

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kemajuan terkini dalam bidang elektronik dan perangkat yang beroperasi pada frekuensi gigahertz (GHz) telah memberikan dampak positif pada kehidupan manusia, menghadirkan kenyamanan yang luar biasa. Namun di sisi lain, perkembangan ini juga menimbulkan beberapa permasalahan lingkungan yang serius. Salah satu permasalahan utamanya adalah interferensi elektromagnetik yang sering terjadi akibat kerusakan perangkat elektronik (Wang dkk., 2020). Interferensi yang diakibatkan oleh penggunaan gelombang elektromagnetik disebut dengan *Elektromagnetic Interference* (EMI), sebuah fenomena yang menjadi perhatian utama akibat pesatnya kemajuan teknologi dan meluasnya penggunaan perangkat elektronik (Jiang dkk., 2019).

Elektromagnetic interference, umumnya dikenal sebagai interferensi elektromagnetik (EMI), sangat mempengaruhi pengoperasian normal perangkat dan komponen elektronik, transmisi informasi serta kesehatan manusia (Chen dkk., 2020). Radiasi dari gelombang elektromagnetik mempunyai kemampuan menyebar ke segala arah. Peredam elektromagnetik telah digunakan untuk mengurangi jumlah radiasi elektromagnetik (Russell, 2018). Material penyerap atau peredam terjadinya EMI diperlukan untuk mengurangi gangguan yang ditimbulkan oleh malfungsi perangkat elektronik, listrik, dan telekomunikasi. Baru-baru ini, penyerapan gelombang mikro telah menarik banyak perhatian karena potensi penerapannya di bidang pelindung elektromagnetik (Elmahaishi dkk., 2022).

Keberadaan gelombang mikro yang beroperasi pada rentang frekuensi 0.3 hingga 300 GHz dengan panjang gelombang mulai dari 1m hingga 1 mm telah diidentifikasi sebagai sumber polusi berbahaya baru, yang menimbulkan ancaman signifikan bagi kesejahteraan manusia, di lain sisi teknologi gelombang mikro telah banyak digunakan dalam bidang sipil dan militer, yang meliputi komunikasi nirkabel, perawatan medis, penelitian ilmiah, dan khususnya sektor industri, yang terkait dengan keamanan nasional dan sosial (Durmus dkk., 2015).

Barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) merupakan material yang cocok untuk diaplikasikan sebagai aplikasi material penyerap gelombang mikro (Nguyen dkk., 2017). Beberapa keunggulan yang dimiliki oleh bahan magnet *ferrite* yaitu nilai koersif yang tinggi, temperatur *curie* yang tinggi, mempunyai sifat magnetisasi yang tinggi, tahan terhadap korosi, serta rendah biaya (Handoko dkk., 2018). Penelitian lain telah mengungkapkan bahwa material magnet memiliki aplikasi potensial dalam konteks militer, terutama dalam mengurangi *Radar Crosssection* (RCS) yang diperlukan untuk operasi militer. Prinsip yang sama juga telah diterapkan dalam penggunaan *microwave absorber*, yang secara luas digunakan untuk mengurangi atau menghambat pantulan gelombang elektromagnetik (Prasongko & Priyono, 2014).

Selama kurang lebih 15 tahun terakhir, pengembangan penelitian di bidang magnetik berstruktur nano telah mengalami kemajuan pesat dan menarik perhatian yang signifikan. Dari perspektif teknologi, struktur nanokomposit menampilkan sifat kimia dan fisika yang unik, sehingga sifat kemagnetannya meningkat secara signifikan (Majumder dkk., 2013). Berdasarkan struktur kristal dan sifat kimianya barium heksaferit dikategorikan atas berbagai macam tipe diantaranya; tipe M ($\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}$), tipe W ($\text{AB}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$), tipe X ($\text{A}_2\text{B}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$), tipe Y ($\text{A}_2\text{B}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$), tipe Z ($\text{A}_3\text{B}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$), dan tipe U ($\text{A}_4\text{B}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$) dimana A merupakan unsur Ba, Sr, Pb, Ca. Sedangkan B adalah kation divalen transisi seperti Ni, Co, Zn (Shinde & Dahotre, 2021). Heksaferit tipe M adalah salah satu bahan magnet permanen terbaik dan paling banyak dipelajari dalam berbagai aplikasi elektromagnetik seperti magnet permanen, media perekam magnetik, dan motor listrik karena sifat strukturalnya yang unik dan tinggi anisotropi magnetokristalin di sepanjang sumbu c dari struktur heksagonal (Durmus dkk., 2015).

Menurut pendapat Mathews & Babu (2021) dalam meninjau karakteristik serapan gelombang mikro bahan heksaferit tipe M pada pita S, X, dan Ku-band mempunyai hubungan antara kerugian magnetik dan kerugian dielektrik. Interaksi antara kerugian magnetik dan kerugian dielektrik secara signifikan memiliki dampak besar pada penyerapan gelombang mikro yang tepat. (Handoko dkk., 2018) melakukan penelitian mengenai material barium heksaferit yang telah disubstitusi

dengan Co-Zn. Material ini berhasil disintesis dengan dua metode yang berbeda, yakni *solid state reaction* dan *mechanical milling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur Barium Heksaferit $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co},\text{Zn})\text{O}_{1219}$ memiliki struktur polikristalin. Penambahan Co dan Zn pada struktur $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co},\text{Zn})\text{O}_{1219}$ secara signifikan menurunkan gaya koersif (H_c). Begitu pula dengan nilai minimum *Reflection Loss* (RL) teramati mencapai -29.98 dB pada frekuensi 10.8 GHz dengan ketebalan sampel 1 mm.

