

FACILE SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF Fe_3O_4 AND $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ NANOPARTICLES

Napasom THINRAYA¹, Harnchana GATEMALA² and Natthida RAKKAPAO^{1*}

1 Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani, Thailand;
natthida.r@psu.ac.th (Corresponding Author)

2 EV and Battery Innovation Department, PTT Innovation Institute, PTT Public Company Limited,
Thailand

ARTICLE HISTORY

Received: 3 November 2025

Revised: 17 November 2025

Published: 2 December 2025

ABSTRACT

This study aimed to synthesize silica-coated magnetic nanoparticles ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) via a simple hydrothermal process and investigate their structural and magnetic properties. Fe_3O_4 nanoparticles were prepared by reducing $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ with NaBH_4 under alkaline conditions (pH 9) at 160 °C for 24 h. The surface of Fe_3O_4 was subsequently coated with silica using tetraethyl orthosilicate (TEOS) as a precursor through hydrolysis and condensation reactions, resulting in a silica content of approximately 38 wt%. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that Fe_3O_4 possessed a well-defined inverse spinel structure, while the silica coating did not alter its crystal phase. Fourier transform infrared (FTIR) spectra revealed the presence of Si-O-Si and Si-OH stretching vibrations, confirming the formation of an amorphous silica shell and increased surface hydrophilicity after coating. Vibrating sample magnetometry (VSM) measurements at room temperature indicated that both Fe_3O_4 and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparticles exhibited superparamagnetic behavior. The saturation magnetization (M_s) decreased from 70.14 emu/g for Fe_3O_4 to 34.23 emu/g after silica coating, attributed to the non-magnetic mass contribution and spin disorder at the surface. These results demonstrate that the simple hydrothermal synthesis route effectively produces Fe_3O_4 nanoparticles possessed high crystallinity, and the $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ composites retained the core's crystallinity while demonstrating an amorphous silica shell, both of which have good stability and good magnetic properties, making them suitable for various applications and efficient.

Keywords: Fe_3O_4 nanoparticles, Silica coating, Magnetic properties, Hydrothermal synthesis

CITATION INFORMATION: Thinraya, N., Gatemala, H., & Rakkapao, N. (2025). Facile Synthesis and Characterization of Structural and Magnetic Properties of Fe_3O_4 and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ Nanoparticles. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(12), 8

การสังเคราะห์อย่างง่ายและการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและแม่เหล็กของ อนุภาคนาโน Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

ณพสร ถิ่นระยะ¹, หาญชนะ เกตมาลา² และ ณัฐริดา รักกะเปา^{1*}

1 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี;
natthida.r@psu.ac.th (ผู้ประพันธ์บรรณกิจ)

2 ฝ่ายนวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ สถาบันนวัตกรรม ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กเคลือบซิลิกา ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบง่าย และศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและแม่เหล็กของวัสดุที่ได้ อนุภาค Fe_3O_4 ถูกเตรียมโดยการรีดิวซ์ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ด้วย NaBH_4 ภายใต้สภาวะต่าง (pH 9) ที่อุณหภูมิ 160 °C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเคลือบผิวด้วยซิลิกาโดยใช้เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน พบว่ามีปริมาณซิลิกาเคลือบอยู่บนพื้นผิวประมาณ 38% w/w ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงว่า Fe_3O_4 มีโครงสร้างสปินเนลแบบกลับ (inverse spinel) และการเคลือบซิลิกาไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเดิม ขณะที่สัญญาณการสั่นของหมู่ Si-O-Si และ Si-OH จากสเปกตรัม FTIR ยืนยันการเกิดชั้นซิลิกาอสัณฐานและความชอบน้ำของพื้นผิวหลังการเคลือบ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง VSM ที่อุณหภูมิห้องพบว่า อนุภาค Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ แสดงพฤติกรรมซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (M_s) ของ Fe_3O_4 เท่ากับ 70.14 emu/g และลดลงเหลือ 34.23 emu/g หลังการเคลือบ เนื่องจากมวลที่ไม่เป็นแม่เหล็กและการไม่เป็นระเบียบของสปินบริเวณผิว ผลการศึกษายืนยันว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบง่ายสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน Fe_3O_4 มีสภาพผลึกสูง และวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ที่ยังคงสภาพผลึกของแกนกลางไว้ได้ ขณะเดียวกันก็สร้างเปลือกซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐาน ซึ่งทั้งสองชนิดนี้มีเสถียรภาพที่ดีและมีคุณสมบัติแม่เหล็กที่ดีและเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อนุภาคนาโน Fe_3O_4 , การเคลือบด้วยซิลิกา, สมบัติแม่เหล็ก, การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

ข้อมูลอ้างอิง: ณพสร ถิ่นระยะ, หาญชนะ เกตมาลา และ ณัฐริดา รักกะเปา. (2568). การสังเคราะห์อย่างง่ายและการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและแม่เหล็กของอนุภาคนาโน Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$. *Procedia of Multidisciplinary Research*, 3(12), 8

บทนำ

ในปัจจุบัน การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก (Fe_3O_4) ยังคงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา โดยเฉพาะด้านชีวการแพทย์ เช่น การนำส่งยา (drug delivery) การถ่ายภาพด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) การทำให้โปรตีนบริสุทธิ์ และการเร่งปฏิกิริยา (Lee et al. 2018) อนุภาค Fe_3O_4 มีสมบัติเด่น ได้แก่ พฏิกิริยารีดอกซ์สูง ความทนทานต่อสภาวะกรด-ด่าง ความเป็นพิษต่ำ และความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง (Ali et al. 2023)

