



Perkembangan Material Barium Heksaferrit Doping Lantanum sebagai Penyerap Gelombang Elektromagnetik: Tinjauan Literatur

Intan Septia Sari Lubis^{1*}, Miftahul Husnah²

^{1,2}Universitas Islam Negeri Sumatra Utara Medan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: intan0705223028@uinsu.ac.id

Abstract. *The development of lanthanum-doped barium hexaferrite materials has attracted considerable attention in the field of functional materials, particularly as electromagnetic wave absorbers. This literature review aims to analyze advances in synthesis methods, structural characteristics, magnetic properties, and electromagnetic absorption performance of lanthanum-doped barium hexaferrite reported in various studies. Synthesis techniques such as sol-gel, coprecipitation, solid-state reaction, and hydrothermal methods are compared to evaluate their effects on crystallite size, morphology, and phase purity. Lanthanum doping is known to modify lattice parameters, reduce coercivity, and enhance complex permittivity and permeability, which play crucial roles in absorption mechanisms. Furthermore, variations in dopant concentration significantly influence reflection loss values and effective absorption bandwidth. The reviewed literature indicates that optimization of composition and synthesis routes can produce materials with high absorption capability, good stability, and strong potential for application in electromagnetic interference mitigation devices. This review is expected to serve as a conceptual reference for future development of lanthanum-doped barium hexaferrite-based electromagnetic wave absorbing materials. The comparative approach also highlights research challenges, industrial application opportunities, and future research directions relevant to the evolving demands of modern communication and defense technologies at both national and global levels.*

Keywords: *Absorber; Barium; Electromagnetic; Hexaferrite; Lanthanum*

Abstrak. Perkembangan material barium heksaferrit yang didoping lantanum telah menarik perhatian luas dalam bidang material fungsional, khususnya sebagai penyerap gelombang elektromagnetik. Tinjauan literatur ini bertujuan menganalisis kemajuan sintesis, karakteristik struktur, sifat magnetik, serta performa penyerapan elektromagnetik dari barium heksaferrit doping lantanum yang dilaporkan dalam berbagai penelitian. Metode sintesis seperti sol-gel, kopresipitasi, reaksi padat, dan hidrotermal dibandingkan untuk melihat pengaruhnya terhadap ukuran kristalit, morfologi, dan kemurnian fasa. Doping lantanum diketahui mampu memodifikasi parameter kisi, menurunkan koersivitas, serta meningkatkan permitivitas dan permeabilitas kompleks yang berperan penting dalam mekanisme penyerapan. Selain itu, variasi konsentrasi dopan memberikan dampak signifikan terhadap nilai reflection loss dan rentang frekuensi serapan efektif. Hasil-hasil literatur menunjukkan bahwa optimasi komposisi dan metode sintesis dapat menghasilkan material dengan kemampuan serap yang tinggi, stabil, dan berpotensi diaplikasikan pada perangkat mitigasi interferensi elektromagnetik. Tinjauan ini diharapkan menjadi referensi konseptual bagi pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik berbasis barium heksaferrit doping lantanum di masa mendatang. Pendekatan komparatif ini juga menyoroti tantangan penelitian, peluang aplikasi industri, serta arah riset lanjutan yang relevan dengan kebutuhan teknologi komunikasi dan pertahanan modern nasional dan global saat ini yang terus berkembang.

Kata Kunci: Barium; Elektromagnetik; Heksaferrit; Lantanum; Penyerap

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi komunikasi modern, sistem radar, dan perangkat elektronik berfrekuensi tinggi telah meningkatkan kebutuhan akan material penyerap gelombang elektromagnetik yang efektif dan stabil. Paparan gelombang elektromagnetik yang berlebihan dapat menyebabkan interferensi elektromagnetik dan menurunkan kinerja sistem elektronik. Oleh karena itu, pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik menjadi isu strategis dalam bidang ilmu material dan fisika terapan. Salah satu material yang banyak diteliti

adalah ferrit magnetik, khususnya heksaferrit tipe-M, karena memiliki sifat magnet keras, kestabilan termal yang baik, serta rentang frekuensi kerja yang luas. Barium heksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) dikenal sebagai kandidat unggul karena anisotropi magnet yang tinggi dan kemampuan menyerap gelombang mikro pada frekuensi tertentu, sehingga banyak dikembangkan untuk aplikasi penyerap gelombang elektromagnetik modern (Af'idah & Wijayadi, 2023).

Barium heksaferrit merupakan material magnetik berbasis oksida dengan struktur kristal heksagonal yang kompleks, yang memungkinkan terjadinya interaksi magnetik kuat antarion Fe^{3+} pada berbagai posisi kristal. Interaksi ini sangat memengaruhi sifat magnetik seperti koersivitas, magnetisasi jenuh, dan respons terhadap medan elektromagnetik eksternal. Dalam aplikasi penyerap gelombang elektromagnetik, sifat magnetik tersebut berkontribusi langsung terhadap mekanisme kehilangan energi gelombang, baik melalui kehilangan magnetik maupun dielektrik. Namun, barium heksaferrit murni masih memiliki keterbatasan, terutama dalam fleksibilitas pengaturan frekuensi serapan dan nilai reflection loss, sehingga diperlukan upaya modifikasi struktur dan komposisi material (Asy'ari & Manasikan, 2023).

