PROCEEDINGS CONFERENCE SISI INDONESIA III
Tut Wuri Handayani: Development of Education, Science and Technology, and Humanity for the Progress of the Indonesian People
https://conference.sinesia.id/ncrcs-sinesia | E-ISSN: 3110-1062 |
https://doi.org/10.69836/ncrcs-sinesia

Studi Literatur: Optimalisasi Pemanfaatan Besi melalui Sifat Magnetik: Pendekatan Kimia

Literature Review: Optimalization of Iron Utilization Based on Magnetic Properties: A Chemical Approach

Miranti Maya Sylvani[1],
mirantimayasylvani@mipa.upr.ac.id
Universitas Palangka Raya, Kalimantan Tengah, Indonesia

Info Article
Submitted: 2 May 2026 | **Revised**: 13 May 2026 | **Accepted**: 14 May 2026
How to cite: Miranti Maya Sylvani, "Studi Literatur: Optimalisasi Pemanfaatan Besi melalui Sifat Magnetik: Pendekatan Kimia", *Proceedings Conference Sisi Indonesia III*, 2026, P. 318-327.

ABSTRACT

Magnetic iron is a material with significant potential in various industrial fields due to its strong magnetic properties and abundant natural availability. One of the most widely developed materials is magnetite (Fe_3O_4), which possesses ferrimagnetic properties and can be applied in environmental, energy, electronic, and biomedical sectors. However, the utilization of magnetic iron still faces challenges related to particle size control, stability, and magnetic characteristics. This study aims to examine the optimization of iron utilization through magnetic property control using a chemical approach. The research method employed is a literature review of 20 national and international scientific articles obtained from Google Scholar, ScienceDirect, and MDPI databases published between 2013 and 2024. The results indicate that chemical synthesis methods such as co-precipitation, sol-gel, hydrothermal, and thermal decomposition significantly influence particle size, crystallinity, and magnetic properties of the material. The co-precipitation method is considered the most effective due to its simplicity, low cost, and ability to produce magnetite nanoparticles with favorable magnetic properties. By controlling synthesis parameters such as pH, temperature, and precursor concentration, iron-based magnetic materials can be optimized for various industrial and modern technological applications.

Keyword: *iron magnetic properties[1], ferromagnetism[2], magnetization[3], chemical treatment[4], iron utilization[5].*

ABSTRAK

Besi magnet merupakan material yang memiliki potensi besar dalam berbagai bidang industri karena sifat magnetiknya yang kuat serta ketersediaannya yang melimpah di alam. Salah satu material yang banyak dikembangkan adalah magnetit (Fe_3O_4), yang memiliki sifat ferimagnetik dan dapat dimanfaatkan dalam bidang lingkungan, energi, elektronik, serta biomedis. Namun, pemanfaatan besi magnet masih menghadapi kendala terkait pengendalian ukuran partikel, stabilitas, dan sifat magnetiknya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji optimalisasi pemanfaatan besi melalui pengendalian sifat magnetik menggunakan pendekatan kimia. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur terhadap 20 artikel ilmiah nasional dan internasional yang diperoleh dari Google Scholar, ScienceDirect, dan MDPI pada rentang tahun 2013–2024. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode sintesis kimia seperti kopresipitasi, sol-gel, hidrotermal, dan thermal decomposition memberikan pengaruh signifikan terhadap ukuran partikel, kristalinitas, serta sifat magnetik material. Metode kopresipitasi menjadi metode yang paling efektif karena sederhana, murah, dan mampu menghasilkan nanopartikel magnetit dengan sifat magnetik yang baik. Dengan pengendalian parameter sintesis seperti pH, suhu, dan konsentrasi prekursor, material magnetik berbasis besi dapat dioptimalkan untuk berbagai aplikasi industri dan teknologi modern.