อย่างไรก็ตาม อนุภาค Fe_3O_4 มักเกิดการจับตัวเป็นก้อน (agglomeration) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางแม่เหล็กและการกระจายตัวลดลง เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงนิยมเคลือบพื้นผิวด้วยวัสดุพวยง เช่น SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CeO_2 หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยเฉพาะ SiO_2 ซึ่งเป็นวัสดุพวยงที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถป้องกันการรวมตัวของอนุภาค Fe_3O_4 เพิ่มความเสถียรทางเคมี และคงสภาพเฟสของ Fe_3O_4 ไม่ให้เปลี่ยนเป็น $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ หรือ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เมื่อได้รับความร้อน (Fajaroh et al. 2013; Lakhali et al. 2025) นอกจากนี้ SiO_2 ยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-Si-OH) บนพื้นผิว ซึ่งสามารถปรับแต่งด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ได้อย่างยืดหยุ่น ทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ในระบบชีวภาพ และเคมีพื้นผิว (Ghasemi & Ghahari, 2015)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งสังเคราะห์อนุภาค $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ โดยใช้ tetraethyl orthosilicate (TEOS) เป็นสารตั้งต้นของ SiO_2 ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสและการควบแน่น เพื่อปรับปรุงสมบัติพื้นผิว เพิ่มเสถียรภาพ และคงสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกของอนุภาค ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิค FTIR, XRD และ VSM

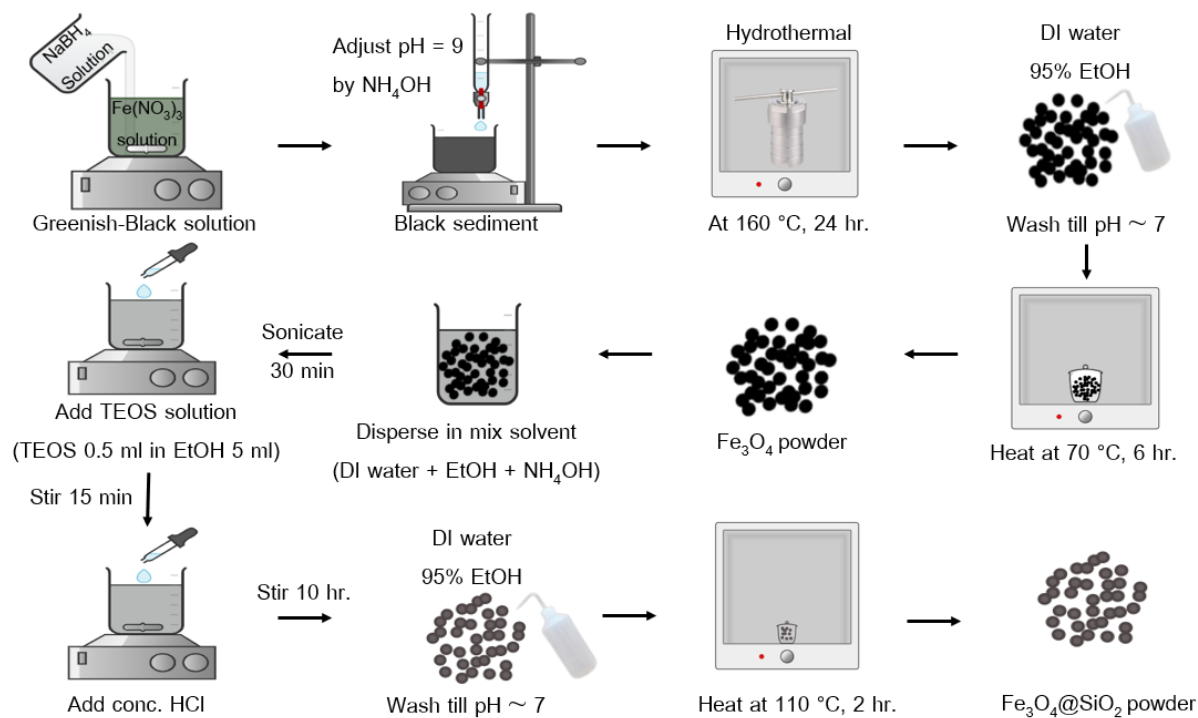
วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและสารเคมี เหล็ก(III)ไนเตรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, purity $\geq 99.99\%$), โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4), แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH , 25% w/w), เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS, purity $\geq 99.0\%$), กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37% v/v), เอทานอล (EtOH, 95% v/v) สารเคมีทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical grade) จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี และนำมาใช้โดยไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์เพิ่ม และใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water; DI water) ในการทดลอง

การสังเคราะห์ Fe_3O_4 แสดงดังภาพที่ 1 โดยนำ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 0.01 โมล ละลายในน้ำปริมาตร 20 มิลลิลิตร และนำ NaBH_4 ปริมาณ 0.03 โมล ละลายในน้ำปริมาตร 5 มิลลิลิตร กวนอย่างสม่ำเสมอกระทั่งละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นเติมสารละลาย NaBH_4 ลงในสารละลายเหล็ก กวนต่ออีกประมาณ 3 นาที และปรับค่า pH เท่ากับ 9 โดยใช้ NH_4OH จากนั้นเทสารละลายผสมลงในภาชนะพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) ขนาด 250 มิลลิลิตร และบรรจุลงในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เป็นตะกอนสีดำของ Fe_3O_4 แยกตะกอนโดยใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอก และล้างตะกอนด้วยน้ำ และเอทานอลหลายๆ ครั้งกระทั่ง pH เป็นกลาง จากนั้นอบตะกอน Fe_3O_4 ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ผงตัวอย่าง Fe_3O_4 สีดำสนิท เก็บผงตัวอย่างในถุงซิปล็อคและโถดูดความชื้นก่อนนำไปวิเคราะห์หรือใช้งาน

