

อนุภาคแม่เหล็กนาโนจากโซล-เจล

Sol-Gel Derived Magnetic Nanoparticles

วิฑูรย์ ตั้งวัฒนกุล¹

อนุภาคนาโนแม่เหล็กได้รับความสนใจทั้งในการวิจัยพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากอนุภาคนาโนมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นและแตกต่างจากวัสดุที่เป็น bulk material อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติแม่เหล็ก ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย ได้แก่ การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ [1-2] วัสดุบันทึกข้อมูลความจุสูง [3-4] แม่เหล็กถาวรคุณภาพสูง [5] วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง [6] การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กสามารถทำได้ทั้งกระบวนการที่หลากหลาย กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีความโดดเด่นทั้งในด้านต้นทุนและสะดวกในการควบคุมสมบัติอนุภาค จึงได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีโซล-เจล แบบจุดติดปฏิกิริยาตัวเอง (sol-gel auto-combustion) เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กได้หลากหลายชนิด ที่ขยายกำลังผลิตสู่อุตสาหกรรมได้ [7-9] นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงใช้คีเลตติ้งเอเจนต์ชีวภาพ (chelating agent) จากวัสดุธรรมชาติซึ่งไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เช่น ไข่ขาว [10] ว่านหางจระเข้ (aloe vera) [11] และน้ำมันสกัดจากพืช (canola oil) [12] และแป้งสาถุ (sago starch) ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานทางการแพทย์มากยิ่งขึ้น บทความนี้นำเสนอ การใช้วิธีการโซล-เจล (sol-gel) พัฒนาแม่เหล็กแบบใหม่ 2 ชนิดที่จะใช้เป็นแม่เหล็กถาวร และแม่เหล็กบันทึกข้อมูล ในอนาคต

แบเรียมเฟอร์ไรต์ (Barium Ferrite)

แม่เหล็กถาวร (permanent magnets) เป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น มอเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น แม่เหล็กที่มีค่าผลผลิตพลังงาน (energy product) สูงจะเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน การพัฒนาเทคโนโลยีจากวัสดุใหม่เพื่อ

ผลิตแม่เหล็กถาวรจึงมีส่วนสำคัญในการประหยัดพลังงานที่ใช้ในมอเตอร์ และเพิ่มพลังงานที่กำเนิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในอนาคต ปัจจุบันแม่เหล็กถาวรที่มีค่าผลผลิตพลังงานสูงได้แก่แม่เหล็ก Nd-Fe-B และแม่เหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุเราร์เอิร์ทต่างๆ เช่น Sm และ Dy เป็นต้น แต่จากการที่ธาตุเราร์เอิร์ทมีแนวโน้มที่จะขาดแคลนในอนาคต ทำให้มีความพยายามสรรหาวัตถุดิบในการผลิตแม่เหล็กถาวรที่ไม่มีส่วนผสมของธาตุเราร์เอิร์ท และเพื่อให้ได้แม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูงค่าลบด้างแม่เหล็กและผลผลิตพลังงานสูง จึงเป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตแม่เหล็กโดยใช้วัสดุอื่น เช่น แมงกานีส-บิสมัท โคบอลต์คาร์ไบด์ และแบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ที่ให้ค่าแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization; M_s) ค่าลบด้างแม่เหล็ก (coercivity; H_c) สูง รวมทั้งมีเสถียรภาพทางเคมีสูงและทนต่อการกัดกร่อน [13] นอกจากนี้แบเรียมเฟอร์ไรต์ที่ระดับขนาดในวงนาโนเมตรยังเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุบันทึกข้อมูลความจุสูงและอุปกรณ์ไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง [14]

แบเรียมเฟอร์ไรต์สามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเซรามิกซ์โดยการหลอมเหล็กออกไซด์และแบเรียมคาร์บอเนตเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส จากนั้นลดขนาดของอนุภาคโดยการบด ด้วยกระบวนการ ball milling ซึ่งอนุภาคที่ได้จากกระบวนการนี้มักไม่เป็นเนื้อเดียวเนื่องจากอนุภาคมักจับตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าลบด้างแม่เหล็ก มีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี [15] จึงได้มีผู้สนใจใช้การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีข้อดีคือเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระดับโมเลกุล ดังนั้นจึงเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ อนุภาคที่ได้จึงมีขนาดเล็กและใกล้เคียงกัน การสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีตกตะกอนร่วม (co-