Salem dkk. (2023) melaporkan penelitian tentang sintesis Barium Heksaferit (BHF), dan Barium Titantae (BT). Keberhasilan pembentukan BHF dan BT dikonfirmasi melalui *Fourier Transform Infrared* (FTIR) *Spectroscopy* dan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD). Hasil *Vibrating Sample Magnetometry* (VSM) menunjukkan bahwa penambahan BT meningkatkan ketahanan terhadap demagnetisasi. Hal yang penting dalam penelitian ini adalah tercapainya nilai *Reflection Loss* (RL) yang signifikan sebesar -45 dB pada frekuensi 9,3 GHz untuk komposit yang mengandung 75% BHF, ini menunjukkan potensi komposit sebagai penyerap gelombang mikro yang efektif.

Berdasarkan latar belakang pembahasan diatas, maka penelitian ini berfokus pada sintesis dan karakterisasi nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ menggunakan metode *mechanicall milling*. Kelebihan metode ini adalah pengoperasiannya sangat sederhana dan ekonomis karena bahan bakunya biasanya tersedia dan murah di pasaran. Material yang dihasilkan selanjutnya akan dianalisis menggunakan mikroskop digital untuk menganalisis morfologi permukaan, *Vector Network Analyzer* (VNA) untuk menganalisis nilai serapan gelombang mikro, dan permagraph untuk menganalisis sifat kemagnetan sampel material yang telah terbentuk.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, terdapat beberapa rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana proses pembuatan nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ menggunakan metode *mechanical milling* sebagai alternatif aplikasi material penyerap gelombang mikro?
2. Bagaimana karakterisasi material nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dalam mengetahui morfologi permukaan, sifat magnetik, dan sifat serapan gelombang mikro?
3. Bagaimana karakteristik nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dengan pencampuran 0%; 5%; 10%; 15% Fe_3O_4 dan SiO_2 sebagai aplikasi material penyerap gelombang mikro?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan material nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dengan metode *mechanical milling* sebagai alternatif aplikasi penyerap gelombang mikro
2. Melakukan uji mikroskop digital untuk melihat morfologi permukaan suatu material, melakukan uji permagraph untuk mengukur sifat magnetik yang dihasilkan material, dan melakukan uji VNA untuk mengetahui seberapa besar serapan yang dihasilkan material.
3. Menganalisis karakteristik sifat magnetik, serta daya serap nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ sebagai aplikasi material penyerap gelombang mikro.

D. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

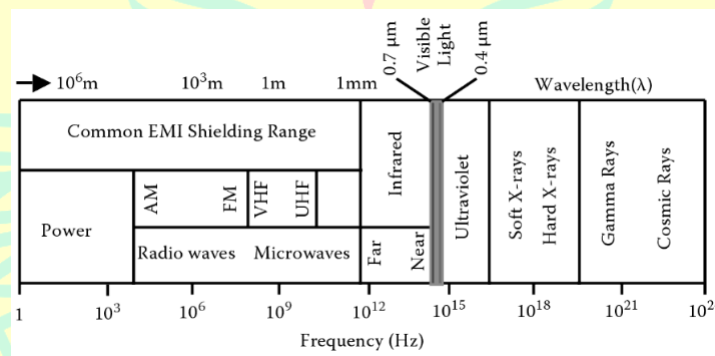
1. Dapat memberikan informasi terkait sintesis nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ sebagai aplikasi material penyerap gelombang mikro
2. Menghasilkan material penyerap gelombang mikro berbahan dasar nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ yang ketersediaan sumber daya alamnya melimpah di Indonesia.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. *Electromagnetic Interference (EMI)*

Electromagnetic Interference (EMI) adalah proses dimana energi elektromagnetik destruktif ditransmisikan dari satu perangkat elektronik ke perangkat elektronik lainnya melalui jalur radiasi dan atau konduksi. Masalah EMI mempengaruhi hampir semua sistem kelistrikan dan elektronik, mulai dari kehidupan sehari-hari, operasi militer hingga eksplorasi ruang angkasa. Secara umum, masalah EMI dapat disebabkan oleh energi elektromagnetik pada frekuensi berapa pun dalam spektrum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut (Tong, 2016).



Gambar 2.1. Spektrum elektromagnetik (sumber: Tong, 2016)

Gambar 2.1 Menunjukkan bahwa gelombang mikro berada di wilayah spektrum elektromagnetik antara radiasi infra merah dan frekuensi radio, yang terdiri dari rentang frekuensi sekitar 300 hingga 300.000 MHz. Pelindung *Electromagnetic Interference (EMI)* mengacu pada pelindung dari gelombang radio atau radiasi gelombang mikro sehingga radiasi pada dasarnya tidak dapat menembus pelindung tersebut. Pelindung EMI harus dibedakan dari pelindung magnetik. Pelindung magnetik mengacu pada pelindung medan magnet, dan biasanya menyangkut frekuensi rendah, seperti 60 Hz (Chung, 2020).