การสังเคราะห์ $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ แสดงดังภาพที่ 1 โดยเติม Fe_3O_4 ปริมาณ 0.25 กรัม ลงในสารละลายผสมของน้ำ (2.5 มิลลิลิตร) + เอทานอล (10 มิลลิลิตร) + NH_4OH (1 มิลลิลิตร) นำของผสมไปทำให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลา ค่อยๆ เติมสารละลาย TEOS (TEOS ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ซึ่งละลายในเอทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร) อย่างช้าๆ ทีละหยดจนหมด พร้อมทั้งกวนของผสมอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก และกวนต่ออีก 15 นาที จากนั้นเติมกรด HCl เข้มข้น ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงไป และกวนต่อเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา แยกตะกอนโดยใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอก และล้างตะกอนด้วยน้ำและเอทานอลหลายๆ ครั้ง กระทั่ง pH เป็นกลาง จากนั้นอบตะกอนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคนาโน

แม่เหล็กเคลือบซิลิกา ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีเทาเข้มเป็นผลิตภัณฑ์ เก็บผงตัวอย่างในถุงซิปล็อคและ
 โถดูดความชื้นก่อนนำไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ ลักษณะทางกายภาพของผงตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ สังเกตจากสีที่มองเห็น
 ได้ด้วยตาเปล่า เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดสี รุ่น WR Series Colorimeter (WR-18, China)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (FTIR) รุ่น Spectrum Two (PerkinElmer, Llantrisant, UK)
 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่พื้นผิวของอนุภาค Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ เตรียมตัวอย่างโดยใช้
 เทคนิค KBr pellet และทำการวัด 32 ซ้ำ ในช่วงความยาวคลื่น 4000-400 cm^{-1} และหาค่าเฉลี่ย

ทำการศึกษาสมบัติเชิงผลึกของตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) รุ่น
 Empyrean (PANalytical, Netherlands) โดยใช้หลอดรังสีเอกซ์ชนิด Cu (Copper anode) ที่มีความยาวคลื่น $\text{CuK}\alpha$
 เท่ากับ 0.154 นาโนเมตร และใช้แรงดันไฟฟ้า 40 kV ร่วมกับกระแส 30 mA ในการสร้างรังสี X-ray โดยเก็บข้อมูล
 ในช่วง 2θ ระหว่าง 5°- 90° ด้วย step size เท่ากับ 0.026° และใช้เวลาในการสแกนต่อ step ประมาณ 70.125 วินาที
 ซึ่งเหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย





ทำการศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบ
 สั่นสะเทือน (VSM) ที่พัฒนาขึ้นภายในองค์กร (VSM; ปรับเทียบด้วยทรงกลม Ni ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. รุ่น
 730908, Lake Shore Cryotronics, Westerville, Ohio, สหรัฐอเมริกา) โดยวิเคราะห์กราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis
 loops) และรายงานค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation Magnetization; M_s)

ผลการทดลอง

อนุภาคนาโนแม่เหล็ก (Fe_3O_4)

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน Fe_3O_4 โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล พบว่า อนุภาคตัวอย่างที่ได้มีขนาดเล็ก ลักษณะเป็นผงละเอียดมากและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีสีดำสนิท แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เชิงสีในระบบ CIELAB ของตัวอย่าง Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังตารางที่ 2 โดยค่า L^* ซึ่งแทนความสว่าง (lightness) เท่ากับ 0.02 ± 0.03 แสดงว่า วัสดุมีความสว่างต่ำมากจนเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการดูดกลืนแสงที่แทบสมบูรณ์แบบในช่วงแสงที่มองเห็นได้ ทำให้วัสดุมีลักษณะดำสนิท หรือ “super black” สำหรับค่า a^* และ b^* ซึ่งบ่งชี้ทิศทางของสีในระนาบโครมาโทซิติ โดยพบว่า ค่า a^* เป็นบวกเล็กน้อย (1.35 ± 0.17) แสดงถึงแนวโน้มของสีแดงที่อ่อนมาก และค่า b^* เป็นบวก (3.70 ± 0.04) แสดงถึงแนวโน้มของสีเหลืองอ่อน ทั้งสองค่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไป แสดงว่า วัสดุนี้อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางของระบบสี (a^* และ b^* เท่ากับ 0) ซึ่งหมายถึงความเป็นกลางของสี (neutral tone) ดังนั้น วัสดุนี้สามารถจัดเป็นวัสดุที่มีความดำเข้มสูง (ultra-black material) ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในช่วงที่มองเห็นได้ คุณสมบัตินี้มักสัมพันธ์กับโครงสร้างผิวระดับนาโนที่ช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง เช่น ในอนุภาค Fe_3O_4 หรือวัสดุนาโนแบบพรุน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทบทวนวรรณกรรมซึ่งรายงานว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโน Fe_3O_4 โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงสีดำที่มีความเป็นผลึกสูง อนุภาคมีขนาดเล็ก ซึ่งมักมีรูปร่างที่เป็นทรงกลมและทรงลูกบาศก์ (Keshta et al. 2024) และเมื่อทดสอบสมบัติแม่เหล็กเบื้องต้นโดยการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอก พบว่าตัวอย่างตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอย่างชัดเจนและรุนแรง แสดงดังตารางที่ 1

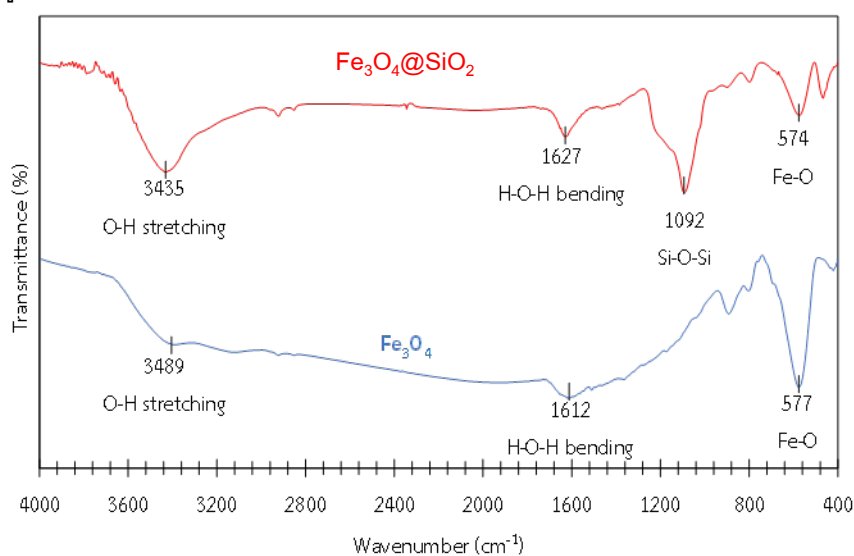
ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของ Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