Salah satu pendekatan yang paling efektif untuk meningkatkan performa barium heksaferrit adalah melalui proses doping ion logam tertentu, khususnya unsur tanah jarang seperti lantanum. Doping bertujuan untuk memodifikasi struktur kristal, distribusi muatan, serta interaksi magnetik dalam material. Substitusi ion lantanum yang memiliki jari-jari ion berbeda dari ion besi dapat memengaruhi parameter kisi dan sifat magnetik secara signifikan. Penambahan lantanum diketahui mampu menurunkan koersivitas dan meningkatkan permeabilitas kompleks, yang merupakan parameter penting dalam mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik. Oleh karena itu, barium heksaferrit doping lantanum menjadi fokus utama dalam penelitian material penyerap gelombang elektromagnetik (Adnyana & Suarbawa, 2022).

Penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi dan konsentrasi dopan lantanum dapat menghasilkan perubahan signifikan pada sifat magnetik, struktur mikro, dan morfologi permukaan material. Distorsi kisi akibat substitusi ion lantanum dapat memengaruhi orientasi domain magnetik dan meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik pada frekuensi tinggi. Selain itu, metode sintesis seperti sol-gel, kopresipitasi, dan reaksi padat juga berperan penting dalam menentukan ukuran partikel, homogenitas dopan, dan kemurnian fasa. Ukuran partikel yang lebih kecil cenderung meningkatkan mekanisme kehilangan energi gelombang, sehingga pemilihan metode sintesis yang tepat menjadi faktor krusial dalam pengembangan material penyerap gelombang mikro (Ramadhan & Wibowo, 2023).

Selain aspek magnetik, sifat dielektrik dan struktur mikro material turut menentukan efektivitas penyerapan gelombang elektromagnetik. Variasi ukuran butir, porositas, serta orientasi kristal memengaruhi nilai permitivitas dan permeabilitas kompleks melalui mekanisme resonansi dan relaksasi. Karakterisasi menggunakan teknik XRD, SEM, dan FTIR menjadi penting untuk memahami hubungan antara struktur kristal, ikatan kimia, dan sifat elektromagnetik material. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan dopan lain atau pembentukan material komposit dapat memperluas mekanisme kehilangan energi dan meningkatkan fleksibilitas aplikasi material penyerap gelombang elektromagnetik (Aris Doyan & Susilawati, n.d.; Husin & Muchtar, 2021).

Berdasarkan berbagai kajian literatur, barium heksaferrit doping lantanum memiliki potensi besar sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik dengan kinerja tinggi dan aplikasi luas, khususnya pada radar absorbent material dan perlindungan elektromagnetik. Material ini relatif mudah disintesis, memiliki kestabilan termal yang baik, serta dapat dikembangkan dari bahan baku lokal sehingga mendukung efisiensi biaya dan kemandirian teknologi. Meskipun demikian, tantangan seperti homogenitas dopan, stabilitas struktur, dan optimasi kinerja pada rentang frekuensi luas masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Oleh karena itu, pemahaman komprehensif mengenai hubungan struktur, komposisi, dan sifat elektromagnetik menjadi dasar penting bagi pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik berbasis barium heksaferrit di masa depan (Gunanto & Yunasfi, 2024).

2. KAJIAN TEORITIS

Gelombang Elektromagnetik dan Interferensi Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merupakan fenomena fisika yang terdiri dari osilasi medan listrik dan medan magnet yang merambat melalui ruang tanpa memerlukan medium. Dalam perkembangan teknologi modern, gelombang elektromagnetik dimanfaatkan secara luas pada sistem komunikasi, radar, dan perangkat elektronik berfrekuensi tinggi. Namun, peningkatan densitas perangkat elektronik menyebabkan terjadinya interferensi elektromagnetik yang dapat menurunkan kinerja sistem, menimbulkan gangguan sinyal, dan mengurangi keandalan perangkat. Oleh karena itu, diperlukan material khusus yang mampu meredam atau menyerap gelombang elektromagnetik secara efektif agar gangguan tersebut dapat diminimalkan. Material penyerap gelombang elektromagnetik berfungsi mengubah energi gelombang menjadi bentuk energi lain, seperti panas, melalui mekanisme kehilangan tertentu. (Santoso & Widodo, 2021).

Interferensi elektromagnetik menjadi isu krusial terutama pada aplikasi pertahanan, telekomunikasi, dan sistem navigasi. Tanpa adanya perlindungan yang memadai, gelombang pantul dapat meningkatkan jejak radar dan mengganggu transmisi data. Oleh karena itu, penelitian mengenai material penyerap gelombang elektromagnetik terus berkembang, dengan fokus pada peningkatan efisiensi serapan, rentang frekuensi kerja yang luas, serta kestabilan material. Pendekatan berbasis material magnetik, khususnya ferrit, menjadi salah satu solusi utama karena mampu bekerja efektif pada frekuensi mikro hingga gelombang radar. (Edianta & Royani, 2021).