¹อาจารย์ (ดร.) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

precipitation) ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) ไมโครอิมัลชัน (micro-emulsion) และวิธีโซล-เจล (sol-gel) [16]

สำหรับวิธีโซล-เจล แบบจุดติดปฏิกิริยาได้เอง ถือว่าเป็นวิธีสังเคราะห์ที่ใช้อุณหภูมิต่ำ (low temperature combustion process) สามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรได้ มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่มเลือกใช้วิธีนี้ ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบเรียมเฟอร์ไรต์ [15-19] ส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้กรดซิตริก ไกลซีน และยูเรีย เป็นคีเลตติ้งเอเจนต์ (chelating agent) ทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการเกิดอนุภาคนาโนแบบเรียมเฟอร์ไรต์ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุดติดปฏิกิริยาได้เอง โดย Mali and Ataie ได้ตรวจสอบผลของอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น Fe/Ba ต่อสมบัติแม่เหล็ก พบว่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดเฟสแบบเรียมเฟอร์ไรต์มีค่าเท่ากับ 11 [17] นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแคลไซน์ (calcined) เพื่อสมบัติแม่เหล็กที่ดีที่สุด คือ 1000 องศาเซลเซียส [18] Xu และคณะ [19] ได้ตรวจสอบผลของค่า pH ต่อสมบัติของแบบเรียมเฟอร์ไรต์โดยใช้อัตราส่วน Fe/Ba = 11.5 โดยมีกรดซิตริก (citric acid) เป็นคีเลตติ้งเอเจนต์ พบว่าอนุภาคมีสมบัติแม่เหล็กดีที่สุด ($M_s \approx 60 \text{ A m}^2/\text{kg}$, $H_c \approx 432 \text{ kA/m}$) เมื่อใช้อัตราส่วนกรดซิตริกต่อโลหะไนเตรดเท่ากับ 1.5 ที่ค่า pH = 10 ผลที่ได้จากนักวิจัยทั้งสองกลุ่มนี้สอดคล้องกับคณะของ Li [20] นอกจากนี้วิธีโซล-เจล แบบจุดติดปฏิกิริยาได้เอง ยังสะดวกในการเจือสารเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติแม่เหล็กในอนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์ และนำไปสู่อนุภาคนาโนคอมโพสิตได้ โดย Li Wangchang และคณะได้ทดลองเจือ La และ Co ในอนุภาคแบบเรียมเฟอร์ไรต์ พบว่าไอออนโลหะทั้งสองชนิดส่งผลให้ค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และค่าลบล้างแม่เหล็กมีค่าลดลงตามลำดับ [21] ในส่วนกลุ่มวิจัยของ Dadfar ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมโพสิต $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{TiO}_2$ พบว่าค่าแมกเนไทเซชันอิ่มตัว และค่าลบล้างแม่เหล็ก มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 และได้ตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟพบว่าสามารถดูดกลืนได้ดีที่สุด -45 dB ที่ 11.2 GHz [22] แสดงให้เห็นได้ว่าอนุภาคในกลุ่มเฮกซะเฟอร์ไรต์สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี

สิ่งสำคัญอีกประการที่ส่งผลต่อสมบัติของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุดติดปฏิกิริยาได้เองคือ ชนิด

ของคีเลตติ้งเอเจนต์ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้กรดซิตริก เป็นคีเลตติ้งเอเจนต์หรือสารเชื่อมเพลิงสำหรับจุดติดปฏิกิริยาเผาไหม้ เรียกว่า nitrate-citrate gel แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีรายงานการใช้คีเลตติ้งเอเจนต์ชนิดอื่นอีก เช่น ไฮดราซีน (hydrazine) กลูโคส (glucose) และไกลซีน (glycine) [14, 23-24] ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในการจุดติดปฏิกิริยาแตกต่างกัน

โคบอลต์พลาตินัม (Cobalt-Platinum)

