบัติเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรอาจพิจารณาได้ดังนี้

1) สังเคราะห์อนุภาคชนิดอื่นที่มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ และมีความสามารถในการจัดเรียงตัวเอง ได้แก่ อนุภาคนาโนที่มี Sm และ Nd เป็นฐาน หรืออนุภาคที่ไม่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบ เช่น MnBi และ FeNi

2) หาวิธีป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาคเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูง

3) พัฒนาวิธีการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโนให้ได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบเป็นบริเวณกว้างหรือเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น

สำหรับประเด็นที่ 1) ยังคงเป็นความท้าทายอย่างมาก โดยเฉพาะการสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีซึ่งจะให้อนุภาคที่มีความเหมาะสมในการจัดเรียงตัวเอง สำหรับประเด็นที่ 2 และ 3 อาจจะเป็นไปได้ด้วยการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโนสองชนิดให้เป็นซูเปอร์แลตทิซ (superlattices) ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้พบว่าสามารถป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาค FePt เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงได้ [18] หรือการจัดเรียงตัวเองเป็นซูเปอร์อนุภาค (superparticles) [19] ที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนแม่เหล็กสองชนิดก่อนทำการเผาก็น่าจะให้วัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็กแปลกใหม่ และสามารถควบคุมได้ด้วยสัดส่วนหรือขนาดของอนุภาคนาโนที่เป็นองค์ประกอบ

4. บทสรุป

เนื่องจากความจำเป็นทางด้านพลังงาน แม่เหล็กถาวรซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน เพราะแม่เหล็กถาวรชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็กลง แต่ประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นย่อมส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการใช้หรือผลิตพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่เหล็กถาวรที่ใช้อยู่ในปัจจุบันผลิตจากธาตุโลหะหายากซึ่งราคาแพงและไม่สามารถใช้ได้อย่างยั่งยืน การเสาะหาแม่เหล็กถาวรแบบใหม่ที่ใช้ธาตุโลหะหายากน้อยลงหรือไม่ใช้เลยน่าจะเป็นแนวทางที่ยั่งยืนขึ้นในอนาคต การสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนแม่เหล็กจึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถควบคุมสมบัติแม่เหล็กได้จากสัดส่วนและรูปร่างของวัสดุองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ไม่มีธาตุโลหะหายากเป็นองค์ประกอบแต่ให้ค่า magnetic anisotropy สูงเป็นงานที่ท้าทายและยังไม่ประสบความสำเร็จ นอกจากนั้นการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนสองชนิดให้เป็นโครงสร้างที่แน่นอนหรือเป็นระเบียบก็ยังคงเป็นงานวิจัยที่ยังต้องพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar and J. P. Liu, “Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient”, *Adv. Mater.* 23, 821 (2011).
- [2] J. M. D. Coey, “Hard magnetic materials: a perspective”, *IEEE Trans. Magn.* 47, 4671 (2011).
- [3] E. F. Kneller and R. Hawig, “The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets”, *IEEE Trans. Magn.* 27, 3588 (1991).
- [4] R. Skomki and J. M. D. Coey, “Giant energy product in nanostructured two-phase magnets”, *Phys. Rev. B.* 48, 15812 (1993).
- [5] H. Zeng, J. Li, J. P. Liu, Z. L. Wang and S. Sun, “Exchange-coupled nanocomposite magnets by nanoparticle self-assembly”, *Nature* 420, 395 (2002).
- [6] S. Sun, C. B. Murray, D. Weller, L. Folks and A. Moser, “Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices”, *Science* 287, 1989 (2000).
- [7] N. Poudyal and J. P. Liu, “Advances in nanostructured permanent magnets research”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46, 043001 (2013).
- [8] Y. Hou, Z. Xu, S. Peng, C. Rong, J. P. Liu and S. Sun, “A facile synthesis of SmCo_5 magnets from core/shell $\text{Co}/\text{Sm}_2\text{O}_3$ nanoparticles”, *Adv. Mater.* 19, 3349 (2007).
- [9] H. W. Zhang, S. Peng, C. B. Rong, J. P. Liu, Y. Zhang, M. J. Kramer and S. Sun, “Chemical synthesis of hard magnetic SmCo nanoparticles”, *J. Mater. Chem.* 21, 16873 (2011).
- [10] V. M. Chakka, B. Altunçevahir, Z. Q. Jin, Y. Li and J. P. Liu, “Magnetic nanoparticles produced by surfactant-assisted ball milling”, *J. Appl. Phys.* 99, 08E912 (2006).
- [11] J. B. Yang, W. B. Yelon, W. J. James, Q. Cai, M. Kornecki, S. Roy, N. Ali and P. l’Heritier, “Crystal structure, magnetic properties and electronic structure of the MnBi intermetallic compound”, *J. Phys.: Condens. Mater.* 14, 6509 (2002).
- [12] E. Kita, K. Shibata, H. Yanagihara, Y. Sasaki and M. Kishimoto, “Magnetic properties of core-shell type nanoparticles”, *J. Magn. Magn. Mater.* 310, 2411 (2007).
- [13] P. A. Premkumar, A. Turchanin and N. Bahlawane, “Effect of solvent on the growth of Co and Co_2C using pulsed-spray evaporation chemical vapor deposition”, *Chem. Mater.* 19, 6206 (2007).

[14] M. Kotsogi, H. Murayama, N. Ishimasu, N. Kawamura, M. Suzuki, M. Mizumaki, K. Osaka, T. Matsumoto, T. Ohkochi, T. Ohtsuki, T. Kojima, M. Mizuguchi, K. Takanashi and Y. J. Watanabe, “Structural, magnetic and electronic state characterization of L10-type ordered FeNi alloy extracted from a natural meteorite”, *Phys.: Condens. Mater.* 26, 064206 (2014).

[15] A. Kirkeminde, J. Shen, M. Gong, J. Cui and S. Ren, “Metal-redox synthesis of MnBi hard magnetic nanoparticles”, *Chem. Mater.* 27, 4677 (2015).

[16] Q. Dai, M. Asif warsi, J. Q. Xiao and S. Ren, “Metal-redox synthesis of MnBi hard magnetic nanoparticles”, *Nano Res.* 9, 3222 (2016).

[17] S. Liu, J. Wang and F. Dong, “A new bottom-up synthesis of MnBi particles with high magnetic performance”, *Chem. Phys. Lett.* 691, 325 (2018).

[18] A. Dong, J. Chen, X. Ye, J. M. Kikkawa and C. B. Murray, “A generalized ligand-exchange strategy enabling sequential surface functionalization of colloidal nanocrystals”, *J. Am. Chem. Phys.* 133, 13296 (2011).

[19] T. Wang, J. Zhuang, J. Lynch, O. Chen, Z. Wang, X. Wang, D. LaMontagne, H. Wu, Z. Wang and Y. C. Cao, “Self-assembled colloidal superparticles from nanorods”, *Science* 338, 358 (2012).