Kata Kunci: *sifat magnetik besi, feromagnetisme, magnetisasi, domain magnetik, perlakuan kimia, pemanfaatan besi.*

This work is licensed under CC BY-SA 4.0

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber daya pasir besi cukup melimpah, baik di daerah pantai maupun aliran sungai. Pasir besi mengandung mineral magnetik seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit (α-Fe_2O_3), dan maghemit (γ-Fe_2O_3) yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam bidang industri, energi, lingkungan, serta teknologi material. Namun, pemanfaatan pasir besi di Indonesia masih belum optimal dan sebagian besar hanya digunakan sebagai bahan bangunan atau diekspor dalam bentuk bahan mentah. Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu oksida besi yang memiliki sifat ferimagnetik dengan respon tinggi terhadap medan magnet luar. Material ini memiliki struktur spinel terbalik yang memungkinkan terjadinya interaksi spin elektron sehingga menghasilkan sifat magnetik yang kuat. Selain itu, magnetit memiliki keunggulan berupa kestabilan kimia, biaya produksi relatif rendah, dan ketersediaan bahan baku yang melimpah di alam. (Yulianto et al 2010)

Perkembangan nanoteknologi telah mendorong penelitian mengenai nanopartikel magnetit karena ukuran partikel nano mampu meningkatkan luas permukaan dan performa material. Nanopartikel magnetit banyak diaplikasikan dalam pengolahan limbah, adsorben magnetik, penghantaran obat (*drug delivery*), sensor, hingga elektroda baterai lithium-ion. Akan tetapi, sifat magnetik material sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, struktur kristal, metode sintesis, serta kondisi kimia selama proses pembuatan. (Rendy et al 2012)

Berbagai metode sintesis kimia seperti *co-precipitation*, *sol-gel*, hidrotermal, dan *thermal decomposition* telah dikembangkan untuk menghasilkan material magnetik dengan karakteristik tertentu. Namun, setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan yang mempengaruhi ukuran partikel, kristalinitas, stabilitas, dan sifat magnetik material yang dihasilkan. (Takeuchi 2017)

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan kajian literatur mengenai optimalisasi pemanfaatan besi melalui pengendalian sifat magnetik menggunakan pendekatan kimia. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai metode sintesis yang efektif serta pengaruh parameter kimia terhadap sifat magnetik material berbasis besi sehingga dapat mendukung pengembangan teknologi material magnetik di masa mendatang.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) dengan mengkaji berbagai artikel ilmiah yang berkaitan dengan sifat magnetik besi dan sintesis magnetit (Fe_3O_4). Sumber literatur diperoleh dari database ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, MDPI, dan jurnal nasional terakreditasi.

Sebanyak 20 artikel ilmiah yang diterbitkan pada rentang tahun 2013–2024 digunakan sebagai sumber utama penelitian. Artikel dipilih berdasarkan kesesuaian tema, yaitu:

1. sifat magnetik besi,
2. sintesis nanopartikel magnetit,
3. pengaruh metode kimia terhadap karakteristik magnetik,
4. aplikasi material magnetik berbasis besi.

Tahapan penelitian meliputi:

1. pengumpulan literatur,
2. seleksi artikel,
3. analisis isi,
4. perbandingan metode sintesis,
5. penyusunan hasil kajian.

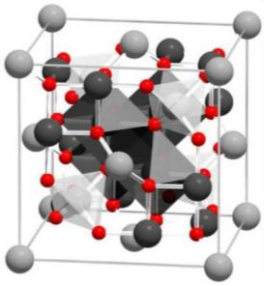
Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui hubungan antara metode sintesis kimia dengan karakteristik magnetik material besi yang dihasilkan.

Hasil dan pembahasan

Besi merupakan material yang memiliki sifat magnetik yang kuat dan termasuk dalam kelompok material ferromagnetik. Sifat ini menjadikan besi banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti perangkat listrik, sensor, dan komponen industri. Kemampuan besi untuk termagnetisasi dipengaruhi oleh struktur internalnya, khususnya domain magnetik yang tersusun dalam material.

