

Pengembangan Material Penyerap Gelombang Elektromagnetik Berbasis Barium Heksaferrit dengan Substitusi Ion Lantanum

Intan Septia Sari Lubis^{1*}, Nazaruddin Nasution², Miftahul Husnah³

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia¹

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia²

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia³



Email Korespondensi: intan0705223028@uinsu.ac.id

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima	25-08-2026
Disetujui	18-09-2026
Diterbitkan	20-09-2026

ABSTRACT

The rapid development of wireless communication technology and radar systems has encouraged an increase in the need for Radar Absorbing Material (RAM) that has high absorption capabilities. This study was conducted to examine the effect of the addition of lanthanum (La) doping on the characteristics of crystal structure, morphology, and electromagnetic wave absorption ability in $BaFe_{12-x}La_xO_{19}$ material with a concentration variation x of 0.00; 0.01; 0.03; and 0.05. Material synthesis is carried out using the Solid State Reaction method, then characterization is carried out through XRD, SEM, and VNA tests. The results of XRD analysis showed that all samples had a dominant phase of barium hexaferrite with a hexagonal crystal structure. Based on the results of SEM observations, the addition of the element La causes a change in particle size that does not show a regular pattern of increase or decrease. The measurement results using VNA showed that all samples had the ability to absorb electromagnetic waves, with the best absorption performance shown by the $BaFe_{11,99}La_{0,01}O_{19}$ sample which produced a Reflection Loss value of -21.5 dB at a frequency of 11.1 GHz with an absorption efficiency rate of 99.29%. Thus, the doping composition of La of $x = 0.01$ can be considered as the optimal composition in improving the performance of electromagnetic wave-absorbing materials.

Keywords: Barium heksaferrit; Lantanum; Solid State Reaction; Reflection Loss; Radar Absorbing Material

ABSTRAK

Perkembangan pesat teknologi komunikasi nirkabel dan sistem radar telah mendorong peningkatan kebutuhan akan Radar Absorbing Material (RAM) yang memiliki kemampuan absorpsi tinggi. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh penambahan doping lantanum (La) terhadap karakteristik struktur kristal, morfologi, dan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik pada material $BaFe_{12-x}La_xO_{19}$ dengan variasi konsentrasi x sebesar 0,00; 0,01; 0,03; dan 0,05. Sintesis material dilakukan menggunakan metode *Solid State Reaction*, kemudian karakterisasi dilakukan melalui pengujian XRD, SEM, dan VNA. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki fasa dominan barium heksaferrit dengan struktur kristal heksagonal. Berdasarkan hasil pengamatan SEM, penambahan unsur La menyebabkan perubahan ukuran partikel yang tidak menunjukkan pola kenaikan atau penurunan yang teratur. Hasil pengukuran menggunakan VNA menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki kemampuan menyerap gelombang elektromagnetik, dengan performa penyerapan terbaik ditunjukkan oleh sampel $BaFe_{11,99}La_{0,01}O_{19}$ yang menghasilkan nilai *Reflection Loss* sebesar -21,5 dB pada frekuensi 11,1 GHz dengan tingkat efisiensi penyerapan

sebesar 99,29%. Dengan demikian, komposisi doping La sebesar $x = 0,01$ dapat dianggap sebagai komposisi optimum dalam meningkatkan performa material penyerap gelombang elektromagnetik.

Kata Kunci: Barium heksaferrit; Lantanum; Reaksi Padat; Rugi Refleksi; Material Penyerap Radar

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Sari Lubis, I. S., Nasution, N., & Husnah, M. (2026). Pengembangan Material Penyerap Gelombang Elektromagnetik Berbasis Barium Heksaferrit dengan Substitusi Ion Lantanum. LANCAH: Jurnal Inovasi Dan Tren, 4(2), 557-565. <https://journal.lembagakita.com/ljit/article/view/8543>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi, radar, dan perangkat elektronik berfrekuensi tinggi menyebabkan peningkatan penggunaan gelombang elektromagnetik dalam berbagai bidang. Peningkatan intensitas gelombang elektromagnetik tersebut dapat menimbulkan permasalahan berupa interferensi elektromagnetik (*electromagnetic interference/EMI*) yang dapat mengganggu kinerja perangkat elektronik. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik (*Radar Absorbing Material* atau RAM) yang mampu mereduksi pantulan dan menyerap energi gelombang elektromagnetik secara efektif. Vinoy dan Jha (2017) menjelaskan bahwa RAM digunakan untuk mengurangi penampang radar (*radar cross section/RCS*) pada aplikasi pertahanan, sedangkan Micheli et al. (2019) menunjukkan bahwa RAM juga digunakan dalam aplikasi aerospace untuk mengurangi interferensi elektromagnetik.