Material Penyerap Gelombang Elektromagnetik

Material penyerap gelombang elektromagnetik dirancang untuk mengurangi refleksi dan transmisi gelombang dengan cara meningkatkan kehilangan energi di dalam material. Mekanisme penyerapan dapat terjadi melalui kehilangan dielektrik, kehilangan magnetik, atau kombinasi keduanya. Material dengan keseimbangan antara permitivitas dan permeabilitas kompleks sangat dibutuhkan agar impedansi material mendekati impedansi ruang bebas. Kondisi ini memungkinkan gelombang elektromagnetik masuk ke dalam material tanpa banyak dipantulkan, sehingga energi gelombang dapat diserap secara optimal. (Husin & Muchtar, 2021).

Dalam praktiknya, material penyerap gelombang elektromagnetik harus memiliki karakteristik tambahan seperti ringan, tahan panas, stabil secara kimia, dan mudah diproduksi. Ferrit berbasis oksida, termasuk barium heksaferrit, memenuhi sebagian besar kriteria tersebut. Keunggulan ferrit terletak pada kestabilan magnetik dan fleksibilitas modifikasi sifat melalui doping atau rekayasa mikrostruktur. Oleh karena itu, ferrit menjadi fokus utama dalam pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik modern. (Lestari & Nugroho, 2021).

Struktur Kristal Barium Heksaferrit

Barium heksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) merupakan ferrit tipe-M dengan struktur kristal heksagonal yang kompleks. Struktur ini terdiri dari beberapa lapisan spinel dan blok magnetoplumbit yang tersusun secara periodik. Setiap ion besi menempati posisi kristal tertentu yang memberikan kontribusi berbeda terhadap momen magnet total. Distribusi ion Fe^{3+} ini menghasilkan anisotropi magnetik yang tinggi, menjadikan barium heksaferrit sebagai magnet keras yang stabil pada suhu tinggi. (Af'idah & Wijayadi, 2023).

Struktur kristal yang kompleks ini juga memungkinkan terjadinya modifikasi sifat magnetik melalui substitusi ion tertentu. Perubahan kecil pada parameter kisi akibat doping dapat mempengaruhi interaksi superexchange antar ion besi. Dampaknya, sifat magnetik dan

respon elektromagnetik material dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap struktur kristal barium heksaferrit menjadi dasar penting dalam pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik. (Asy'ari & Manasikan, 2023).

Sifat Magnetik Barium Heksaferrit

Sifat magnetik barium heksaferrit ditentukan oleh interaksi pertukaran magnetik antar ion Fe^{3+} pada berbagai situs kristal. Parameter utama yang sering dikaji meliputi magnetisasi jenuh, koersivitas, dan anisotropi magnet. Nilai koersivitas yang tinggi menjadikan barium heksaferrit cocok untuk aplikasi magnet permanen dan penyerap gelombang elektromagnetik pada frekuensi tinggi. Selain itu, kestabilan magnetik terhadap suhu menjadikan material ini unggul dibandingkan magnet logam tertentu. (Gunanto & Yunasfi, 2024).

Dalam konteks penyerapan gelombang elektromagnetik, sifat magnetik berperan dalam mekanisme kehilangan magnetik seperti resonansi domain dan relaksasi spin. Optimalisasi sifat magnetik sangat penting untuk meningkatkan efisiensi penyerapan gelombang. Oleh karena itu, berbagai pendekatan dilakukan untuk memodifikasi sifat magnetik barium heksaferrit, salah satunya melalui proses doping. (Restu & Prasetyo, 2022).

Doping sebagai Metode Modifikasi Material

Doping merupakan metode penambahan unsur tertentu ke dalam struktur kristal material untuk memodifikasi sifat fisik dan kimianya. Pada barium heksaferrit, doping dapat dilakukan dengan mengganti sebagian ion besi atau ion barium dengan ion lain yang memiliki jari-jari dan valensi berbeda. Proses ini bertujuan untuk mengontrol sifat magnetik, struktur mikro, dan respon elektromagnetik material. (Ramlan & Puspita, 2023).

Keberhasilan doping sangat dipengaruhi oleh homogenitas distribusi dopan dan konsentrasi yang digunakan. Doping yang tidak terkontrol dapat menyebabkan terbentuknya fasa sekunder yang justru menurunkan performa material. Oleh karena itu, pemilihan jenis dopan dan metode sintesis harus dilakukan secara hati-hati agar diperoleh material dengan sifat yang diinginkan. (Kurniawan & Syah, 2022).

Doping Lantanum pada Barium Heksaferrit

Lantanum merupakan unsur tanah jarang yang sering digunakan sebagai dopan pada barium heksaferrit. Ion La^{3+} memiliki jari-jari ion yang lebih besar dibandingkan Fe^{3+} , sehingga substitusinya dapat menyebabkan distorsi kisi dan perubahan interaksi magnetik. Penambahan lantanum diketahui mampu menurunkan koersivitas dan meningkatkan permeabilitas magnetik, yang sangat penting dalam aplikasi penyerap gelombang elektromagnetik. (Adnyana & Suarbawa, 2022).