ตัวอย่าง	Fe_3O_4	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$
ลักษณะทางกายภาพ	 ผงละเอียด สีดำ	 ผงละเอียด สีเทาเข้ม
การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก		

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์เชิงสีในระบบ CIELAB ของ Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

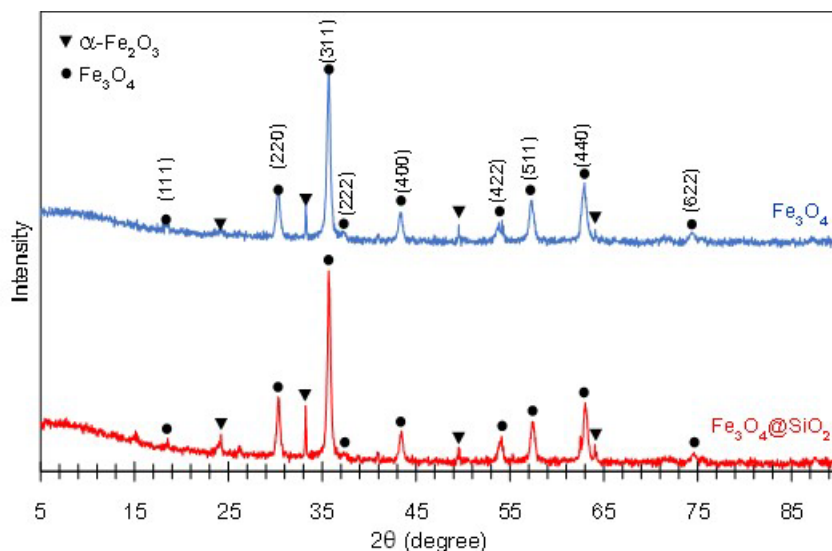
ค่าพารามิเตอร์เชิงสี	Fe_3O_4	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$	Δ
L^*	0.02 ± 0.03	7.63 ± 0.07	$\Delta L^* = 7.61$
a^*	1.35 ± 0.17	0.95 ± 0.17	$\Delta a^* = -0.40$
b^*	3.70 ± 0.04	2.88 ± 0.05	$\Delta b^* = -0.82$

เทคนิค FTIR ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่พื้นผิวของอนุภาค Fe_3O_4 โดยสเปกตรัมแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งพบแถบการดูดกลืนอย่างเด่นชัดที่ 577 cm^{-1} อันเป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดของพันธะ Fe-O ภายในโครงสร้าง spinel ferrite ของ Fe_3O_4 (Wang et al. 2022) แถบนี้เกิดจากการสั่นของไอออน Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่จัดเรียงอยู่ในโครงสร้าง inverse spinel (AB_2O_4) โดยที่ Fe^{3+} ครอบครองทั้งตำแหน่ง tetrahedral (A-sites) และ octahedral (B-sites) ในขณะที่ Fe^{2+} อยู่เฉพาะในตำแหน่ง octahedral เท่านั้น ลักษณะการกระจายของไอออนเหล่านี้มีอิทธิพลต่อพลังงานของการสั่นพันธะ Fe-O และสะท้อนถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก Fe_3O_4 ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ (Ramadan et al. 2022) นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนที่ 3489 cm^{-1} และ 1612 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H stretching และ H-O-H bending (Wang et al. 2022) ตามลำดับ แถบการดูดกลืนดังกล่าวสัมพันธ์กับหมู่ไฮดรอกซิล และโมเลกุลน้ำที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโน ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของวัสดุออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ในสภาวะชื้น (Mustafa et al. 2025) และ (Alzaidy et al. 2025) แถบเหล่านี้ยังบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนและมีบทบาทสำคัญต่อการดัดแปรหรือเคลือบผิวในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 2 สเปกตรา FTIR ของตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