Kemampuan suatu material dalam menyerap gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh karakteristik elektromagnetiknya, terutama nilai permitivitas dan permeabilitas. Permitivitas menunjukkan respons material terhadap medan listrik, sedangkan permeabilitas menggambarkan respons material terhadap medan magnet. Kombinasi kedua parameter tersebut dapat menghasilkan kesesuaian impedansi (*impedance matching*) antara material dan gelombang elektromagnetik sehingga proses penyerapan dapat berlangsung secara optimal.

Salah satu material yang banyak dikembangkan sebagai penyerap gelombang elektromagnetik adalah barium heksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$). Material ini memiliki struktur kristal heksagonal, sifat magnetik yang baik, stabilitas kimia tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta nilai magnetisasi dan anisotropi yang tinggi. Karakteristik tersebut menjadikan barium heksaferrit berpotensi digunakan sebagai material penyerap gelombang mikro. Namun, nilai koersivitas dan anisotropi magnetik yang tinggi dapat menyebabkan kemampuan absorpsi gelombang elektromagnetik belum mencapai performa optimal.

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kemampuan absorpsi barium heksaferrit adalah melalui modifikasi komposisi menggunakan doping unsur tanah jarang (*rare earth element*), seperti lantanum (La). Penambahan ion La dapat memengaruhi struktur kristal, parameter kisi, sifat magnetik, dan karakteristik dielektrik material sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa doping La pada barium heksaferrit mampu mempertahankan struktur kristal serta meningkatkan respons listrik dan sifat dielektriknya. Selain itu, penambahan La juga dilaporkan mampu meningkatkan nilai *Reflection Loss* material barium heksaferrit.

METODE

Bahan dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi timbangan digital, mortar, furnace, saringan 200 mesh, crucible, gelas ukur, kertas perkamen, spatula, botol, oven, barium karbonat (BaCO_3), besi oksida (Fe_2O_3), lantanum oksida (La_2O_3). Bahan baku tersebut merupakan prekursor yang umum digunakan dalam sintesis barium heksaferrit melalui metode solid state reaction (Pullar, 2012).

Sintesis material $\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$ diawali dengan perhitungan stoikiometri untuk menentukan massa bahan baku. Bahan kemudian ditimbang menggunakan neraca analitik dan dicampur dengan mortar porselen selama ± 1 jam hingga homogen. Campuran dikalsinasi pada suhu 600°C selama 6 jam, kemudian disinter pada suhu 1000°C selama 6 jam menggunakan *crucible* alumina. Setelah pendinginan, sampel

digerus dan diayak menggunakan mesh 200 untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Material hasil sintesis selanjutnya dikarakterisasi menggunakan SEM, XRD, dan VNA untuk mengetahui morfologi, struktur kristal, serta kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik. Metode *solid state reaction* dipilih karena sederhana, ekonomis, dan menghasilkan material dengan kristalinitas yang tinggi (Harris, 2012). Valenzuela (2012) menambahkan bahwa temperatur sintering dan waktu tahan merupakan parameter penting yang memengaruhi pertumbuhan butir dan sifat magnetik ferit.

Data hasil pengujian XRD dianalisis dengan mengidentifikasi pola difraksi yang diperoleh dan membandingkannya dengan standar fase barium heksaferrit untuk memastikan pembentukan struktur kristal $\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$. Cullity dan Stock (2014) menjelaskan bahwa analisis XRD dapat digunakan untuk menentukan struktur kristal, parameter kisi, ukuran kristalit, dan fraksi volume fase yang terbentuk. Data SEM dianalisis berdasarkan perubahan ukuran dan morfologi partikel akibat variasi konsentrasi doping La. Goldstein et al. (2017) menjelaskan bahwa SEM dapat memberikan informasi mengenai morfologi permukaan, ukuran partikel, distribusi partikel, dan tingkat aglomerasi material. Sementara itu, data VNA dianalisis melalui nilai *reflection loss* untuk menentukan kemampuan absorpsi gelombang elektromagnetik pada setiap komposisi sampel. Chen et al. (2018) menjelaskan bahwa VNA digunakan untuk mengukur parameter *scattering* (S-parameter) yang kemudian digunakan untuk menghitung permitivitas kompleks, permeabilitas kompleks, dan *reflection loss* material.