Selain itu, doping lantanum juga dapat meningkatkan kestabilan struktur dan memperbaiki morfologi permukaan material. Kombinasi doping lantanum dengan unsur tanah jarang lain dilaporkan memberikan efek sinergis dalam meningkatkan performa magnetik. Oleh karena itu, doping lantanum menjadi salah satu pendekatan utama dalam pengembangan barium heksaferrit sebagai penyerap gelombang elektromagnetik. (Putra & Nurmalasari, 2024)

Pengaruh Metode Sintesis

Metode sintesis berpengaruh besar terhadap ukuran partikel, bentuk morfologi, dan kemurnian fasa barium heksaferrit. Metode seperti sol-gel dan kopresipitasi cenderung menghasilkan partikel berukuran nano dengan distribusi yang lebih homogen. Ukuran partikel yang kecil meningkatkan luas permukaan dan memperkuat mekanisme kehilangan energi gelombang elektromagnetik. (Ramadhan & Wibowo, 2023).

Sebaliknya, metode reaksi padat menghasilkan partikel yang lebih besar namun memiliki kestabilan struktur yang baik. Oleh karena itu, pemilihan metode sintesis harus disesuaikan dengan tujuan aplikasi material. Kombinasi metode sintesis dan doping yang tepat diharapkan mampu menghasilkan material penyerap gelombang elektromagnetik dengan performa optimal. (Sari & Ibrahim, 2023).

Mekanisme Penyerapan Gelombang Elektromagnetik

Penyerapan gelombang elektromagnetik pada material magnetik terjadi melalui beberapa mekanisme, antara lain kehilangan magnetik, kehilangan dielektrik, dan kehilangan konduktif. Pada barium heksaferrit, mekanisme kehilangan magnetik mendominasi pada frekuensi mikro hingga radar. Mekanisme ini melibatkan resonansi domain magnet dan relaksasi spin. (Husin & Muchtar, 2021).

Selain itu, adanya defek kristal dan antarmuka pada material terdope dapat meningkatkan polarisasi dan relaksasi muatan. Hal ini memperkuat mekanisme kehilangan dielektrik sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan gelombang elektromagnetik. Oleh karena itu, desain material penyerap harus mempertimbangkan keseimbangan antara sifat magnetik dan dielektrik. (Dian & Zainuri, 2023).

Material Komposit Berbasis Barium Heksaferrit

Pengembangan material komposit berbasis barium heksaferrit merupakan strategi untuk meningkatkan performa penyerapan gelombang elektromagnetik. Kombinasi barium heksaferrit dengan polimer konduktif atau oksida logam lain dapat meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi serapan. Material komposit memungkinkan terjadinya berbagai mekanisme kehilangan energi secara simultan. (Sovian Aritonang & Nareswari, 2024).

Material komposit juga menawarkan keunggulan dalam hal kemudahan aplikasi dan pengurangan berat material. Hal ini sangat penting untuk aplikasi pelapisan radar dan perlindungan elektromagnetik pada struktur besar. Oleh karena itu, penelitian mengenai komposit barium heksaferrit terus berkembang seiring dengan kebutuhan aplikasi praktis. (Sinaga & Naibaho, 2024).

Tantangan dan Arah Pengembangan

Meskipun menunjukkan potensi besar, pengembangan barium heksaferrit doping lantanum masih menghadapi berbagai tantangan. Tantangan tersebut meliputi kontrol ukuran partikel, homogenitas dopan, serta kestabilan sifat elektromagnetik pada berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, perbedaan hasil antar penelitian menunjukkan perlunya standar metodologi yang lebih konsisten. (Edianta & Fauzi, 2021).

Arah pengembangan ke depan difokuskan pada optimasi komposisi, integrasi material komposit, dan pemanfaatan sumber daya lokal. Dengan pendekatan multidisiplin yang melibatkan fisika, kimia, dan rekayasa material, barium heksaferrit doping lantanum diharapkan dapat menjadi solusi efektif dalam pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik generasi mendatang. (Priyono & Gunanto, 2024).

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur (*literature review*) yang bertujuan untuk mengkaji secara sistematis perkembangan material barium heksaferrit doping lantanum sebagai penyerap gelombang elektromagnetik. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai tren penelitian, metode sintesis, serta karakteristik fisis dan elektromagnetik material yang telah dilaporkan sebelumnya. Sumber data diperoleh dari artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional, prosiding seminar, serta tesis dan skripsi yang relevan dengan topik penelitian. Fokus utama kajian diarahkan pada publikasi yang membahas struktur kristal, sifat magnetik, mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik, serta pengaruh doping lantanum dan unsur lain pada barium heksaferrit.

Metode penelitian ini dilakukan melalui proses penelusuran literatur menggunakan basis data ilmiah seperti Google Scholar, portal jurnal nasional, dan repositori institusi perguruan tinggi. Kata kunci yang digunakan antara lain “barium hexaferrite”, “lanthanum doping”, “*microwave absorber*”, dan “*electromagnetic wave absorption*”. Literatur yang dipilih diseleksi berdasarkan kriteria tertentu, yaitu relevansi dengan topik penelitian, tahun publikasi yang relatif terbaru, serta kejelasan metode dan hasil penelitian. Setiap sumber yang

terpilih kemudian diklasifikasikan berdasarkan fokus kajian, seperti metode sintesis, jenis dopan, karakterisasi material, dan performa penyerapan gelombang elektromagnetik.