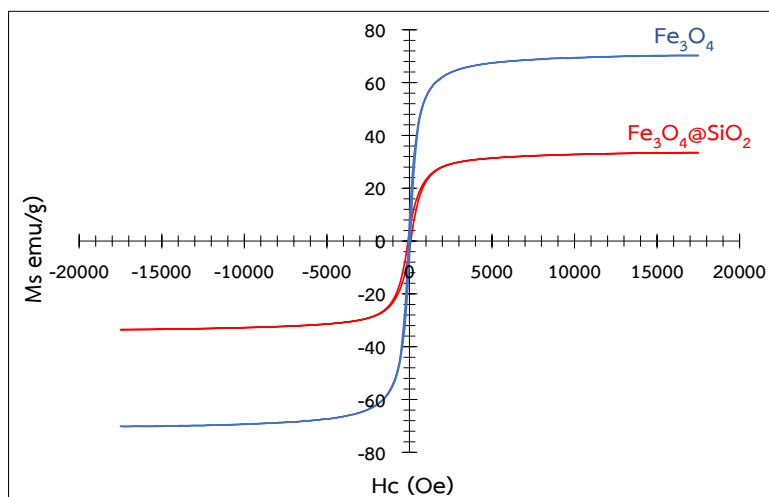
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของอนุภาค Fe_3O_4 ดังภาพที่ 3 แสดงพีคการเลี้ยวเบนที่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างสปินเนลของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) โดยปรากฏพีคหลักที่ตำแหน่ง $2\theta \approx 35.5^\circ$ ซึ่งเป็นระนาบผลึก (311) และยังมีปรากฏพีคการเลี้ยวเบนอื่นๆ ที่ 30.1° , 43.1° , 53.4° , 57.0° และ 62.6° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (220), (400), (422), (511) และ (440) ตามลำดับ ลักษณะของตำแหน่งพีคและความสัมพันธ์ของค่าความเข้มตรงกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS No. 19-0629 ของ Fe_3O_4 อย่างสมบูรณ์ (Watuna et al. 2025) และ (Yu et al. 2015) ซึ่งยืนยันว่าอนุภาคที่ได้มีเฟส Fe_3O_4 เป็นหลัก และมีเฟสของ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ซึ่งปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 33.1° (Cui et al. 2013) เจือปนเล็กน้อย อาจเกิดจากการให้ความร้อนในขั้นตอนของการอบไล่ความชื้น ความคมชัดของพีคซึ่งสัมพันธ์กับเฟส Fe_3O_4 สะท้อนถึงระดับความเป็นผลึกสูงของอนุภาค ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่เอื้อต่อการจัดเรียงตัวของอะตอมหลักในโครงสร้างสปินเนลได้อย่างสมบูรณ์แบบ ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาค Fe_3O_4 ที่คำนวณจากสมการ Scherrer โดยใช้ความกว้างครึ่งสูงสุด (FWHM) ของพีค (311) (Ramadan et al. 2022) และ (Takai et al., n.d.) มีค่าประมาณ 29.56 นาโนเมตร ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กในระดับนาโน และมีการกระจายขนาดที่สม่ำเสมอ ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในด้านนาโนเทคโนโลยี โดยเฉพาะในระบบชีวการแพทย์ เช่น การแยกเซลล์ด้วยแม่เหล็ก การนำส่งยาแบบควบคุมทิศทาง และการใช้เป็นสารเพิ่มคอนทราสต์ในเทคนิคถ่ายภาพ MRI



ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิค VSM ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า กราฟฮิสเทอรีซิสลูปมีค่าความเข้มสนามบังคับ (coercivity; H_c) และค่าแม่เหล็กตกค้าง (remanent magnetization; M_r) ใกล้ศูนย์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic, SPM) (Nabiyouni et al. 2015) โดยค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization; M_s) ที่วัดได้เท่ากับ 70.14 emu/g ค่าซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่าของอนุภาค Fe_3O_4 ในทางการค้า ซึ่งวัดได้เท่ากับ 33.51 emu/g โดยค่า M_s ของวัสดุในรูปผลึกสมบูรณ์ (bulk Fe_3O_4) จะอยู่ในช่วง 92 emu/g ที่ 300 K (Li et al. 2017) การที่ค่า M_s ของตัวอย่างนี้ยังคงอยู่ในระดับสูง บ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของ Fe_3O_4 มีความสมบูรณ์ดีและมีการจัดเรียงสปินของอะตอมเหล็กที่เป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่แสดงให้เห็นพีคการเลี้ยวเบนของผลึกที่คมและชัดเจน ค่าความเป็นแม่เหล็กที่สูงนี้สามารถอธิบายได้จากการที่กระบวนการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลส่งเสริมให้เกิดการตกผลึกอย่างสมบูรณ์และลดการเกิดตำแหน่งที่สปินไม่เรียงตัว (spin disorder) โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโน ส่งผลให้สัดส่วนของสปินที่มีการบิดเบี้ยวน้อยลง (spin canting) และลดการสูญเสียโมเมนต์แม่เหล็กรวมในระบบ นอกจากนี้ ขนาดของแกนแม่เหล็กที่เหมาะสมยังช่วยให้เกิดพฤติกรรมซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยไม่เกิดการรวมตัวของอนุภาคมากเกินไป (Hadadian et al. 2022) ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับผล FTIR และ XRD ที่ยืนยันถึงการมีอยู่ของพันธะ Fe-O ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในโครงสร้างสปินเนลของ Fe_3O_4 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยรักษาค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวให้อยู่ในระดับสูง อนุภาค Fe_3O_4 ที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกและค่า M_s สูงเช่นนี้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้งานทางนาโนเทคโนโลยีและการแพทย์

ขนาดอนุภาคนาโนแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการของ Boltzmann คือ $D_m = (18K_B T \xi / \pi M_s M_{sb})^{1/3}$ โดยที่ K_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann's (1.380649×10^{-23}), T คือ อุณหภูมิเท่ากับ 300 K, M_s คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของตัวอย่าง, M_{sb} คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของ bulk Fe_3O_4 , π เท่ากับ 3.1416 และ ξ คือ ความไวต่อสนามแม่เหล็กในช่วงเริ่มต้น (Hadadian et al. 2022) พบว่า Fe_3O_4 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7.89 nm



ภาพที่ 4 กราฟฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ของตัวอย่าง Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$

อนุภาคนาโนแม่เหล็กเคลือบซิลิกา ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$)