อนุภาคนาโนโคบอลต์พลาตินัม ในเฟส L_{10} เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ได้รับความสนใจศึกษาวิจัยเนื่องจากมีค่าแอนไอโซโทรปี (anisotropy) สูง ทำให้สามารถคงสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) ไว้ได้ แม้มีขนาดเล็กลงในระดับต่ำกว่า 10 นาโนเมตร การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีทางเคมีพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มของ Sun et al. (2000) เพื่อสังเคราะห์อนุภาค FePt โดยอาศัยการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) ของสารตั้งต้น $\text{Fe}(\text{CO})_5$ และการรีดักชันของ $\text{Pt}(\text{acac})_2$ ที่อุณหภูมิสูงด้วย diol หรือ polyalcohol โดยมี oleic acid และ oleylamine เป็นสารเคลือบผิว จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า polyol process หลังจากนั้นจึงได้มีการสังเคราะห์ CoPt ด้วยวิธีเดียวกันนี้ Sun et al., (2004) สามารถให้อนุภาคที่มีขนาดในช่วง 3-10 นาโนเมตรและมีการกระจายของขนาดอนุภาคไม่สูง (monodisperse) สามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคได้ [25] จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยเหนือกว่าวิธีการทางฟิสิกส์ซึ่งยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง FePt และ CoPt พบว่าในขณะที่อนุภาค FePt ที่สังเคราะห์ได้มักมีเปลือกออกไซด์เจือปนมา โดยอาจอยู่ในรูป core-shell หรือ heterodimers [26, 27] ซึ่งทำให้มีสมบัติแม่เหล็กไม่ตรงตามต้องการ แต่อนุภาค CoPt ไม่พบปัญหานี้เนื่องจากไม่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบในสารตั้งต้น จึงมีแนวโน้มที่ดีกว่าในการพัฒนาเป็นวัสดุบันทึกข้อมูลความจุสูง นอกจากวิธีแตกตัวด้วยความร้อนแล้ว การสังเคราะห์อนุภาค CoPt ยังสามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ มีข้อดีหลายประการได้แก่ มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน สามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ ควบคุมขนาดและสัดส่วนธาตุองค์ประกอบได้ดี อนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง [28]

โดยปกติแล้วอนุภาคที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการข้างต้นจะได้ อนุภาค CoPt ในเฟส A1 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ fcc และมีสมบัติ

แม่เหล็กแบบซอฟต์แวร์โรซึ่งไม่เหมาะสมในการใช้งานเป็นวัสดุบันทึกข้อมูล จึงต้องมีการแอนนัล (annealing) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C ขึ้นไป จึงได้เป็น CoPt ในเฟส L₀ การใช้กระบวนการที่อุณหภูมิสูงทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตในระดับอุตสาหกรรมสูงตามไปด้วย ดังนั้นการลดอุณหภูมิในการแอนนัลเพื่อเปลี่ยนเฟสจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งแนวทางหนึ่งที่สามารถทำได้คือการเติมสารเจือ เช่น Sn, Bi, Ag, Cu ลงในวัสดุ และจากความรู้ในปัจจุบันพบว่า การเติมโบรอน (B) ลงในอนุภาค CoPt ที่เตรียมด้วยวิธี polyol สามารถลดอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสลงได้ประมาณ 100 °C [29]

การเตรียมอนุภาคนาโน CoPt ด้วยวิธีทางเคมี สามารถทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิสูงของสารตั้งต้น CoCl₂ และ Pt(acac)₂ ใช้กรดโอเลอิกและ oleylamine เป็นสารเคลือบผิว โดยในปี 2004 คณะของ Sun สามารถสังเคราะห์อนุภาค CoPt ที่มีขนาดเฉลี่ย 8 นาโนเมตร อนุภาคแสดงสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetism) แต่หลังจากแอนนัลที่อุณหภูมิ 650 °C พบว่าอนุภาคเปลี่ยนเป็นเฟส L₁ ซึ่งให้ค่าแอมไโซโทรปีสูงถึง $1.7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ แต่อย่างไรก็ตามวิธีสังเคราะห์ข้างต้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีโซล-เจล ซึ่งสามารถให้ขนาดอนุภาคและสัดส่วนธาตุองค์ประกอบที่ดีเช่นเดียวกัน จึงมีหลายกลุ่มเริ่มให้ความสนใจใช้วิธีนี้มากขึ้น โดยคณะของ Liu (2013) ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโน CoPt ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้สารตั้งต้น Co(NO₃)₂ และ H₂PtCl₆ และใช้กรดซิตริกเป็นกิลเลตติ้งเอเจนต์ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C จนได้เป็นเจล จากนั้นนำไปแอนนัลที่ 400 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่แอนนัลที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C ขึ้นไป แสดงเฟส L₁ และค่าลบล้างแม่เหล็ก มีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ายังใช้อุณหภูมิในการแอนนัลสูงเท่าใดอนุภาคก็จะมีมีการจับตัวกันมีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้นด้วย [28] จึงเกิดแนวคิดในการลดอุณหภูมิในการแอนนัลลงโดยการเติมสารเจือเข้าไปในอนุภาค โดยคณะของ Khemjeen (2014) พบว่าการเติมโบรอน (B) สามารถลดอุณหภูมิในการแอนนัลได้ประมาณ 100 °C นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโบรอนคือ 40% ของสารตั้งต้น Co(acac)₂ และ Pt(acac)₂ ซึ่งจะให้ค่าลบล้างแม่เหล็ก สูงสุดที่ 12,000 Oe [29] นอกจากนี้คณะของ Wang (2014) ได้ทดลองเติมทองแดง (Cu) โดยในอนุภาค CoPt ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลพบว่าการเติมทองแดง