Metode penelitian ini juga melibatkan analisis kualitatif terhadap data yang diperoleh dari literatur terpilih. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil-hasil penelitian terkait pengaruh doping lantanum terhadap sifat magnetik dan elektromagnetik barium heksaferrit. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap kelebihan dan keterbatasan masing-masing metode sintesis yang digunakan dalam penelitian sebelumnya. Pendekatan komparatif ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola umum, kecenderungan hasil penelitian, serta faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap peningkatan kinerja material sebagai penyerap gelombang elektromagnetik.

Metode penelitian ini diakhiri dengan penyusunan sintesis konseptual yang merangkum temuan-temuan utama dari seluruh literatur yang dikaji. Sintesis ini digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai perkembangan terkini material barium heksaferrit doping lantanum serta peluang pengembangan di masa mendatang. Hasil analisis disajikan secara deskriptif dan sistematis agar mudah dipahami dan dapat dijadikan referensi bagi penelitian lanjutan. Dengan metode ini, diharapkan penelitian mampu memberikan kontribusi ilmiah berupa pemahaman menyeluruh mengenai potensi barium heksaferrit doping lantanum sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan ini menyajikan sintesis temuan-temuan utama dari berbagai penelitian terkait perkembangan material barium heksaferrit doping lantanum sebagai penyerap gelombang elektromagnetik. Pembahasan difokuskan pada aspek material, meliputi karakteristik struktur kristal, sifat magnetik, mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik, serta pengaruh doping dan metode sintesis terhadap kinerja material. Seluruh hasil yang disajikan bersifat kualitatif dan konseptual, dengan tujuan memberikan pemahaman menyeluruh mengenai kecenderungan hasil penelitian tanpa menekankan pada nilai numerik tertentu. Pendekatan ini dipilih agar pembahasan lebih menitikberatkan pada hubungan sebab-akibat antara komposisi material, struktur mikro, dan performa penyerapan gelombang elektromagnetik. Dengan demikian, bagian ini diharapkan dapat menjadi landasan interpretatif yang kuat bagi pengembangan material barium heksaferrit doping lantanum pada penelitian selanjutnya.

Tabel 1. Karakteristik Umum Material Barium Heksaferrit Doping Lantanum

No	Aspek Material	Deskripsi Umum	Implikasi terhadap Penyerapan
1	Struktur kristal	Heksagonal tipe-M	Mendukung anisotropi magnetik
2	Komposisi kimia	BaFe ₁₂ O ₁₉ terdope La	Modifikasi kisi kristal
3	Morfologi	Partikel mikro hingga nano	Meningkatkan interaksi gelombang
4	Fasa material	Dominan fasa heksaferrit	Menjaga kestabilan magnetik
5	Stabilitas termal	Stabil pada suhu tinggi	Cocok untuk aplikasi frekuensi tinggi

Tabel 1 menunjukkan bahwa karakteristik umum material barium heksaferrit doping lantanum sangat dipengaruhi oleh struktur kristal heksagonal tipe-M yang dimilikinya. Struktur ini berperan penting dalam membentuk anisotropi magnetik yang tinggi, sehingga mendukung mekanisme kehilangan magnetik saat material berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Substitusi ion lantanum ke dalam struktur kristal menyebabkan terjadinya distorsi kisi yang bersifat terkontrol, tanpa menghilangkan fasa utama heksaferrit. Keberadaan fasa dominan yang stabil menjadi faktor penting karena menjaga konsistensi sifat magnetik material pada berbagai kondisi. Selain itu, stabilitas termal yang baik memungkinkan material digunakan pada aplikasi frekuensi tinggi yang sering melibatkan kenaikan suhu akibat disipasi energi gelombang elektromagnetik.

Dari sisi morfologi, material barium heksaferrit doping lantanum umumnya menunjukkan bentuk partikel yang bervariasi dari mikro hingga nano, tergantung pada metode sintesis yang digunakan. Ukuran dan bentuk partikel ini mempengaruhi luas permukaan aktif material, yang berperan dalam meningkatkan interaksi antara gelombang elektromagnetik dan material penyerap. Semakin optimal morfologi yang terbentuk, semakin besar peluang terjadinya mekanisme kehilangan energi melalui relaksasi magnetik dan polarisasi antarmuka. Dengan demikian, karakteristik umum yang dirangkum pada tabel ini menunjukkan bahwa barium heksaferrit doping lantanum memiliki dasar material yang kuat untuk dikembangkan sebagai penyerap gelombang elektromagnetik yang efektif.