Sifat magnetik besi dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti komposisi kimia, struktur kristal, suhu, serta kondisi proses. Perubahan pada faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan variasi dalam perilaku magnetik, termasuk kekuatan magnetisasi dan kestabilan sifat magnetik. Oleh karena itu, pengendalian parameter-parameter tersebut menjadi penting dalam upaya optimalisasi pemanfaatan besi. (Marchan-Garcia et al., 2024)

Selain dalam bentuk logam murni, besi juga dapat ditemukan dalam bentuk senyawa seperti oksida besi yang memiliki karakteristik magnetik yang berbeda. Salah satu contoh penting adalah magnetit (Fe_3O_4), yang merupakan material ferrimagnetik dengan sifat magnetik yang kuat. Sifat ini dipengaruhi oleh struktur kristalnya serta keberadaan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} dalam material, yang berperan dalam interaksi magnetik. (Dudchenko et al., 2022)



Gambar 1 Magnetit

Magnetit, Fe_3O_4, merupakan suatu oksida besi yang memiliki struktur spinel terbalik. Rincian struktur ini pertama kali ditetapkan pada tahun 1915 oleh W.H. Bragg, yang memberikan salah satu struktur mineral pertama yang ditentukan menggunakan metode difraksi sinar-X. Magnetit memiliki sel satuan kubik dengan konstanta kisi sebesar a = 0,839 nm dan merupakan oksida besi dengan valensi campuran Fe^{3+} dan Fe^{2+} dalam stoikiometri Fe^{2+}/Fe^{3+} = 0,5. Ciri utama dari kisi kristal spinel adalah adanya dua posisi kristalografis ion besi: Fe^{2+} dan setengah dari ion Fe^{3+} menempati situs oktahedral (dikelilingi oleh enam ion oksigen O^{2-}), dan setengah lainnya dari ion Fe^{3+} menempati situs tetrahedral (dikelilingi oleh empat ion oksigen O^{2-}). Magnetit sering kali bersifat non-stoikiometrik, yang menghasilkan lapisan Fe^{3+} yang kekurangan kation. Ion Fe^{2+} juga dapat sepenuhnya atau sebagian digantikan oleh ion divalen lain (Mg^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, dll.), yang menyebabkan perubahan pada konstanta kisi. (Dudchenko et al., 2022)

Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu metode top-down dan bottom-up. Metode top-down dilakukan dengan cara menghancurkan material berukuran besar menjadi skala nano, seperti melalui teknik ball milling, sputtering, dan spray pyrolysis. Namun, metode yang lebih banyak digunakan adalah pendekatan bottom-up, yaitu pembentukan nanopartikel dari ion atau molekul penyusunnya. Pendekatan ini dinilai lebih efektif karena mampu menghasilkan partikel dengan ukuran dan distribusi yang lebih terkontrol. Dalam metode bottom-up, terdapat beberapa teknik yang umum digunakan, seperti thermal decomposition, microemulsion, sol-gel, sintesis elektrokimia, dan kopresipitasi, yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. (Ren H et al., 2024)

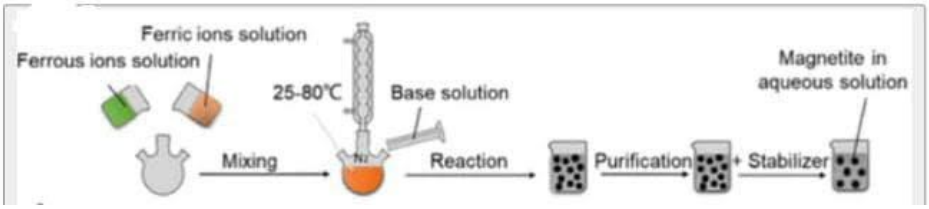
Tabel 1 Perbandingan Metode Sintesis Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4)