Cara terbaik untuk melindungi peralatan elektronik dari radiasi elektromagnetik adalah dengan menutupinya menggunakan bahan pelindung.

Bahan yang paling umum digunakan untuk pelindung EMI adalah logam seperti tembaga, aluminium, dan baja tahan karat (Wanasinghe & Aslani, 2019).

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai ferit, termasuk Ba, Mn, Ni, Co, Zn, γ -Fe₂O₃, dan kompositnya, telah digunakan sebagai bahan pelindung gelombang mikro karena menawarkan sifat magnetiknya yang baik, khususnya magnetisasi saturasi tinggi, nilai permeabilitas tinggi. Efektivitas pelindung material (SE) bergantung pada permeabilitas magnetik, sifat dielektrik, frekuensi, dan ketebalannya (Gairola dkk., 2016).

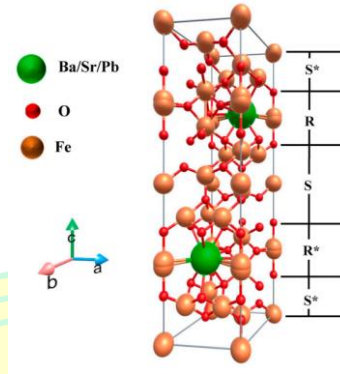
B. Barium HeksaFerit (BaFe₁₂O₁₉)

Ferit magnetik pertama kali ditemukan pada tahun 150-an oleh tim ilmuwan Belanda yang dipimpin oleh Snoek di *Laboratories Philips Eindhoven* (Pullar, 2012). Pada dasarnya ferit adalah bahan keramik, berwarna abu-abu tua atau hitam dan sangat keras serta rapuh. Ferit dapat didefinisikan sebagai bahan magnetik yang terdiri dari oksida yang mengandung ion besi sebagai penyusun utamanya (Birajdar, 2023). Barium heksaFerit (BHF) adalah bahan feromagnetik (Kumar dkk., 2018).

Heksaferit memiliki peran dalam elektronik saat ini, komunikasi seluler, nirkabel pada frekuensi GHz, pelindung EMI, multiferroik, peredam gelombang mikro, aplikasi antena, dan masih banyak lagi (Nikmanesh dkk., 2019). Baru-baru ini, barium heksaferit telah dikembangkan untuk aplikasi komunikasi dan militer (Akman dkk., 2013). Berdasarkan struktur kristal dan sifat kimianya barium heksaferit dikategorikan atas berbagai macam tipe diantaranya; tipe M (AFe₁₂O₁₉), tipe W (AB₂Fe₁₆O₂₇), tipe X (A₂B₂Fe₂₈O₄₆), tipe Y (A₂B₂Fe₁₂O₂₂), tipe Z (A₃B₂Fe₂₄O₄₁), dan tipe U (A₄B₂Fe₃₆O₆₀) dimana A merupakan unsur Ba, Sr, Pb, Ca. Sedangkan B adalah kation divalen transisi seperti Ni, Co, Zn (Shinde & Dahotre, 2021).

Sebagai magnet permanen dengan tipe M heksagonal dan kelompok P63/mmc, yang memiliki sifat kemagnetan sangat baik seperti gaya koersif yang tinggi, suhu *curie* yang tinggi, dan magnetisasi saturasi yang tinggi. Karena sifat magnetik, kimia, dan dielektriknya heksaferit tipe M (Ba, Fe₁₂O₁₉, disingkat BaM) telah menarik minat para peneliti karena memiliki nilai koersivitas tinggi sebesar

6700 Oe, magnetisasi saturasi sebesar 72 emu/g, dan suhu curie *tinggi* sebesar $T_C = 502^\circ\text{C}$ (Kaur dkk., 2015).



Gambar 2.2. Struktur barium heksaferit (sumber: Mathews & Babu, 2021)

$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dianggap sebagai salah satu bahan paling serbaguna untuk magnet keras. Selain itu, karena sifat magnetiknya yang menarik, ia juga memiliki stabilitas kimia yang sangat baik, prosedur sintesis yang mudah, biaya rendah, dan aplikasi yang luas di bidang penyerapan gelombang elektromagnetik (Anand dkk., 2020).

Struktur heksaferit tipe M ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) terdiri dari blok R dan blok S. Blok S terdiri dari dua lapisan yang terdiri dari empat atom oksigen dan tiga atom logam, dan blok R terdiri dari tiga lapisan heksagonal yang masing-masing berisi empat atom oksigen. Struktur magnet heksaferit beragam karena atom Fe atau Ba pada heksaferit tipe M dapat digantikan dengan jari-jari ionik lainnya (Beheshti & Yousefi, 2021). Sifat magnetik heksaferit tipe M ditentukan oleh bentuk dan ukuran partikel, struktur kristal, metode pembuatan, jenis dopan, pH larutan, waktu dan suhu sintering, rasio logam (M^{2+}) terhadap Fe^{3+} , serta rasio bahan bakar terhadap logam nitrat dan lain-lain (Godara dkk., 2021).