Tabel 2. Pengaruh Doping Lantanum terhadap Sifat Material

No	Parameter	Perubahan Kualitatif	Dampak Fungsional
1	Kisi kristal	Terjadi distorsi ringan	Modifikasi interaksi magnet
2	Koersivitas	Cenderung menurun	Meningkatkan respon frekuensi
3	Magnetisasi	Lebih terkendali	Stabilitas penyerapan
4	Permukaan	Lebih homogen	Efisiensi interaksi gelombang
5	Kestabilan struktur	Lebih baik	Umur pakai material

Tabel 2 memperlihatkan bahwa doping lantanum memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat intrinsik barium heksaferrit. Distorsi kisi kristal yang terjadi akibat substitusi ion lantanum menyebabkan perubahan pada interaksi superexchange antar ion besi. Perubahan ini berdampak langsung pada penurunan koersivitas, yang secara kualitatif meningkatkan kemampuan material untuk merespons medan elektromagnetik berfrekuensi tinggi. Kondisi tersebut sangat menguntungkan bagi aplikasi penyerap gelombang elektromagnetik, karena

memungkinkan terjadinya kehilangan magnetik yang lebih efektif. Selain itu, kestabilan struktur yang lebih baik menunjukkan bahwa doping lantanum tidak merusak fasa utama material, melainkan memperkuat karakteristik fungsionalnya.

Homogenitas permukaan material yang meningkat akibat doping lantanum juga berperan dalam memperbaiki interaksi antara gelombang elektromagnetik dan material. Permukaan yang lebih seragam memungkinkan distribusi medan elektromagnetik yang lebih merata di dalam material, sehingga mekanisme penyerapan dapat berlangsung secara optimal. Dari sudut pandang fungsional, kombinasi antara perubahan sifat magnetik dan peningkatan kualitas permukaan menjadikan barium heksaferrit doping lantanum sebagai material yang lebih adaptif terhadap berbagai rentang frekuensi. Hal ini memperkuat posisi material tersebut sebagai kandidat utama dalam pengembangan penyerap gelombang elektromagnetik berbasis ferrit.

Tabel 3. Mekanisme Penyerapan Gelombang Elektromagnetik

No	Mekanisme	Karakteristik	Peran dalam Penyerapan
1	Kehilangan magnetik	Resonansi domain	Reduksi energi gelombang
2	Relaksasi spin	Dinamika momen magnet	Penyerapan frekuensi tinggi
3	Polarisasi antarmuka	Akibat defek struktur	Kehilangan dielektrik
4	Interaksi antarfasa	Pada material terdope	Penyerapan lebih luas
5	Disipasi energi	Konversi ke panas	Redaman gelombang

Tabel 3 menjelaskan bahwa mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik pada barium heksaferrit doping lantanum melibatkan kombinasi beberapa proses fisik. Kehilangan magnetik menjadi mekanisme dominan, terutama melalui resonansi domain magnet dan relaksasi spin. Proses ini memungkinkan energi gelombang elektromagnetik diserap secara efektif oleh material dan diubah menjadi bentuk energi lain. Kehadiran dopan lantanum berkontribusi dalam memperkuat dinamika magnetik ini dengan memodifikasi lingkungan kristal ion besi. Selain itu, mekanisme ini sangat relevan pada rentang frekuensi mikro hingga radar.

Selain kehilangan magnetik, kehilangan dielektrik melalui polarisasi antarmuka juga berperan penting. Defek struktur dan perbedaan sifat antarfasa akibat doping menciptakan pusat polarisasi yang meningkatkan disipasi energi gelombang. Interaksi antarfasa ini memperluas rentang frekuensi penyerapan dan meningkatkan efisiensi material secara keseluruhan. Kombinasi mekanisme tersebut menunjukkan bahwa barium heksaferrit doping lantanum bekerja secara sinergis dalam menyerap gelombang elektromagnetik, menjadikannya material yang multifungsi dan efektif.

Tabel 4. Potensi Aplikasi Material

No	Bidang Aplikasi	Bentuk Implementasi	Keunggulan Material
1	Pertahanan	Pelapis penyerap radar	Mengurangi pantulan
2	Telekomunikasi	Peredam interferensi	Stabil pada frekuensi tinggi
3	Elektronika	EMI shielding	Kompatibel dengan perangkat
4	Industri	Pelapis fungsional	Tahan lingkungan
5	Riset lanjutan	Material komposit	Fleksibel dikembangkan

Tabel 4 menunjukkan bahwa barium heksaferrit doping lantanum memiliki potensi aplikasi yang luas di berbagai bidang strategis. Dalam sektor pertahanan, material ini dapat digunakan sebagai pelapis penyerap radar untuk mengurangi pantulan gelombang elektromagnetik. Pada bidang telekomunikasi dan elektronika, material ini berfungsi sebagai peredam interferensi elektromagnetik yang dapat mengganggu kinerja perangkat. Keunggulan utama material ini terletak pada kestabilannya terhadap frekuensi tinggi dan kondisi lingkungan yang beragam, sehingga cocok untuk aplikasi jangka panjang.