50% สามารถลดการจับตัวกันของอนุภาคได้ ถึงแม้จะแอนนัลที่อุณหภูมิสูงถึง 600 °C อนุภาคก็ยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคก่อนแอนนัล [9]

จากงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโน CoPt ด้วยวิธีโซล-เจล เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้อนุภาคที่มีสมบัติตามต้องการ ส่วนการเติมสารเจือจะช่วยในการลดอุณหภูมิในการแอนนัลเพื่อให้ได้อนุภาคในเฟส L₁

เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Pankhurst and J. Connolly, "Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine", J. Phys. D 36, 167 (2003).
- [2] A.H. Faraji and P. Wipf, "Nanoparticles in cellular drug delivery", Bioorganic Med. Chem. 17(8), 2950 (2009).
- [3] D. Weller, A. Moser, L. Folks, M. E. Best, W. Lee, M.F. Toney, M. Schwickert, J.-U. Thiele and M. F. Doemer, "High K_a materials approach to 100 Gbits/in²", IEEE Trans. Magn., 36(1), 10 (2000).
- [4] K. Yano, V. Nandwana, G.S. Chaubey, N. Poudyal, S. Kang, H. Arami, J. Griffis, J. P. Liu, "Synthesis and characterization of magnetic FePt/Au core/shell nanoparticles", J. Phys. Chem. C 113, 13088 (2009).
- [5] P. Xu, X. Han and M. Wang, "Synthesis and magnetic properties of BaFe₁₂O₁₉ hexaferrite nanoparticles by a reverse microemulsion technique", J. Phys. Chem. C 111, 5866 (2007).
- [6] M. Naeem, S. Saleem and M. Aslam, "Physical, electrical and magnetic properties of nanocrystalline Zr – Ni doped Mn-ferrite synthesized by the co-precipitation method", J. Alloy. Compd. 486, 640 (2009).
- [7] S. Kanagesan, M. Hashim, S. Tamilselvan, N.B. Alitheen, I. Ismail, M. Syazwan and M.M.M. Zuikimi, "Sol-gel auto-combustion synthesis of cobalt ferrite and its cytotoxicity properties", Dig. J. Nanomater. Biostruct. 8(4), 1601 (2013).