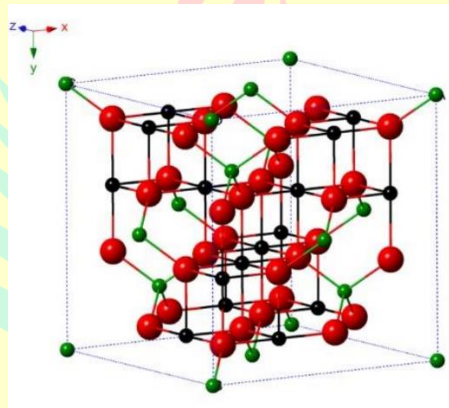
C. Nanokomposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$

1. Fe_3O_4

Istilah '*magnetit*' berasal dari kata '*magnesia*', yaitu distrik di Asia Kecil, tempat ditemukannya magnetit dalam jumlah besar. Magnetit juga sering dikenal sebagai besi (III) oksida (FeO), *maghemite* ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), *hematite* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (Ganapathe dkk., 2020). Magnetit atau *lodestone* (Fe_3O_4) adalah material magnetik

paling melimpah, alami, dan menjadi bahan yang penting dalam berbagai aplikasi teknologi dan industri. Selama dekade terakhir, nanopartikel Fe_3O_4 telah menarik perhatian para peneliti karena sifat partikelnya menawarkan beragam aplikasi. Bahan Fe_3O_4 tidak beracun dan biokompatibel, dan memiliki magnetisasi tinggi, permeabilitas kehilangan magnetik tinggi, biaya rendah, dan mudah di sintesis (Nikmah dkk., 2019).

Seperti ditunjukkan pada gambar berikut, magnetit mempunyai struktur kristal spinel *inverse* kubik yang tersusun sepanjang bidang $[1, 1, 1]$, dengan Fe^{2+} dan Fe^{3+} menempati rongga kisi oktahedral dan Fe^{3+} menempati rongga kisi tetrahedral.

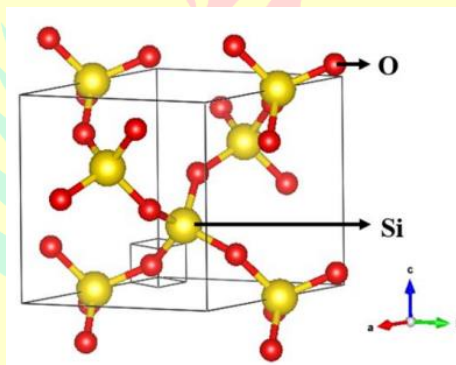


Gambar 2.3. Struktur kristal magnetit (Fe_3O_4)
(sumber: Ganapathe dkk., 2020)

Pada gambar 2.3. bola hijau adalah ion besi, bola merah adalah oksigen ion, dan bola hitam adalah ion besi. Magnetit memiliki sel satuan spinel kubik berpusat muka dengan panjang satuan $a = 0,839 \text{ nm}$, tersusun atas 32 ion O^{2-} dan susunan kompak $[1, 1, 1]$. Dilihat dari sifat fisik magnetit (Fe_3O_4), magnetit murni dalam bentuk bubuk dan larutan magnetit koloidal biasanya dibedakan berdasarkan warnanya yang hitam pekat. Saat terkena udara (oksidasi), magnetit (Fe_3O_4) teroksidasi menjadi maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), yang pada dasarnya ditandai dengan warna kecokelatan. Proses *annealing imaghemite* ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) pada suhu kurang lebih 700°C mengubah *maghemite* ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) menjadi *hematite* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) yang berwarna kemerahan (Ganapathe dkk., 2020).

2. SiO_2

Silikon dioksida, dengan rumus kimia SiO_2 , merupakan komponen dasar kaca, pasir, dan sebagian besar mineral, dan juga dianggap sebagai penyusun kerak dan mantel bumi. Isomer dengan rumus kimia SiO_2 dalam bentuk kristal dan amorf, termasuk kuarsa, kristobalit, dan SiO_2 kaca. Pada semua senyawa SiO_2 yang diketahui, Si memiliki struktur hibrid sp^3 dengan empat struktur tetrahedral (Gao dkk., 2017). Gambar 2.4 menunjukkan struktur kristal SiO_2 . Atom Si menunjukkan koordinasi tetrahedral dengan 4 atom oksigen yang mengelilingi atom Si pusat. Selain struktur amorf, SiO_2 memiliki beberapa struktur kristal (*polimorf*) yang berbeda. Umumnya silika dengan kristal *polimorf* adalah kuarsa, kristobalit, *tridimit*, *stishovite*, dan *coesite*. Silika berukuran makro memiliki struktur kristal, sedangkan silika berukuran nano memiliki struktur amorf (Nikmah dkk., 2019).