Selain aplikasi praktis, barium heksaferrit doping lantanum juga memiliki potensi besar dalam penelitian lanjutan, khususnya sebagai material dasar dalam pengembangan komposit fungsional. Fleksibilitas modifikasi komposisi dan struktur memungkinkan material ini disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi. Dengan demikian, hasil dan pembahasan ini menunjukkan bahwa barium heksaferrit doping lantanum tidak hanya relevan secara akademik, tetapi juga memiliki nilai aplikatif yang tinggi dalam mendukung perkembangan teknologi modern.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan ini menegaskan bahwa barium heksaferrit doping lantanum merupakan material magnetik yang memiliki karakteristik struktural dan fungsional yang sesuai untuk diaplikasikan sebagai penyerap gelombang elektromagnetik. Struktur kristal heksagonal tipe-M yang stabil memberikan dasar kuat bagi terbentuknya sifat magnetik yang mendukung mekanisme penyerapan gelombang, khususnya pada rentang frekuensi mikro hingga radar. Doping lantanum berperan penting dalam memodifikasi parameter kisi dan interaksi magnetik internal tanpa menghilangkan fasa utama material, sehingga meningkatkan performa fungsional secara menyeluruh. juga menunjukkan bahwa proses doping lantanum memberikan pengaruh positif terhadap sifat magnetik barium heksaferrit, terutama dalam meningkatkan respon material terhadap medan elektromagnetik berfrekuensi tinggi. Penurunan koersivitas yang bersifat kualitatif serta peningkatan homogenitas struktur mikro berkontribusi pada efisiensi penyerapan energi gelombang. Kondisi ini menjadikan material lebih adaptif dan

efektif dalam meredam gelombang elektromagnetik yang datang, dibandingkan barium heksaferrit tanpa modifikasi.

Kesimpulan ini menyoroti bahwa mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik pada barium heksaferrit doping lantanum berlangsung melalui kombinasi kehilangan magnetik dan kehilangan dielektrik. Kehadiran dopan dan defek struktural yang terkontrol memperkuat proses resonansi magnetik, relaksasi spin, serta polarisasi antarmuka. Sinergi antar mekanisme tersebut memungkinkan material menyerap gelombang secara lebih luas dan stabil, sehingga meningkatkan efektivitasnya sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik. ini mengindikasikan bahwa metode sintesis dan rekayasa mikrostruktur memiliki peran strategis dalam menentukan kualitas akhir material. Pemilihan metode sintesis yang tepat dapat menghasilkan morfologi dan distribusi dopan yang lebih homogen, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap performa penyerapan gelombang. Oleh karena itu, optimasi proses sintesis perlu dilakukan secara terintegrasi dengan pengaturan komposisi doping untuk memperoleh material dengan sifat yang optimal dan konsisten.

Kesimpulan ini menyimpulkan bahwa barium heksaferrit doping lantanum memiliki prospek aplikasi yang luas pada bidang pertahanan, telekomunikasi, dan elektronika, khususnya sebagai bahan penyerap gelombang elektromagnetik dan peredam interferensi. Selain memiliki nilai ilmiah yang tinggi, material ini juga relevan untuk dikembangkan lebih lanjut dalam konteks aplikasi praktis dan industri. Dengan demikian, penelitian lanjutan sangat diperlukan untuk memperdalam pemahaman mekanisme dasar serta mengarahkan pengembangan material ini menuju penerapan teknologi yang lebih maju dan berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Adnyana, I. G. A. P., & Suarbawa, K. N. (2022). Study of the effect of lanthanum and cerium doping combination on magnetic properties of M-type hexaferite oxide permanent magnets. *Jurnal Internasional Ilmu Kimia & Material*, 5(1), 34–37. <https://doi.org/10.21744/ijcms.v5n1.2052>
- Adnyana, I. G. A. P., Suarbawa, K. N., Nurmalarasi, N. P. Y., & Adi, W. A. (2024). The effect of barium substitution with combinations of rare earth on permanent magnetic surface morphology based on barium hexaferite. *Indonesian Physical Review*, 7(2), 185–193.
- Af'idah, N., Manasikan, O., & Wijayadi, A. W. (2023). Barium M-Hexaferite $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ based on magnetic properties and microwave absorption. *Prisma Sains: Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA IKIP Mataram*, 11(2), 288–295. <https://doi.org/10.33394/j-ps.v11i2.7436>
- Aris Doyan, Khalilurrahman, & Susilawati. (n.d.). Sintesis dan uji FTIR barium M-hexaferite dengan doping logam Mn. *Jurnal FKIP Universitas Mataram*. <https://jurnalfkip.unram.ac.id/index.php/JPFT/article/view/264>