- [8] X. Q. Shen, M. Q. Liu, F. Z. Song and X. F. Meng, "Structural evolution and magnetic properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanofibers by electrospinning", *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 53(2), 448 (2010).
- [9] Y. Wang, X. Zhang, Y. Liu, S. Lv, Y. Jiang, Y., Zhang, H. Liu Y. Liu and J. Yang, " Li_0 CoPt-Cu nanoparticles for high-density magnetic recoding by sol-gel technique", *J. Alloy. Compd.* 582, 511 (2014).
- [10] H. Zhu, S. Zhang, Y. X. Huang, L. Wu and S. Sun, "Monodisperse $\text{M}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Co}, \text{Mn}$) nanoparticles and their electrocatalysis for oxygen reduction reaction", *Nano Lett.* 13, 2947 (2013).
- [11] S. Maensiri, C. Masingboon and S. Seraphin "A simple route to synthesize nickel ferrite (NiFe_2O_4) nanoparticles using egg white", *Scripta Mater.*, 56, 797 (2007).
- [12] P. Laokul, V. Amornkitbamrung, S. Seraphin and S. Maensiri "Characterization and magnetic properties of nanocrystalline CuFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 powders prepared by the Aloe vera extract solution", *Curr. Appl. Phys.* 11(1), 101 (2011).
- [13] M. J. Molaei, A. Ataie, S. Raygan, S. J. Picken, E. Mendes and F. D. Tichelaar "Synthesis and characterization of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ and $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ magnetic nanocomposites", *Powder Technol.* 221, 292 (2012).
- [14] Y. Y. Meng, M. H. He, Q. Zeng, D. L. Jiao, S. Shukla, R. V. Ramanujan and Z. W. Liu "Synthesis of barium ferrite ultrafine powders by a sol-gel combustion method using glycine gels", *J. Alloy. Compd.*, 583, 220 (2014).
- [15] W. Zhong, W. Ding, N. Zhang, J. Hong, Q. Yan and Y. Du, "Key step in synthesis of ultrafine $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ by sol-gel technique", *J. Magn. Magn. Mater.* 168, 196 (1997)
- [16] J. Huang, H. Zhuang and W. Li, "Synthesis and characterization of nano crystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ powders by low temperature combustion", *Mater. Res. Bull.* 38, 149 (2003).
- [17] A. Mali and A. Ataie, "Influence of Fe/Ba ratio on the characteristics of Ba-hexaferrite particles prepared by sol-gel combustion method", *J. Alloy. Compd.* 399, 245 (2005).
- [18] A. Mali and A. Ataie, "Structure characterization of nanocrystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ powders synthesized by sol-gel combustion route", *Scripta Mater.* 53, 1065 (2005).
- [19] G. Xu, H. Ma, M. Zhong, J. Zhou, Y. Yue and Z. He, "Influence of pH on characteristics of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ powders prepared by sol-gel auto-combustion route", *J. Magn. Magn. Mater.* 301, 383 (2006).
- [20] Y. Li, Q. Wang and H. Yang. "Synthesis, characterization and magnetic properties on nanocrystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ferrite", *Curr. Appl. Phys.* 9, 1375 (2009).
- [21] W. Li, X. Qiao, M. Li, T. Liu and H. X. Peng "La and Co substituted M-type barium ferrites processed by sol-gel combustion synthesis", *Mater. Res. Bull.*, 48, 4449 (2013).
- [22] M. R. Dadfar, S. A. Seyyed Ebrahimi and S. M. Masoudpanah, "Sol-Gel synthesis and characterization of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{TiO}_2$ nanocomposites", *J. Supercond. Nov. Magn.* 28, 89 (2015).
- [23] K. H. Wu, T. H. Ting, M. C. Li and W. D. Ho, "Sol-gel auto-combustion synthesis of SiO_2 -doped NiZn ferrite by using various fuels", *J. Magn. Magn. Mater.* 298, 25 (2006).
- [24] H. Shang, J. Wang and Q. Liu, "Synthesis and characterization of nanocrystalline $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ obtained by using glucose as a fuel", *Mater. Sci. Eng. A* 456, 130 (2007).

- [25] X. Sun, Z. Y. Jia, H. Huang, J. W. Harrell, D. E. Nikles, K. Sun and L. M. Wang, "Synthesis and magnetic properties of CoPt nanoparticles". J. Appl. Phys. 95(11), 6747 (2004).
- [26] C. G. S. Souza, T. L. Silva, M. Jafelicci and L. C. Varanda, "Formation mechanism via a heterocoagulation approach of FePt nanoparticles using the modified polyol process", J. Phys. Chem. C 115(21), 10475 (2011).
- [27] S. J. A. Figueroa, S. J. Stewart, T. Rueda, A. Hernando and P. de la Presa, "Thermal evolution of Pt-Rich FePt/Fe₃O₄ heterodimers studied using X-ray absorption near-edge spectroscopy", J. Phys. Chem. C 115, 5500 (2011).
- [28] Y. Liu, Y. Yang, Y. Zhang, Y. Wang, X. Zhang, Y. Jiang, M. Wei, Y. Liu, Z. Liu and J. Yang, "A facile route to synthesis of CoPt magnetic nanoparticles", Mater. Res. Bull. 48, 721 (2013).
- [29] Y. Khemjeen, S. Pinitsoontorn, A. Chompoosor and S. Maensiri, "Reducing the ordering temperature of CoPt nanoparticles by B additive", J. Appl. Phys. 116, 053910 (2014).