Nilai *Reflection Loss* digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan performa material penyerap gelombang elektromagnetik. Hubungan antara koefisien refleksi dan impedansi material dapat dinyatakan sebagai:

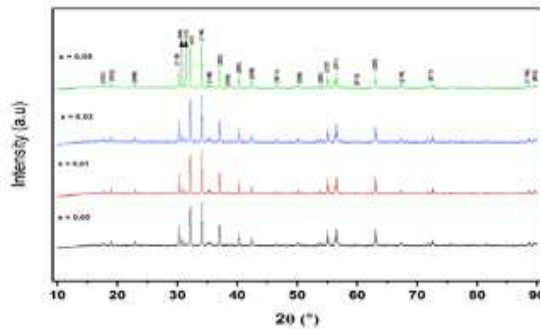
$$\text{Persentase penyerapan (\%)} = (1 - 10^{RL/20}) \times 100\%. \quad (1)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin negatif nilai *reflection loss*, semakin besar persentase gelombang elektromagnetik yang diserap oleh material (Vinoy & Jha, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Uji XRD

Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui pembentukan fasa, struktur kristal, serta pengaruh penambahan doping lantanum (La) terhadap struktur kristal barium heksaferrit. Berdasarkan hasil pengujian XRD, seluruh sampel $\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$ dengan variasi doping $x = 0,00; 0,01; 0,03; \text{ dan } 0,05$ menunjukkan terbentuknya fasa utama barium heksaferrit dengan struktur kristal heksagonal. Hal ini menunjukkan bahwa proses sintesis menggunakan metode *Solid State Reaction* berhasil menghasilkan material sesuai dengan fasa yang diharapkan. Hasil ini sejalan dengan temuan Pullar (2012) yang menunjukkan bahwa barium heksaferrit dengan struktur *magnetoplumbite* memiliki stabilitas fasa yang tinggi pada rentang temperatur sintering 1000–1200 °C.



Gambar 1 Grafik Pola Difraksi XRD

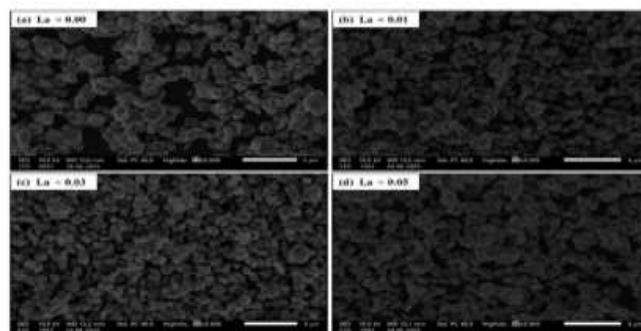
Sumber: Dokumentasi penelitian, 2026.

Puncak difraksi yang teridentifikasi antara lain bidang kristal (101), (209), (006), (110), (008), (107), (114), (108), (109), (203), (205), (206), (111), (300), (217), (211), (212), (220), (214), (317), (116), dan (403). Puncak tersebut merupakan karakteristik struktur *M-type* barium heksaferrit dengan struktur kristal heksagonal *magnetoplumbite* dan grup ruang $P6_3/mmc$. Hasil ini sesuai dengan penelitian Sözeri dan Genç (2015) yang melaporkan bahwa barium heksaferrit memiliki puncak difraksi karakteristik pada bidang (107), (114), (203), dan (205).

Tidak ditemukan fase pengotor baru dengan intensitas tinggi pada seluruh variasi doping. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan La hingga konsentrasi 5% masih mampu mempertahankan fase utama $BaFe_{12}O_{19}$. Hasil ini sejalan dengan temuan Wu dan He (2017) yang menunjukkan bahwa doping logam tanah jarang hingga konsentrasi tertentu masih dapat mempertahankan fase utama barium heksaferrit. Pergeseran kecil posisi puncak difraksi menunjukkan bahwa ion La telah berhasil masuk ke dalam kisi kristal barium heksaferrit dan menyebabkan perubahan parameter kisi akibat perbedaan ukuran ion.