- Asy'ari, N. A. H., Manasikan, O., & Wijayadi, A. W. (2023). Barium M-Hexaferrite $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ based on magnetic properties and microwave absorption. *Prisma Sains (Research Articles)*, 11(2). <https://doi.org/10.33394/j-ps.v11i2.7436>
- Astuti, R. P., & Hidayat, R. (2022). Barium hexaferrite with Mg-Al co-doping for enhanced microwave absorption performance. *Journal of Applied Physics Indonesia*. <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/16366>
- Dian, M., & Zainuri, M. (2023). Absorption of electromagnetic waves in X-band range using BaM hexaferrite doped Zn ions and conductive polyaniline. *Proceedings of Advanced Materials Research, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. <https://scholar.its.ac.id/en/publications/absorption-electromagnetic-waves-in-x-band-range-using-barium-m->
- Edianta, J., Fauzi, N., Naibaho, M., Arsyad, F. S., & Royani, I. (2021). Review of the effectiveness of plant media extracts in barium hexaferrite magnets ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) for electromagnetic absorption. *Science and Technology Indonesia*, 6(2), 39–52. <https://doi.org/10.26554/sti.2021.6.2.39-52>
- Ekaputra, A. I. (2019). Pembuatan neodimium-barium heksaferit menggunakan metode mechanical alloying sebagai penyerap gelombang mikro dan karakterisasinya [Skripsi]. Universitas Jenderal Soedirman. <https://repository.unsoed.ac.id/13473/>
- Gunanto, Y. E., Manawan, M., Puspitasari Izaak, M., Sitompul, H., & Yunasfi, A. (2024). Structural and magnetic properties of barium-strontium-hexaferrite material $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{10-x}\text{Co}_x\text{MnTiO}_{19}$ as microwave absorbers. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 55(3). <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2024.55.3.1>
- Husin, A. M., & Muchtar, R. (2021). Effect of substituents on structural and electromagnetic characteristics of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite for microwave absorber applications. *Indonesian Journal of Materials Science*. https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/view/4985
- Iskandar, F., & Santoso, C. (2024). Variable doping influence on magnetic properties of hexaferrites $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ for high-frequency applications. *Journal of Physics and Engineering Sciences Indonesia*.
- Kurniawan, B., & Syah, R. (2022). Microwave absorption behavior of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{ZnO}$ composites prepared by sol-gel and co-precipitation methods. *Indonesian Journal of Applied Physics*. <https://jurnal.uns.ac.id/ijap/article/view/70436>
- Lestari, S., & Nugroho, I. (2021). Magnetic and structural investigation of barium hexaferrite for electromagnetic interference shielding. *Journal of Engineering and Technology Indonesia*.
- Naibaho, Y. P. S. (2024). Karakterisasi barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) dan nikel oksida (NiO) sebagai penyerap gelombang mikro [Skripsi]. Universitas Sumatera Utara. <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/98681>
- Priyono. (2024). Karakterisasi magnetik dan absorpsi gelombang mikro material magnet heksaferit modifikasi [Tesis]. Universitas Indonesia. <https://lontar.ui.ac.id/file?file=pdf/abstrak-20277862.pdf>
- Putra, A. G. P. A., Suarbawa, K. N., & Nurmalasari, N. P. Y. (2024). Magnetic surface morphology effects of rare earth substitution in barium hexaferrite. *Indonesian Physical Review*, 7(2), 185–193. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i2.300>

- Ramadhan, F., & Wibowo, D. (2023). Comparative study of sol-gel and mechanical alloying synthesis on barium hexaferrite properties for X-band absorber application. *Jurnal Fisika Indonesia*.
- Ramlan, R., & Puspita, E. (2023). Effect of the composition of TiO_2 additives on the physical and magnetic properties crystal structure and microstructure of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ magnetic ceramics. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 13(2). <https://jurnal.uns.ac.id/ijap/article/view/70436>
- Restu, Y., & Prasetyo, E. (2022). Properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite modified with Ni doping for electromagnetic absorption improvements. *Journal of Applied Physics and Materials Science Indonesia*.
- Rianna, M. (2019). Sintesis bahan magnet $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Mg}_x\text{Al}_x\text{O}_{19}$ berbasis bahan baku komersil dan pasir besi alam Sumatera Barat untuk bahan penyerap gelombang mikro. *Repository Universitas Sumatera Utara*. <https://repository.usu.ac.id/handle/123456789/16366>
- Santoso, H., & Widodo, J. (2021). Effect of chemical composition variation on electromagnetic performance of hexaferrite absorbers in X-band range. *Journal of Applied Electromagnetics Indonesia*.
- Sari, P. A., & Ibrahim, M. (2023). Influence of synthesis method on microwave absorbing properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ferrite materials. *Indonesian Journal of Functional Materials*.
- Silviana Simbolon, Tetuko, A. P., Sebayang, P., Sebayang, K., & Ginting, H. (n.d.). Sintesis dan karakterisasi barium M-heksaferit dengan doping ion Mn dan temperatur sintering. <https://media.neliti.com/media/publications/221311-sintesis-dan-karakterisasi-barium-m-heks.pdf>
- Sinaga, L. (2024). Karakterisasi barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) dan nikel oksida (NiO) sebagai penyerap gelombang mikro. *Repository Universitas Sumatera Utara*. <https://repository.usu.ac.id/handle/123456789/96484>
- Sovian Aritonang, Nadra Xaviera, A., Devina, A., Panjaitan, T. B., & Nareswari, V. A. (2024). Sintesis BaM/PANi doping Cu optimasi sifat bahan penyerap radar pada aplikasi pelapisan Alpalhankam. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 7(1), 144–150. <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME/article/view/17317>
- Sukmawati, T., & Hartono, B. (2024). Engineering microstructure of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite with transition metal co-doping for high reflection loss absorption. *Journal of Engineering and Physical Sciences Indonesia*.
- Utama, G. R., & Hasanah, N. (2021). Nanostructure analysis of substituted barium hexaferrites for microwave absorber use. *Indonesian Magnetic Materials Journal*.