Gambar 2.4. Struktur kristal SiO_2
(sumber: Nikmah dkk., 2019)

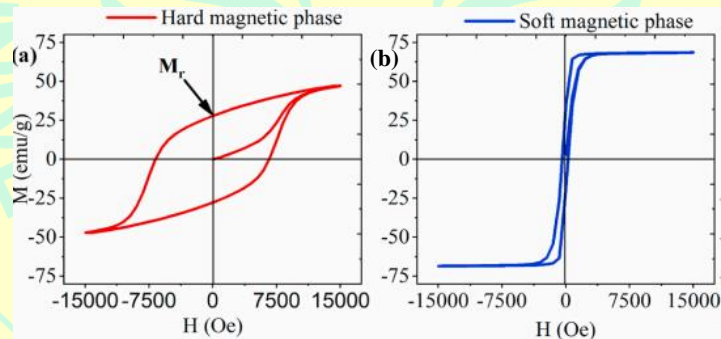
Silika juga dapat digunakan untuk memperkuat komposit polimer seperti pelapis anti korosi dan kantong plastik, elektrolit gel polimer komposit, polimer termoplastik, dan pewangi yang mudah menguap (Munasir dkk., 2015). Partikel SiO_2 murni dengan fase kristal dapat digunakan sebagai bahan baku fotovoltaik, perangkat elektronik semikonduktor, katalis, substrat film, keramik, sensor kelembaban, dan sebagainya. Sintesis partikel SiO_2 dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti deposisi uap kimia, sintesis dan pembakaran plasma, metode hidrotermal, dan pengolahan sol-gel (Joni & dkk, 2018).

3. Magnet nanokomposit

Magnet nanokomposit adalah material magnetik multi-fasa dengan ukuran rata-rata kristalit dalam orde nanometer. Dengan sifat stabilitas yang relatif baik,

nanokomposit magnet dapat dibuat dengan menggunakan ukuran fase penguat kurang dari 100 nm. Karena rasio luas permukaan terhadap volume nanokomposit yang tinggi, interaksi antara matriks dan penguat menjadi sangat tinggi. Meskipun nanokomposit mempunyai sejarah yang sangat singkat, karena sifatnya yang sangat baik menjadikannya banyak digunakan dalam banyak aplikasi. Penerapan nanokomposit dieksplorasi dengan baik di bidang teknik, plastik, karet, pelapis, perekat, material elektronik, dan material optik (Ates dkk., 2020).

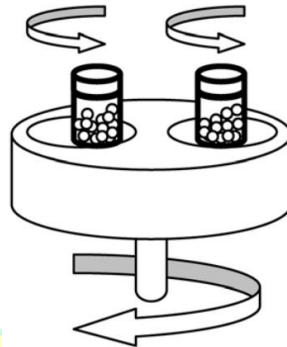
Pada sistem magnet permanen, magnet nanokomposit terdiri dari dari fasa magnetik keras dan fasa magnetik lunak. Bahan magnet lunak dengan koersivitas (H_c) kurang dari 10 kA/m memiliki *loop histeresis* yang sempit dan nilai induksi remanen yang rendah (Br). Bahan magnet keras memiliki *loop histeresis* lebar dengan gaya koersif lebih besar dari 2,5 kA/m. Ini juga menunjukkan nilai sisa induksi magnet (Br) yang tinggi dan nilai produk energi maksimum $(BH)_{maks}$ yang tinggi (Kruželák, 2019).



Gambar 2.5. Kurva histeresis
(sumber: Mathews & Babu, 2021)

Banyak penelitian telah dilakukan mengenai pengaruh substitusi ferit lantanida terhadap sifat penyerapan magnetik dan gelombang mikro. Selain itu, banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan sifat magnetik menggunakan berbagai metode sintetik, termasuk metode baru untuk membuat partikel domain tunggal berukuran nano (Jacobo dkk., 2015).

D. Metode *Mechanical Milling*



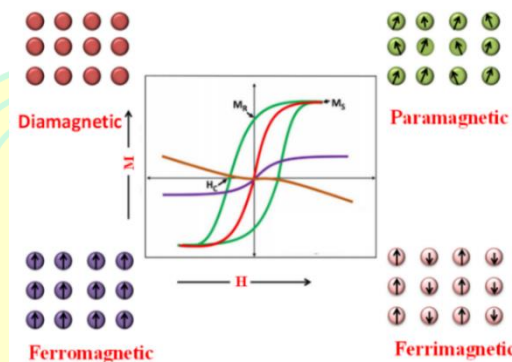
Gambar 2.6 Cara kerja *Planetary Ball Mill*
(sumber:Gorrasi & Sorrentino, 2015)

Mechanical milling telah dikenal untuk mengaktifkan reaksi kimia padat-padat dan bahkan padat-cair selama penggilingan. Selain itu, proses penggilingan mekanis dapat menghasilkan bubuk partikulat dengan ukuran nanometer (Hodaie dkk., 2015). Selama proses *mechanicall milling*, partikel bubuk campuran akan mengalami proses pengelasan dan penggilingan dingin berulang kali. Ketika bola bertunbrukan, sejumlah serbuk akan terperangkap diantara bola-bola tersebut (Fauzi, 2016). Pemanfaatan *mechanical milling* sebagai alat produksi menawarkan banyak keuntungan, termasuk kemampuan untuk menghasilkan partikel dengan ukuran yang lebih kecil tanpa menggunakan pelarut berbahaya atau suhu tinggi. Kapasitas untuk mengontrol proses degradasi, dan kemampuan untuk menghomogenkan bahan yang belum tercampur secara menyeluruh. Selain itu, metode khusus ini juga dapat digunakan untuk tujuan pengolahan limbah dan daur ulang material untuk menghasilkan komposit atau partikel baru (Sandoval & Silva, 2023).