Analisis Uji SEM

Karakterisasi SEM dilakukan untuk mengetahui perubahan morfologi permukaan, bentuk partikel, tingkat aglomerasi, serta distribusi ukuran partikel pada material $BaFe_{12-x}La_xO_{19}$ akibat variasi doping lantanum. Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki morfologi berupa partikel yang saling berdekatan dan membentuk agregat akibat proses sintering pada temperatur tinggi. Goldstein et al. (2017) menjelaskan bahwa aglomerasi partikel merupakan fenomena umum yang terjadi selama proses sintering pada temperatur tinggi akibat difusi atom antarpartikel.



Gambar 2 Hasil Uji SEM

Sumber: Dokumentasi penelitian, 2026.

Pada sampel tanpa doping La ($x = 0,00$), partikel menunjukkan ukuran relatif besar dengan bentuk butiran yang belum seragam. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*) selama proses sintering karena belum terdapat ion dopan yang menghambat pergerakan batas butir. Hal ini sejalan dengan penjelasan Valenzuela (2012) bahwa pertumbuhan butir pada ferit dipengaruhi oleh temperatur sintering dan keberadaan ion dopan yang dapat menghambat pergerakan batas butir.

Penambahan doping La memberikan perubahan terhadap distribusi ukuran partikel. Pada sampel La = 0,01 terjadi peningkatan ukuran partikel akibat fenomena aglomerasi yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh interaksi antarpartikel selama proses pemanasan sehingga beberapa partikel bergabung membentuk agregat.

Pada konsentrasi doping yang lebih tinggi, yaitu La = 0,03 dan La = 0,05, ukuran partikel mengalami penurunan akibat adanya efek penghambatan pertumbuhan butir (*grain boundary pinning*) oleh ion La. Berdasarkan hasil analisis SEM, sampel dengan doping La = 0,05 memiliki ukuran partikel paling kecil dengan ukuran rata-rata sekitar 6274,17 nm atau 6,274 μm . Ukuran partikel yang lebih kecil dapat meningkatkan luas permukaan aktif sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya polarisasi antarmuka (*interfacial polarization*) pada saat berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Houbi et al. (2021) menjelaskan bahwa polarisasi antarmuka merupakan salah satu mekanisme kehilangan dielektrik yang berkontribusi terhadap penyerapan gelombang elektromagnetik

Analisis Uji VNA

Karakterisasi VNA dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menyerap gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi X-band (8–12 GHz). Parameter utama yang digunakan adalah nilai *Reflection Loss* (RL), dimana semakin negatif nilai RL maka semakin baik kemampuan material dalam menyerap gelombang elektromagnetik. Chen et al. (2018) menjelaskan bahwa pengukuran pada rentang X-band banyak dilakukan karena rentang frekuensi tersebut digunakan dalam aplikasi radar dan komunikasi *wireless*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sampel mengalami penurunan nilai RL pada frekuensi sekitar 11 GHz akibat terjadinya kondisi *impedance matching* antara material dan gelombang elektromagnetik.

Data hasil pengujian VNA ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 1 Hasil Pengujian VNA $\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$

Nama Sampel	Reflection Loss (dB)	Frekuensi (GHz)	Persentase Penyerapan (%)
S1	-21,0	11,2	99,3
S2	-21,5	11,1	99,3
S3	-16,0	11,3	99,9
S4	-20,5	11,2	99,2

Sumber: Data penelitian, 2026.

Berdasarkan hasil tersebut, sampel S2 (La = 0,01) menunjukkan nilai *reflection loss* terbaik, yaitu -21,5 dB pada frekuensi 11,1 GHz. Nilai *reflection loss* sebesar -21,5 dB menunjukkan bahwa lebih dari 99% gelombang elektromagnetik yang mengenai material dapat diserap. Hasil ini sejalan dengan temuan

Cao dan Wang (2019) yang menunjukkan bahwa doping logam tanah jarang dapat meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik barium heksaferrit melalui peningkatan polarisasi antarmuka dan *impedance matching*. Nilai tersebut menunjukkan bahwa doping La sebesar 1% menghasilkan kondisi optimum dalam meningkatkan kemampuan absorpsi gelombang elektromagnetik.

Peningkatan kemampuan absorpsi pada sampel S2 berkaitan dengan keseimbangan antara sifat magnetik dan dielektrik material. Substitusi ion La menyebabkan perubahan struktur kristal, ukuran kristalit, serta meningkatkan polarisasi antarmuka yang berkontribusi terhadap mekanisme kehilangan energi elektromagnetik. Liu dan Zhang (2020) menjelaskan bahwa mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik melibatkan kehilangan magnetik (histeresis, resonansi domain wall, dan resonansi alami), kehilangan dielektrik (polarisasi dipol dan polarisasi antarmuka), serta *impedance matching* antara material dan udara. Gupta dan Srivastava (2022) menambahkan bahwa kombinasi kehilangan magnetik dan dielektrik yang seimbang dapat menghasilkan penyerapan gelombang elektromagnetik yang lebih efektif.