Metode Sintesis	Suhu Reaksi	Kelebihan	Kekurangan	Karakteristik Produk
Co-precipitation	Rendah (25–80°C)	Murah, sederhana, cepat	Sensitif terhadap pH	Ukuran partikel cukup seragam

Sol-gel	Sedang	Struktur homogen	Waktu sintesis lama	Kristalinitas baik
Hidrotermal	Tinggi (>150°C)	Kemurnian tinggi	Biaya alat mahal	Struktur kristal stabil
Thermal decomposition	Tinggi (200–300°C)	Ukuran partikel seragam	Energi tinggi	Magnetisasi tinggi
Sonokimia	Sedang	Reaksi cepat	Peralatan khusus	Dispersi partikel baik

Metode thermal decomposition dikenal sederhana, cepat, dan mampu menghasilkan ukuran partikel yang terkontrol, namun membutuhkan energi tinggi dan berpotensi toksik. Metode microemulsion menghasilkan partikel yang tersebar merata dan mudah dikontrol, tetapi sulit diterapkan dalam skala industri serta memiliki potensi toksisitas. Metode sol-gel memungkinkan kontrol struktur yang baik, dilakukan pada suhu rendah, dan menghasilkan produk homogen, meskipun membutuhkan waktu yang lama dan efisiensinya relatif rendah. Sintesis elektrokimia menawarkan keunggulan berupa ramah lingkungan dan kemurnian tinggi, tetapi memiliki biaya yang mahal serta proses yang kompleks. Di antara semua metode tersebut, metode kopresipitasi merupakan yang paling populer karena prosesnya sederhana, efisien, berlangsung pada suhu rendah, serta mudah diaplikasikan dalam skala industri, meskipun sensitif terhadap pH dan memerlukan proses lanjutan. (Ren H et al., 2024)

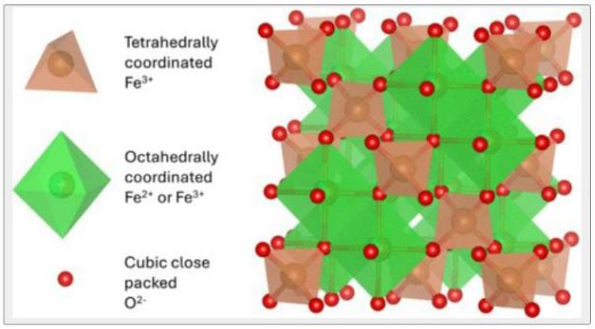
Secara khusus, metode kopresipitasi dilakukan dengan mereaksikan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} dalam larutan basa yang mengandung ion OH^-, menghasilkan nanopartikel magnetit melalui reaksi $Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 8OH^- \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2O$. Metode ini banyak digunakan karena bersifat murah, cepat, ramah lingkungan, dan mudah untuk diskalakan. Sementara itu, metode lain seperti thermal decomposition melibatkan pemanasan garam besi pada suhu tinggi (200–300°C) untuk menghasilkan partikel dengan ukuran terkontrol, meskipun memerlukan energi besar. Metode microemulsion menggunakan droplet kecil sebagai "reaktor mini" sehingga menghasilkan ukuran partikel yang seragam dengan aglomerasi rendah. Metode sol-gel berlangsung melalui tahap perubahan larutan menjadi gel hingga padatan, memberikan kontrol struktur yang sangat baik meskipun prosesnya lama. Adapun metode elektrokimia menggunakan elektroda besi yang melepaskan ion Fe, yang kemudian bereaksi membentuk magnetit, dengan proses yang dipengaruhi oleh tegangan, suhu, dan komposisi larutan. (Ren H et al., 2024)