สำหรับ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ที่สังเคราะห์ได้นั้นพบว่ามีปริมาณของ SiO_2 เคลือบอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค Fe_3O_4 ถึง 38% w/w โดยการเคลือบอนุภาค Fe_3O_4 ด้วยซิลิกา ทำให้อนุภาคเปลี่ยนจากสีดำกลายเป็นสีเทาเข้ม แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดสี ดังตารางที่ 2 การเคลือบผิวอนุภาคด้วยซิลิกานั้นทำให้ค่าพารามิเตอร์สีเปลี่ยนแปลง โดยความแตกต่างสีเชิงปริมาณ คำนวณได้จาก $\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$ มีค่าเท่ากับ 7.67 ซึ่งบ่งชี้การเปลี่ยนสีที่มองเห็นได้อย่างชัดเจน (ทั่วไป $\Delta E_{ab}^* > 2-3$ จะสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า) อีกทั้งค่า L^* ที่เพิ่มขึ้น สะท้อนว่าตัวอย่าง $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ มีการสะท้อนแสงมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Fe_3O_4 ซึ่งมีสีดำสนิท อาจมีสาเหตุมาจากชั้นเปลือกซิลิกาเป็นวัสดุที่มีการสะท้อนและกระจายแสงมากกว่าแกนนาโนแม่เหล็ก จึงเพิ่ม diffuse reflectance ของตัวอย่างโดยรวม อีกทั้งการเกิด interface core-shell ทำให้มีการกระเจิงแสงภายในอนุภาค โดยเฉพาะเมื่อขนาดเปลือก/รูพรุนอยู่ในช่วงนาโน-เมโซสเกล จึงลดการดูดกลืนแสงโดยรวมของตัวอย่าง รวมถึงการกระจายตัวที่ดีขึ้นและการลดการรวมกลุ่มของอนุภาคหลังการเคลือบด้วยซิลิกานั้นอาจทำให้ผิวตัวอย่างสะท้อนแสงได้มากขึ้นด้วย โดยค่า a^* และ b^* ยังคงเป็นบวก แต่ลดลงเล็กน้อย สะท้อนว่า ตัวอย่าง $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ยังคงมีโทนสีอบอุ่นแต่สีจางลงและใกล้เป็นกลางขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการที่ซิลิกามีสีขุ่นหรือใสจึงมีผลทำให้สีรวมของระบบจางลงและเป็นกลางขึ้น การเลื่อนลดลงของค่า a^* และ b^* เมื่อเคลือบด้วยซิลิกาอาจสะท้อนการลดของ absorption bands ที่เกี่ยวข้องกับ transition ภายใน Fe (d-d transitions) หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีพื้นผิวที่ลดการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นบางช่วง (Li & Shen, 2025) โดย การเพิ่มค่า L^* และ ΔE_{ab}^* ที่สัมพันธ์กับการเคลือบซิลิกา สอดคล้องกับผล FTIR ซึ่งปรากฏพีด Si-O-Si และการเพิ่ม OH-related bands ซึ่งชี้ว่าเปลือก SiO_2 เปลี่ยนสภาพแวดล้อมพื้นผิวและความชอบน้ำ ส่งผลต่อการดูดซับและการกระเจิงของแสง การลด chroma ($a^*, b^* \approx 0$) บ่งชี้ว่าส่วนที่ให้สีดำเข้มของแกน Fe_3O_4 ถูกบดบังหรือถูกชดเชยด้วยการสะท้อนของเปลือก จึงทำให้สีรวมอ่อนลง

การเพิ่มความสว่างและการเป็นกลางของสีของ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ อาจเป็นประโยชน์หากต้องการวัสดุที่มองเห็นและจัดการได้ดีขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ (visual tracking, colorimetric indicators) ในทางกลับกัน การลดการดูดกลืนแสงอาจมีผลต่อการใช้งานที่ต้องการการดูดกลืนแสงสูง (เช่น certain photothermal, optical absorption applications) ดังนั้นการออกแบบความหนา/ความหนาแน่นของเปลือกซิลิกาจึงสำคัญต่อสมบัติเชิงแสงอย่างมาก ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 2 แสดงว่า การเคลือบด้วยซิลิกาทำให้เกิดแถบการดูดกลืนใหม่ที่บริเวณ 1092 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบไม่สมมาตรของพันธะ Si-O-Si (Ghasemi & Ghahari, 2015) ซึ่งยืนยันการเกิดของเปลือกซิลิกานบนพื้นผิว Fe_3O_4 ได้สำเร็จ นอกจากนี้ยังพบการเลื่อน (red shift) ของแถบ Fe-O จาก $577 \rightarrow 574$

cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธะ Fe-O ของแกนแม่เหล็กและพันธะ Si-O ของชั้นซิลิกา ขณะเดียวกันแถบการดูดกลืนของ O-H stretching และ H-O-H bending มีการเลื่อนตำแหน่งจาก $3489 \rightarrow 3435 \text{ cm}^{-1}$ และ $1612 \rightarrow 1627 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ พร้อมกับความเข้มของแถบที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาค Fe_3O_4 บริสุทธิ์ ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงขึ้นและการดูดซับน้ำที่มากขึ้นบนพื้นผิว SiO_2 ซึ่งบ่งชี้ถึงการเคลือบซิลิกาที่สมบูรณ์และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของพื้นผิวอนุภาคหลังการเคลือบ