Pada sampel dengan doping lebih tinggi ($\text{La} = 0,05$), nilai RL kembali mengalami penurunan performa menjadi -20,5 dB. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat konsentrasi optimum doping La, di mana penambahan dopan berlebih dapat menyebabkan perubahan distribusi partikel dan menurunkan kesesuaian impedansi material. Hasil ini sejalan dengan temuan Wang dan Zhang (2021) yang menunjukkan bahwa terdapat konsentrasi optimum doping logam tanah jarang untuk mencapai kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik yang maksimal.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi SEM, XRD, dan VNA menunjukkan bahwa doping lantanum mampu meningkatkan performa barium heksaferrit sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik. Komposisi optimum diperoleh pada $\text{BaFe}_{11,99}\text{La}_{0,01}\text{O}_{19}$ dengan nilai Reflection Loss sebesar -21,5 dB pada frekuensi 11,1 GHz. Hasil ini sejalan dengan temuan Zhang dan Wang (2023) yang menunjukkan bahwa barium heksaferrit berbasis komposit memiliki potensi besar untuk aplikasi RAM karena sifat magnetik dan dielektriknya yang dapat disesuaikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan doping lantanum (La) pada material barium heksaferrit ($\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$) memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur kristal, morfologi, dan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa seluruh sampel tetap mempertahankan fase utama barium heksaferrit dengan struktur kristal heksagonal, sehingga substitusi ion La tidak menyebabkan perubahan fase utama material. Hasil ini sejalan dengan temuan Pullar (2012) yang menegaskan bahwa barium heksaferrit memiliki stabilitas fasa yang tinggi. Analisis SEM menunjukkan bahwa variasi konsentrasi La memengaruhi ukuran dan distribusi partikel, di mana penambahan La menyebabkan perubahan morfologi akibat proses aglomerasi dan penghambatan pertumbuhan butir.

Hasil pengujian menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki kemampuan dalam menyerap gelombang elektromagnetik. Performa penyerapan terbaik diperoleh pada sampel $\text{BaFe}_{11,99}\text{La}_{0,01}\text{O}_{19}$ dengan nilai *Reflection Loss* sebesar -21,5 dB pada frekuensi 11,1 GHz dan efisiensi penyerapan sebesar 99,29%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi doping La sebesar $x = 0,01$ merupakan komposisi optimum dalam meningkatkan kemampuan absorpsi gelombang elektromagnetik pada material barium heksaferrit. Dengan demikian, material $\text{BaFe}_{12-x}\text{La}_x\text{O}_{19}$ berpotensi

dikembangkan sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik (*Radar Absorbing Material*/RAM) untuk aplikasi teknologi komunikasi, perangkat elektronik frekuensi tinggi, dan bidang pertahanan. Vinoy dan Jha (2017) menjelaskan bahwa RAM digunakan untuk mengurangi penampang radar (*radar cross section*/RCS) pada aplikasi pertahanan, sedangkan Micheli et al. (2019) menunjukkan bahwa RAM juga digunakan dalam aplikasi aerospace.