Gambar 2 kopresipitasi

Material berbasis besi, khususnya magnetit (Fe_3O_4), memiliki berbagai aplikasi dalam bidang teknologi karena sifat magnetiknya yang unggul. Salah satu aplikasinya adalah sebagai katalis yang ramah lingkungan, mudah dipisahkan secara magnetik, serta dapat digunakan kembali, sehingga mendukung konsep kimia hijau. Penggunaan magnetit sebagai katalis telah diaplikasikan dalam berbagai proses, seperti reaksi sintesis organik dan reaksi oksidasi. Selain itu, magnetit juga dimanfaatkan dalam bidang energi, seperti sebagai material anoda pada baterai lithium-ion, karena memiliki kapasitas tinggi, biaya rendah, dan ramah lingkungan. Namun, penggunaannya masih menghadapi tantangan seperti perubahan volume selama siklus operasi yang dapat mempengaruhi kinerja material. (Yang H et al., 2025)

Struktur spinel terbalik memiliki situs tetrahedral (8a) yang ditempati oleh salah satu kation M^{3+}, sementara kation M^{3+} lainnya dan kation M^{2+} menempati situs oktahedral (16d) dalam susunan anion O berkemasan rapat kubik (cubic-close-packed, ccp). (48) Fe_3O_4 mengkristal dalam struktur spinel terbalik ini, yang ditandai oleh susunan anion O^{2-} yang berkemasan rapat kubik. Rumus magnetit, $Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4$, mencerminkan kisi satuannya, yang mengandung 8 kation Fe^{2+} dan 16 kation Fe^{3+}. Kation-kation ini terdistribusi secara merata antara situs tetrahedral dan oktahedral, dengan ion Fe^{3+} menempati situs tetrahedral (8a), dan baik ion Fe^{3+} maupun Fe^{2+} menempati situs oktahedral (16d). (49) Dalam proses litiasi, dua Li^+ pertama-tama akan masuk ke dalam kisi Fe_3O_4 untuk membentuk $Li_xFe_3O_4$ tanpa mengalami perubahan fasa. Dengan litiasi lebih lanjut, struktur tersebut bertransisi menjadi fasa $LiO_2 \cdot FeO$ bertipe rock-salt, dan pada akhirnya, litiasi yang berkelanjutan menghasilkan fasa nanokomposit $LiO_2 \cdot Fe$. (Ren H et al., 2024)



Gambar 3 struktur kristal magnetit

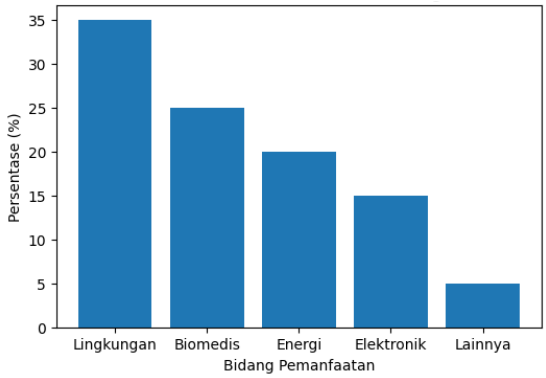
Dalam skala nano, material berbasis besi menunjukkan sifat magnetik yang unik, seperti superparamagnetisme, yang tidak ditemukan pada material bulk. Nanopartikel besi memiliki luas permukaan yang tinggi serta sifat magnetik yang dipengaruhi oleh ukuran partikel dan metode sintesis. Hal ini menjadikan nanopartikel magnetik banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, termasuk industri dan teknologi material. (Al-Anazi, 2022)

Dalam satu dekade terakhir, nanoteknologi mengalami perkembangan yang sangat pesat dan memberikan dampak signifikan di berbagai sektor. Nanoteknologi memanfaatkan partikel berukuran sangat kecil, yaitu sekitar 1–100 nm, yang dikenal sebagai nanopartikel. Karena ukurannya yang sangat kecil, nanopartikel memiliki keunggulan dibandingkan material konvensional, seperti luas permukaan yang tinggi dan sifat fisik-kimia yang unik. Salah satu jenis nanopartikel yang banyak diteliti adalah nanopartikel magnetik (magnetic nanoparticles atau MNPs), karena memiliki sifat magnetik khas serta aplikasi yang luas di berbagai bidang, termasuk medis, teknik, pertanian, energi, dan lingkungan. Selain itu, nanoteknologi juga berperan penting dalam mengatasi berbagai permasalahan global seperti pencemaran air, perubahan iklim, serta isu keamanan energi dan pangan. (Al-Anazi, 2022)