E. Sifat Magnet Bahan

Sifat kemagnetan suatu bahan didasarkan pada momen orbital dan putaran elektron. Ketika medan magnet luar diterapkan, arus atom dihasilkan di sekitar inti karena pergerakan orbit elektron yang berlawanan. Diamagnetisme, paramagnetisme, ferromagnetisme, antiferromagnetisme, dan ferrimagnetisme adalah lima tipe dasar magnetisme (Mullick dkk., 2021).

Ada empat interaksi dasar antara medan magnet dan material untuk menentukan karakteristik sifat magnetik material, yang terbagi menjadi dua kelompok: di satu sisi bahan diamagnetik memiliki kerentanan magnetik negatif ($\chi < 0$) dan cenderung tolak-menolak antar medan magnet. Sedangkan bahan paramagnetik, supermagnetik, dan ferromagnetik mempunyai kerentanan positif ($\chi > 0$) dan cenderung tertarik oleh medan magnet (Gaeta dkk., 2021).



Gambar 2.7. Ilustrasi susunan dipol magnetik dan loop histeristis (sumber: Mullick dkk., 2021)

1. Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang sifat kemagnetannya sangat lemah, tidak permanen, dan hanya bertahan bila terkena medan magnet luar yao (Yao dkk., 2019). Diamagnetisme disebabkan oleh gerakan orbital elektron yang menciptakan putaran arus kecil, yang menghasilkan medan magnet lemah. Oleh karena itu kerentanan magnetiknya negatif dan kecil, biasanya berkisar 10^{-6} (Gaeta dkk., 2021).

2. Paramagnetik

Bahan paramagnetik terdiri dari atom-atom dengan spin elektron yang tidak berpasangan, tersusun secara acak tanpa adanya medan magnet luar. Ketika medan magnet diterapkan, momen resultan tercipta searah dengan medan magnet, dan ketika medan magnet dihilangkan, momen tersebut hilang. Bahan paramagnetik adalah bahan yang mempunyai suseptibilitas magnet positif yang sangat kecil (Vaz & Andruh, 2021). Kerentanan magnetik positif biasanya berkisar antara 10^{-5} hingga 10^{-3} . Besarnya kerentanan ini kurang dari 0,1% dari bahan ferromagnetik (Gaeta dkk., 2021).

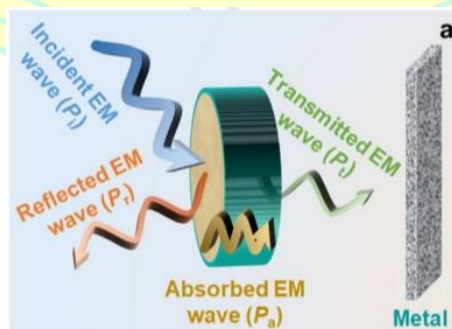
3. Feromagnetik

Dalam bahan feromagnetik, momen magnet elektron cenderung sejajar satu sama lain (selain medan magnet luar) oleh karena itu, magnetnya lebih tinggi dibandingkan bahan paramagnetik. Jika feromagnet berukuran cukup kecil dan berdomain tunggal, ia bertindak seperti putaran magnet tunggal yang tunduk pada gerakan Brown, menciptakan efek kerentanan positif kuat yang dikenal sebagai superparamagnetisme (Gaeta dkk., 2021).

F. Material Penyerap Gelombang Mikro

Barium heksaferit tipe M adalah bahan feromagnetik keras yang menunjukkan puncak serapan kuat di atas 20 GHz. Bahan heksaferit cocok sebagai penyerap gelombang mikro karena nilai permeabilitas magnetik yang sesuai, magnetisasi yang tinggi, dan perilaku anisotropik planar pada frekuensi gelombang mikro. Karena anisotropi medan magnetnya yang tinggi, heksaferit dapat digunakan pada frekuensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan ferit spinel dan granet (Zhu dkk., 2013).

Prinsip penting dari penyerapan gelombang mikro adalah mengubah energi gelombang mikro menjadi energi panas yang dibuang ke lingkungan melalui berbagai mekanisme penyerapan. Bahan serapan gelombang mikro harus memiliki tingkat serapan gelombang mikro yang cukup tinggi dan *bandwidth* serapan yang lebar untuk aplikasi. Selain itu, juga harus memiliki karakteristik lain, seperti ketebalan yang kecil, kepadatan permukaan yang rendah, kekuatan mekanik yang tinggi, dan ramah lingkungan (Li dkk., 2021).



Gambar 2.8. Prinsip kerja penyerap dan gelombang elektromagnetik (sumber: Zeng dkk., 2020)

Pada gambar 2.7 merupakan diagram skematik daya yang terlibat antara gelombang elektromagnetik dan penyerap. Untuk menentukan kinerja penyerapan gelombang mikro suatu bahan, permitivitas relatif ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) dan permeabilitas kompleks relatif ($\mu_r = \mu' - j\mu''$) merupakan parameter penting (Zeng dkk., 2020). Kehilangan reflektansi (RL) menunjukkan energi panas dari penyerapan gelombang mikro karena interaksi gelombang dengan materi. Semakin kecil nilai RL, semakin besar persentase gelombang yang diserap oleh bahan tersebut (Haiqal dkk., 2024). Rugi nilai reflektansi mendefinisikan kemampuan gelombang elektromagnetik yang dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$|S_{11}| = \sqrt{(S_{11real}^2)^2 + (S_{11imajiner}^2)^2} \quad (2.1)$$

$$RL = 20 \log |S_{11}| \quad (2.2)$$

(Marpaung dkk., 2022)