การเคลือบผิวด้วย SiO_2 ทำให้เกิดหมู่ซิลานอล (Si-OH) จำนวนมากบนพื้นผิว ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ -OH หรือโมเลกุลน้ำ (adsorbed H_2O) ได้แข็งแรงกว่าเดิม การเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เข้มข้นนี้ทำให้แรงยึดระหว่างอะตอม H และ O ในพันธะ O-H อ่อนลง ส่งผลให้เกิด red shift เลื่อนจาก $3489 \rightarrow 3435 \text{ cm}^{-1}$ ของแถบ O-H stretching (Mahmud et al., 2021) โครงสร้างของ SiO_2 ซึ่งประกอบด้วย หมู่ -Si-OH และโครงข่าย Si-O-Si ที่มีขั้วสูงยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับความชื้นและโมเลกุลน้ำ ส่งผลให้แถบ H-O-H bending มีความเข้มเพิ่มขึ้นและเลื่อนจาก $1612 \rightarrow 1627 \text{ cm}^{-1}$ การเลื่อนนี้อาจสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสถานะพันธะของโมเลกุลน้ำที่ถูกจำกัดอยู่บนพื้นผิว SiO_2 (confined water molecules) โดยเปรียบเทียบกับอนุภาค Fe_3O_4 เดิม ซึ่งหมู่ -OH มักดูดซับบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ที่มีขั้วน้อยกว่า การปรากฏของหมู่ -Si-OH และการเพิ่มขึ้นของแถบ H-O-H bending นั้นเป็นหลักฐานโดยตรงที่บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของความชอบน้ำ (hydrophilicity) ของอนุภาค $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ เมื่อเทียบกับอนุภาค Fe_3O_4 ดั้งเดิม โดยหลังการเคลือบ SiO_2 หมู่ -OH จะอยู่ในสภาพแวดล้อมของซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ที่มีโครงสร้างโพลีเมอร์แบบ Si-O-Si network ส่งผลให้พลังงานของพันธะ O-H เปลี่ยนแปลงและความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้น การปรากฏของแถบ Fe-O และ Si-O-Si พร้อมกันในสเปกตรัม จึงเป็นหลักฐานเชิงสเปกโทรสโกปีที่ยืนยันการเกิดโครงสร้างแบบ แกน-เปลือก (core-shell) ของ $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ อย่างสมบูรณ์ สะท้อนถึงความสำเร็จของกระบวนการเคลือบและความเข้ากันได้ทางเคมีระหว่างแกนแม่เหล็กและเปลือกซิลิกา (Wang et al. 2022)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของตัวอย่าง $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ แสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ยอดการเลี้ยวเบนยังคงปรากฏในตำแหน่งเดิมโดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างผลึกของแกนแม่เหล็กไม่ถูกทำลายหรือเปลี่ยนแปลงเมื่อเคลือบด้วยซิลิกา และเมื่อคำนวณขนาดผลึกเฉลี่ยโดยสมการของ Scherrer พบว่า ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาค Fe_3O_4 ซึ่งเป็นแกน นั้นใกล้เคียงกับของอนุภาค Fe_3O_4 บริสุทธิ์ อีกทั้งยังไม่ปรากฏของพีคใหม่ที่สัมพันธ์กับเฟส SiO_2 ซึ่งยืนยันได้ว่าซิลิกาที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวอนุภาคอยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมักแสดงเป็นพื้นหลัง (broad hump) ความเข้มต่ำที่บริเวณ $2\theta \approx 20\text{-}25^\circ$ จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า กระบวนการสังเคราะห์ Fe_3O_4 แบบไฮโดรเทอร์มอลสามารถให้ผลึก Fe_3O_4 ที่มีความสมบูรณ์สูง และการเคลือบซิลิกาไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกของเฟสแม่เหล็ก แต่ช่วยเพิ่มความเสถียรทางเคมีและความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในระบบนาโนเชิงฟังก์ชันต่อไป

สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาค $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ ที่วัดด้วยเทคนิค VSM แสดงในภาพที่ 4 พบว่า กราฟฮิสเทอรีซิสมีค่า H_c และ M_r เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอนุภาค Fe_3O_4 บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ค่าทั้งสองยังคงอยู่ในระดับต่ำมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงซูเปอร์พาราแมกเนติก ไม่ใช่พฤติกรรมแบบซูเปอร์พาราแมกเนติกอย่างแท้จริง ความชัดเจนของลูปฮิสเทอรีซิสที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของขนาดแกนแม่เหล็กบางส่วนหรือการรวมตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มขนาดเล็กหลังการเคลือบซิลิกา มากกว่าที่จะเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะเฟสทางแม่เหล็กของวัสดุ ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (M_s) ของ $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ ลดลงเหลือ 34.23 emu/g ซึ่งต่ำกว่า Fe_3O_4 บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ การลดลงของค่า M_s เกิดจากการเพิ่มขึ้นของมวลส่วนที่ไม่เป็นแม่เหล็กอันเนื่องมาจากชั้นเคลือบ SiO_2 และบทบาทของชั้น SiO_2 ที่ลดปฏิสัมพันธ์ทางแม่เหล็กกระยะสั้น (exchange interaction) ระหว่างผิวอนุภาค Fe_3O_4 ส่งผลให้ความไวระเบียบของสปินบริเวณพื้นผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ รอยต่อระหว่างแกน Fe_3O_4 และเปลือก SiO_2 อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสปิน (spin structure) และความไร้ระเบียบของสปิน (spin disorder) ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่า M_s ลดลงได้เช่นกัน ผลที่สังเกตได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ FTIR และข้อมูล

สัดส่วนมวลที่แสดงว่า ปริมาณชั้นเคลือบ SiO_2 อยู่ที่ประมาณ 38% w/w การคำนวณขนาดอนุภาคด้วยสมการของ Boltzmann พบว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 7.91 nm ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่รองรับพฤติกรรมกึ่งซูเปอร์พาราแมกเนติก และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะเฟสทางแม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ชั้นเคลือบ SiO_2 ยังมีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพ และป้องกันการจับกลุ่มของอนุภาคแม่เหล็ก ส่งผลให้วัสดุเหมาะสมต่อการใช้งานด้านนาโนเทคโนโลยี โดยเฉพาะการประยุกต์เป็นตัวพาแม่เหล็ก (magnetic carrier) สำหรับการเคลือบด้วยโมเลกุลชีวภาพ (bioconjugation) ผ่านหมู่ฟังก์ชันบนผิวซิลิกา ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และรองรับการใช้งานในระบบชีวการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการทดลอง

อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ ถูกสังเคราะห์สำเร็จด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบง่าย โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ยืนยันว่า Fe_3O_4 ที่ได้มีโครงสร้างสปินเนลแบบกลับ (inverse spinel) ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง และการเคลือบด้วยซิลิกาไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของ Fe_3O_4 เปลี่ยนแปลง แต่เกิดเป็นชั้นซิลิกาอสัณฐานเคลือบบนพื้นผิวอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้สัญญาณ FTIR ที่สอดคล้องกับพันธะ Si-O-Si และหมู่ซิลานอล (Si-OH) ยืนยันการเกิดชั้นเคลือบดังกล่าว ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการจับน้ำและสมบัติชอบน้ำของอนุภาค ทำให้พร้อมต่อการดัดแปรผิวในงานด้านชีวการแพทย์ ด้านสมบัติทางแม่เหล็ก พบว่าอนุภาค Fe_3O_4 แสดงพฤติกรรมซูเปอร์พาราแมกเนติกที่อุณหภูมิห้อง โดยมีค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (M_s) สูงถึง 70.14 emu/g หลังการเคลือบด้วย SiO_2 ค่า M_s ลดลงเหลือ 34.23 emu/g อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของมวลส่วนที่ไม่เป็นแม่เหล็กจากชั้นซิลิกาและความไร้ระเบียบของสปินบริเวณพื้นผิว แม้ว่าค่า M_s จะลดลง แต่ $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{SiO}_2$ ยังคงมีสมบัติแม่เหล็กที่ดีเพียงพอสำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนทั้งสองระบบมีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานนาโนเทคโนโลยีและชีวการแพทย์หลากหลายรูปแบบ เช่น การนำส่งยา การเพิ่มความคมชัดในการสร้างภาพ MRI และการแยกชีวโมเลกุลด้วยแม่เหล็ก

เอกสารอ้างอิง

- Ali, Z., Andreassen, J. P., & Bandyopadhyay, S. (2023). Fine-tuning of particle size and morphology of silica coated iron oxide nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(12), 4831-4839.
- Alzaidy, A. H., Ganduh, S. H., Abed, M. J., Dawi, E. A., Jasim, L. S., & Ashoub, M. H. (2025). Microwave assisted solvothermal green synthesis of Fe_3O_4 nanoparticles using sea buckthorn for multiple myeloma and monocytic leukemia treatment. *Scientific Reports*, 15(1), 25743.
- Cui, H., Liu, Y., & Ren, W. (2013). Structure Switch between $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and Fe_3O_4 during the Large Scale and Low Temperature Sol-Gel Synthesis of Nearly Monodispersed Iron Oxide Nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 24(1), 93-97.
- Fajaroh, F., Setyawan, H., Nur, A., & Lenggono, I. W. (2013). Thermal stability of silica-coated magnetite nanoparticles prepared by an electrochemical method. *Advanced Powder Technology*, 24(2), 507-511.
- Ghasemi, E., & Ghahari, M. (2015). Synthesis of silica coated magnetic nanoparticles. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(2), 133-137.
- Hadadian, Y., Masoomi, H., Dinari, A., Ryu, C., Hwang, S., Kim, S., ... & Yoon, J. (2022). From low to high saturation magnetization in magnetite nanoparticles: the crucial role of the molar ratios between the chemicals. *ACS Omega*, 7(18), 15996-16012.

- Keshta, B. E., Gemeay, A. H., Sinha, D. K., Elsharkawy, S., Hassan, F., Rai, N., & Arora, C. (2024). State of the art on the magnetic iron oxide Nanoparticles: Synthesis, Functionalization, and applications in wastewater treatment. *Results in Chemistry*, 7, 101388.
- Lakhali, H., Şahin, Ö., & Ceyhan, A. A. (2025). A novel core-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2/\text{Co-Cr-B}$ magnetic catalyst for efficient and reusable hydrogen evolution from NaBH_4 hydrolysis. *New Journal of Chemistry*, 49(26), 11304-11325.
- Lee, D. W., Fatima, H., & Kim, K. S. (2018). Preparation of silica coated magnetic nanoparticles for bioseparation. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(2), 1414-1418.
- Li, B., & Shen, A. H. (2025). Effect of $\text{Fe}_2\text{O}_3@ \text{SiO}_2$ Core-Shell Nanoparticle Doping Ratio on Color Appearance of Synthetic Opal Films Inspired by Natural Fire Opal. *Coatings*, 15(6), 646.
- Li, Q., Kartikowati, C. W., Horie, S., Ogi, T., Iwaki, T., & Okuyama, K. (2017). Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe_3O_4 nanoparticles. *Scientific Reports*, 7(1), 9894.
- Mahmud, N., Benamor, A., Nasser, M. S., Ba-Abbad, M. M., El-Naas, M. H., & Mohammad, A. W. (2021). Effective heterogeneous fenton-like degradation of malachite green dye using the core-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ nano-catalyst. *ChemistrySelect*, 6(4), 865-875.
- Mustafa, A., Ali, U., Iqbal, A., Qayyum, M., Haq, I. U., & Islam, F. (2025). Synthesis and Characterization of Fe_3O_4 Nanoparticles by Sol-Gel Method Using Water as a Solvent. *Advances in Nanoparticles*, 14(1), 1-11.
- Ramadan, I., Moustafa, M. M., & Nassar, M. Y. (2022). Facile controllable synthesis of magnetite nanoparticles via a co-precipitation approach. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(9), 59-65.
- Takai, Z. I., Mustafa, M. K., Asman, S., & Sekak, K. A. (2019). Preparation and characterization of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles by sol-gel method. *Int. J. Nanoelectron. Mater*, 12(1), 37-46.
- Wang, T., Hu, X., Yang, Y., Wu, Q., He, C., He, X., ... & Mao, X. (2022). New insight into assembled $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PEI}@ \text{Ag}$ structure as acceptable agent with enzymatic and photothermal properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), 10743.
- Watuna, M. A., & Dwandaru, W. S. B. (2025). A Green Synthesis of Fe_3O_4 Nanoparticles with Moringa Oleifera Leaf Extract as Methylene Blue Absorbent. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 14(2), 244-253.
- Yu, L., Hao, G., Gu, J., Zhou, S., Zhang, N., & Jiang, W. (2015). $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PS}$ magnetic nanoparticles: Synthesis, characterization and their application as sorbents of oil from waste water. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 394, 14-21.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Conflicts of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.



Copyright: © 2025 by the authors. This is a fully open-access article distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).