Dalam bidang lingkungan, MNPs menunjukkan potensi yang sangat besar, terutama dalam pengolahan air tanah dan air permukaan, pengolahan limbah pertanian dan industri, peningkatan kualitas air minum, serta pencegahan pencemaran. Nanopartikel ini dapat dimodifikasi agar lebih selektif dalam mengikat zat tertentu, seperti logam berat, sehingga meningkatkan efektivitas dalam proses pemurnian. (Al-Anazi, 2022)

Selain itu, MNPs juga dimanfaatkan dalam pengembangan biosensor untuk mendeteksi zat berbahaya. Dalam pengolahan limbah, MNPs mampu mengaktifkan oksidan seperti hidrogen peroksida dan menghasilkan radikal bebas yang dapat menguraikan polutan organik, sehingga efektif dalam menghilangkan zat berbahaya di air serta mengurangi kandungan logam berat dan polutan organik. Bahkan, nanopartikel berbasis besi juga dapat digunakan untuk remediasi tanah dan air tanah yang tercemar. Di bidang medis dan material, nanopartikel magnetik banyak digunakan dalam aplikasi biomedis, seperti terapi kanker melalui metode hipertermia dan pengembangan biosensor. Sifat magnetiknya memungkinkan kontrol menggunakan medan magnet, sehingga memberikan keunggulan dalam aplikasi medis yang membutuhkan presisi tinggi. (Al-Anazi, 2022)

Grafik 1. Persentase Potensi Pemanfaatan Besi Magnetit



Sifat magnetik besi juga dapat dimodifikasi melalui penambahan unsur lain ke dalam struktur material. Penelitian menunjukkan bahwa substitusi ion seperti Al^{3+} ke dalam struktur hematit (α-Fe_2O_3) dapat mempengaruhi sifat fisik dan magnetik material. Perubahan ini meliputi struktur kristal, ukuran partikel, serta sifat magnetik yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan kimia melalui doping merupakan salah satu strategi efektif dalam mengoptimalkan karakteristik material berbasis besi. (Popov N et al., 2025)

Dengan demikian, optimalisasi pemanfaatan besi dari segi kemagnetan dapat dilakukan melalui pengendalian struktur, komposisi, ukuran partikel, serta kondisi proses. Pendekatan kimia berperan penting dalam memodifikasi sifat material sehingga dapat menghasilkan karakteristik magnetik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. (Vargas-Ortiz et al., 2022)

Simpulan

Sifat magnetik besi merupakan salah satu karakteristik penting yang menentukan kebermanfaatannya dalam berbagai aplikasi teknologi. Magnetit (Fe_3O_4) menjadi material utama yang memiliki sifat magnetik kuat dan banyak dimanfaatkan dalam bidang katalisis dan energi. Sifat magnetik besi dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti struktur kristal, komposisi kimia, ukuran partikel, dan kondisi proses. Selain itu, modifikasi melalui doping dan pengembangan nanopartikel memberikan peluang besar dalam meningkatkan kinerja material. Oleh karena itu, pengendalian sifat magnetik melalui pendekatan kimia menjadi kunci utama dalam optimalisasi pemanfaatan besi untuk berbagai aplikasi teknologi di masa depan.

Daftar Pustaka

Al-Anazi, A. (2022). Iron-based magnetic nanomaterials in environmental and energy applications: A short review. Current Opinion in Chemical Engineering.

Arsyad, M., Yulianto, A., & Nugraha, D. (2018). Characterization of magnetic minerals in iron sand from river sediments. *Journal of Materials Science and Engineering*, 12(3), 145–152.