G. Karakterisasi Material

1. Mikroskop digital

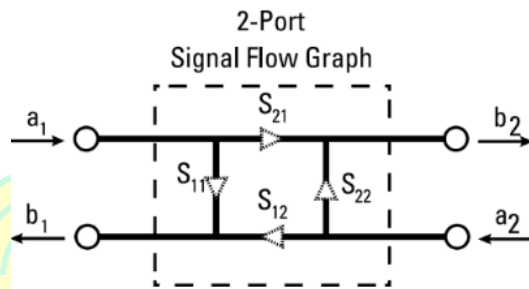
Diciptakan lebih dari 400 tahun yang lalu, optik telah mengalami kemajuan semakin banyak digunakan dalam penelitian biomedis, kedokteran klinis, dan banyak di bidang lainnya (Academic press, 2022).

Mikroskop merupakan peralatan yang sering digunakan di Laboratorium yang berfungsi untuk mengamati suatu objek yang sangat kecil dengan menggunakan lensa untuk memperbesar bayangan benda tersebut (Muqoddam dkk., 2020). Saat ini, gambar yang dihasilkan oleh mikroskop diubah ke format digital untuk disimpan, dianalisis, atau diproses sebelum dilihat dan dikirim. Pemroses gambar digital secara signifikan meningkatkan proses memperoleh informasi (Academic press, 2022).

2. Vector Network Analyzer (VNA)

Biasanya digunakan untuk analisis jaringan dengan akurasi tinggi. *Vector Network Analyzer* (VNA) adalah alat instrumen serbaguna yang digunakan untuk mengkarakterisasi jaringan aktif dan pasif yang digunakan dalam teknologi

komunikasi. Karakterisasi jaringan didefinisikan dalam parameter hamburan (parameter S). Parameter S adalah rasio besaran gelombang yang memberikan informasi tentang karakteristik refleksi dan transmisi perangkat yang diuji (Shoaib, 2016).



Gambar 2.9. Jaringan dual port
(sumber: Bonaguide & Jarvis, 2019)

Dalam sistem *dual port*, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.9. Terdapat transmisi maju dan mundur selain refleksi. Besaran ini dapat dilambangkan dengan parameter hamburan (parameter S). Parameter S didefinisikan sebagai rasio kuantitas gelombang yang dipantulkan dan gelombang masuk. Untuk jaringan *dual port*, empat parameter S S_{11} , S_{21} , S_{12} dan S_{22} menggambarkan jaringan sepenuhnya. S_{11} dan S_{22} sesuai dengan koefisien refleksi di port 1 dan port 2. Sedangkan S_{21} dan S_{12} masing-masing menandakan efisien transmisi maju dan mundur (Shoaib, 2016).

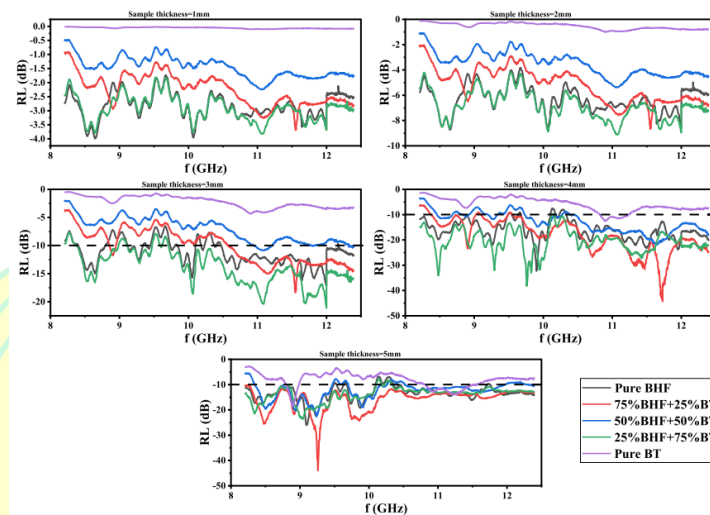
3. Permagraph

Berfungsi untuk menguji karakteristik magnet pada material magnet permanen seperti nilai induksi remanen (Br), koersivitas (HcJ), dan energi maksimum produk (BH_{max}) meningkat seiring dengan bertambahnya waktu milling (Idayanti dkk., 2017). Prinsip pengukuran permagraph pada dasarnya menggunakan rangkaian magnet tertutup. Keuntungan dari rangkaian tertutup adalah pengukurannya tidak memerlukan faktor demagnetisasi dan medan magnet dapat diubah dengan sangat cepat sehingga mengurangi waktu pengukuran. Kelebihan alat karakterisasi permagraph adalah sebagai berikut:

- Cepat, dan mudah digunakan
- Pemanasan sampel hingga 200°C

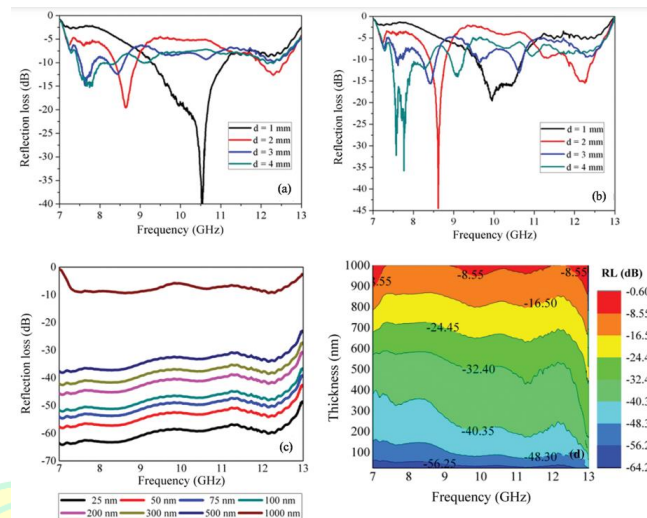
- Tidak diperlukan faktor demagnetisasi karena rangkaian magnet tertutup (Mathauer, 2020).

H. Penelitian Relevan



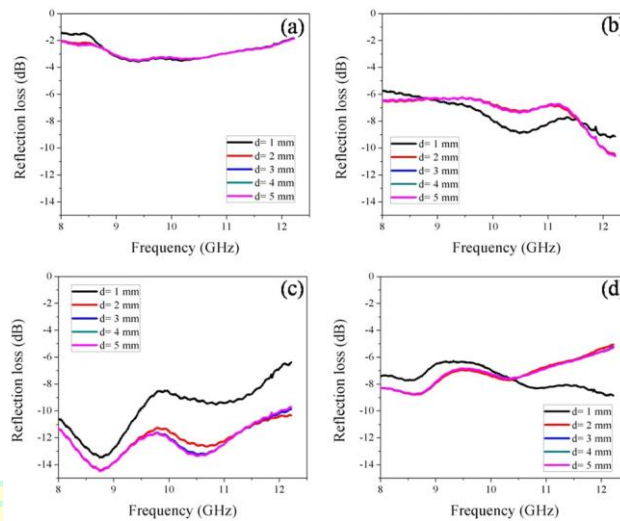
Gambar 2.10. *Reflection Loss* (RL) pada ketebalan berbeda (sumber: Salem dkk., 2023)

Salem dkk. (2023) menjelaskan penelitiannya terkait sifat pelindung magnetik, dielektrik, dan elektromagnetik dari nanokomposit Barium HeksaFerit (BHF) dan Barium Titanat (BT). Saat menganalisis sifat elektromagnetik, rasio permitivitas dan permeabilitas magnetik menunjukkan peningkatan kapasitas untuk menyimpan energi listrik dan magnetik. Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) *Spectroscopy* dan *X-Ray Diffraction* (XRD) mengungkapkan adanya perbedaan puncak serapan yang menunjukkan susunan persegi BT dan struktur kristal BHF. *Scanning Electron Microscope* (SEM) mengungkapkan morfologi BHF (sekitar 82 nm) tampak lebih besar dari BT (sekitar 50 nm). Sorotan utama dari penelitian ini adalah tercapainya nilai *Reflection Loss* (RL) yang signifikan sebesar -45 dB pada 9,3 GHz untuk komposit yang mengandung 75% BHF, sehingga menjadikan komposit tersebut sebagai penyerap gelombang mikro yang efektif.



Gambar 2.11. *Reflection Loss* (RL) BaFe₁₂O₁₉ dan BaCoZnFe₁₀O₁₉ (sumber: Handoko dkk., 2020)

Handoko dkk. (2020) dalam penelitiannya tentang kinerja penyerapan gelombang mikro dari BaFe₁₂O₁₉ dan BaCoZnFe₁₀O₁₉ multi-nanolayer yang digunakan sebagai lapisan magnetik sebagai peredam gelombang mikro. Struktur BaFe₁₂O₁₉ (μ_1, ϵ_1, d_1) dan BaCoZnFe₁₀O₁₉ (μ_2, ϵ_2, d_2) yang terdiri dari 10 lapisan dengan ketebalan berbeda dengan rentang frekuensi 7-13 GHz. Hasilnya menunjukkan bahwa kinerja penyerapan gelombang mikro dari struktur *multilayers* meningkat berkat kombinasi lapisan *nanolayers* BaFe₁₂O₁₉ dan BaCoZnFe₁₀O₁₉. Lebar pita serapan juga meningkat ketika struktur multi-nanolayer digunakan. Kinerja serapan optimal dengan nilai *Reflection Loss* (RL) kurang dari -30 dB (penyerapan 99,9%) ketika ketebalan lapisan kurang dari 500 nm.



Gambar 2.12. Reflection Loss (RL) komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ (sumber: Yusmaniar dkk., 2021)

Yusmaniar dkk. (2021) dalam penelitiannya, berhasil membuat komposit *core-shell/polyaniline* $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ menggunakan metode mekanis dan kimia. Struktur kristal, morfologi, sifat magnetik, dan sifat penyerapan gelombang mikro dianalisis masing-masing dengan *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *permagraph*, dan *Vector Network Analyzer (VNA)*. Hasilnya menunjukkan komposit *core-shell/polyaniline* $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 4% berpotensi untuk bahan penyerap elektromagnetik jangkauan *X-band*. Pita frekuensi untuk kehilangan refleksi di bawah -10 dB (90% serapan gelombang mikro) diperoleh dari 8.0-12.2 GHz pada ketebalan 2 hingga 5 mm.