Berdasarkan hasil penelitian ini, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan optimasi lebih lanjut terhadap variasi konsentrasi doping La, temperatur sintering, serta ketebalan material agar diperoleh kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik yang lebih tinggi dan rentang frekuensi kerja yang lebih luas. Bagi peneliti selanjutnya di bidang material magnetik, disarankan untuk melakukan pengembangan menggunakan kombinasi doping unsur tanah jarang lainnya atau material komposit untuk meningkatkan sifat magnetik dan dielektrik barium heksaferrit. Zhang dan Wang (2023) menunjukkan bahwa barium heksaferrit berbasis komposit memiliki potensi besar untuk aplikasi RAM. Selain itu, pengujian lanjutan seperti pengukuran sifat magnetik dan analisis impedansi kompleks dapat dilakukan untuk memahami lebih mendalam mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik pada material hasil sintesis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aritonang, S., Hijrianisa, A., Pratita, E., Ningrum, H. S., & Pangestu, B. B. (2024). Drone berbahan komposit serat rami dengan karbon aktif-barium M-heksaferrit sebagai *radar absorbing material*. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 7(1), 35–43.
- Cao, M., & Wang, X. (2019). Electromagnetic absorption properties of barium hexaferrite. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 410–418.
- Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (2018). *Microwave electronics: Measurement and materials characterization*. Wiley.
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). *Elements of X-ray diffraction* (3rd ed.). Pearson.
- Fauzi, A., Widodo, H., & Widyanoro, D. M. (2023). Pengaruh dopan Zn pada bahan barium heksaferrit terhadap ukuran kristal dan sifat magnetik. *Jurnal Fisika*, 8(1).
- Goel, S. B. M. G. A. S. V. D. T. S. (2020). Lanthanum doped barium hexaferrite nanoparticles for enhanced microwave absorption. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1753–1758.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- Gupta, S., & Srivastava, A. (2022). Recent advances in microwave absorbing materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(15), 5678–5702.
- Harris, V. G. (2012). Modern microwave ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(3), 1075–1104.
- Hendri, Abdulla, B., & Tahir, D. (2018). Karakterisasi material penyerap gelombang elektromagnetik berbasis tembaga karbon (CuC). *Jurnal Fisika Flux*, 15(2), 84–89.
- Houbi, A., Aldashevich, Z. A., Atassi, Y., Telmanovna, Z. B., Saule, M. K., & Kubanych, K. (2021). Microwave absorbing properties of ferrites and their composites: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 529, 167839.
- Liu, J., & Zhang, Y. (2020). Recent progress in microwave absorbing materials. *Carbon*, 158, 319–336.
- Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., & Marchetti, M. (2019). Radar absorbing materials for aerospace

- applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 105, 1–29.
- Özgür, Ü., Alivov, Y., & Morkoç, H. (2009). Microwave ferrites, part 1: Fundamental properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 20(9), 789–834.
- Pullar, R. C. (2012). Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 57(7), 1191–1334.
- Rizaldy, R., Saptari, S. A., & Adi, W. A. (2019). Sintesis dan karakterisasi barium heksaferrit dengan variasi pengurangan massa Fe₂O₃. *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, 1(2), 61–66. <https://doi.org/10.15408/fiziya.v1i2.9504>
- Siswoyo, S. W., Winatapura, D. S., & Sukirman, E. (2017). Pengaruh penambahan aditif Bi₂O₃ terhadap karakteristik barium heksaferrit hasil sintesis dengan metode sol-gel. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 39(2), 61. <https://doi.org/10.24817/jkk.v39i2.2793>
- Sözeri, H., & Genç, F. (2015). Magnetic and microwave absorption properties of BaFe₁₂O₁₉ nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 643, 201–207.
- Taryana, Y., Manaf, A., Sudrajat, N., & Wahyu, Y. (2019). Material penyerap gelombang elektromagnetik jangkauan frekuensi radar. *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, 19(1).
- Triya, D. S., Kusumawati, H., Fitriana, & Taryana, Y. (2025). Pengaruh penambahan *reduced graphene oxide* (rGO) dalam komposit Fe₃O₄/rGO sebagai penyerap gelombang radar dalam rentang X-band. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 14, 361–368.
- Valenzuela, R. (2012). Novel applications of ferrites. *Physics Research International*, 2012, Article 591839.
- Vinoy, K. J., & Jha, R. M. (2017). *Radar absorbing materials: From theory to design and characterization*. Springer.
- Wahyuni, L. N., Widyastuti, W., & Fajarin, R. (2016). Pengaruh jumlah lapisan terhadap *reflection loss* pada komposit barium heksaferrit/polianilin sebagai RAM (*radar absorbing material*). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17725>
- Wandira, I. (2018). Material absorber gelombang elektromagnetik berbasis (La_{0.8}Ba_{0.2})(Mn_(1-x)Zn_xFe_{(1-x)/2})O₃ (x = 0–0.6). *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 6(1).
- Wang, G., & Zhang, L. (2021). Microwave absorption performance of doped barium hexaferrite. *Ceramics International*, 47(5), 6543–6550.
- Wu, M., & He, H. (2017). Effect of rare earth doping on the electromagnetic properties of barium hexaferrite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 432, 154–160.
- Yusro, K., & Zainuri, M. (2016). Karakterisasi material penyerap gelombang radar berbahan dasar karbon aktif kulit. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 5(2), 1–4.
- Zhang, X., & Wang, Y. (2023). Barium hexaferrite-based composites for electromagnetic wave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 252, 110512.