Dudchenko, N., Pawar, S., Perelshtein, I., & Fixler, D. (2022). Magnetite nanoparticles: Synthesis and applications in optics and nanophotonics.

Fidelis, R. J. A., Pires, M., Resende, D. S., et al. (2025). Magnetite: Properties and applications – A review. Journal of Magnetism and Magnetic Materials.

Gupta, A. K., & Gupta, M. (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*, 26(18), 3995–4021. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.10.012

Hasany, S. F., Ahmed, I., Rajan, J., & Rehman, A. (2012). Systematic review of the preparation techniques of iron oxide magnetic nanoparticles. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(6), 148–158. https://doi.org/10.5923/j.nn.20120206.02

Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Elst, L. V., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews*, 108(6), 2064–2110. https://doi.org/10.1021/cr068445e

Lu, A. H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(8), 1222–1244. https://doi.org/10.1002/anie.200602866

Marchán-García, J., Álvarez, M., Radivoy, G., et al. (2024). Magnetite: A green, sustainable and recyclable catalyst for direct synthesis of thioesters by C–H activation. European Journal of Organic Chemistry.

Mohapatra, M., & Anand, S. (2010). Synthesis and applications of nano-structured iron oxides/hydroxides – A review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(8), 127–146.

Popov, N., Marijan, S., & Pavic, L. (2025). Influence of Al^{3+} ions on the direct hydrothermal formation and properties of hematite (α-Fe_2O_3) nanorods. Journal of Alloys and Compounds.

Ren, H., Li, H., Barry, P., et al. (2024). Recent advances in the application of magnetite (Fe_3O_4) in lithium-ion batteries: Synthesis, electrochemical performance, and characterization techniques. Chemistry of Materials

Reddy, L. H., Arias, J. L., Nicolas, J., & Couvreur, P. (2012). Magnetic nanoparticles: Design and characterization, toxicity and biocompatibility, pharmaceutical and biomedical applications. *Chemical Reviews*, 112(11), 5818–5878. https://doi.org/10.1021/cr300068p

Singamaneni, S., Bliznyuk, V. N., Binek, C., & Tsymbal, E. Y. (2011). Magnetic nanoparticles: Recent advances in synthesis, self-assembly and applications. *Journal of Materials Chemistry*, 21(42), 16819–16845. https://doi.org/10.1039/C1JM10694E

Sun, S., & Zeng, H. (2002). Size-controlled synthesis of magnetite nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 124(28), 8204–8205. https://doi.org/10.1021/ja026501x

Takeuchi, T. (2017). Magnetic properties and applications of iron oxide materials. *Advanced Materials Research*, 1125, 45–53.

Teja, A. S., & Koh, P. Y. (2009). Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 55(1–2), 22–45. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2008.08.003

Vargas-Ortiz, J. R., Gonzalez, C., & Esquivel, K. (2022). Magnetic iron nanoparticles: Synthesis, surface enhancements, and biological challenges. Processes.

Wang, Y. X. J. (2011). Superparamagnetic iron oxide based MRI contrast agents: Current status of clinical application. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 1(1), 35–40. https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-4292.2011.08.03

Wu, W., He, Q., & Jiang, C. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis and surface functionalization strategies. *Nanoscale Research Letters*, 3(11), 397–415. https://doi.org/10.1007/s11671-008-9174-9

Yang, H., Liu, L., Zhang, W., et al. (2025). Magnetic iron oxide nanoparticles: An emerging threat for the environment and human health. Journal of Environmental Sciences.

Yulianto, A., Bijaksana, S., & Loeksmanto, W. (2010). Karakterisasi mineral magnetik pasir besi dari pesisir pantai Indonesia. *Jurnal Fisika Indonesia*, 14(40), 12–18.

Zhang, L., He, R., & Gu, H. C. (2006). Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles. *Applied Surface Science*, 253(5), 2611–2617. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.05.023