

MATERIAL PENYERAP GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK JANGKAUAN FREKUENSI RADAR

Electromagnetic Wave Absorbing Materials on Radar Frequency Range

Yana Taryana^a, Azwar Manaf^b, Nanang Sudrajat^a, Yuyu Wahyu^a

^aPusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi-LIPI

Komplek LIPI Jl. Sangkuriang, Bandung, Indonesia 40135

^bFakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Indonesia

Universitas Indonesia, Kampus UI, Pondok Cina, Depok, Indonesia 16424

Naskah masuk: 6 Mei 2019, Revisi: 11 November 2019, Diterima: 18 November 2019

ABSTRAK

*R*adar Absorbing Material (RAM) merupakan sebuah bahan yang dapat menyerap dan melemahkan gelombang elektromagnetik. Saat ini, RAM banyak digunakan sebagai isolator untuk melindungi interferensi gelombang elektromagnetik (EMI) yang diakibatkan oleh medan elektromagnetik luar dan gelombang elektromagnetik yang ditimbulkan oleh modul radio frekuensi (RF) yang dapat mengganggu unjuk kerja suatu sistem radio. Sementara kegunaan yang paling strategis adalah sebagai bahan cat (*coating*) anti radar untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan sistem militer seperti pesawat, kapal tempur dan peralatan lainnya. Secara umum bahan penyerap gelombang elektromagnetik harus bersifat resistif, magnetik dan dielektrik. Penyerapan pada daerah frekuensi resonansi ditunjukkan oleh nilai permitivitas dan permeabilitas dari bahan tersebut. Kebanyakan literatur telah melaporkan bahwa bahan dasar yang berpotensi sebagai penyerap gelombang elektromagnetik adalah bahan magnetik berbasis ferit, yaitu barium heksaferit dan stronsium heksaferit. Oleh karena itu, saat ini perkembangan penelitian mengarah pada modifikasi dan rekayasa struktur bahan sehingga diharapkan memperoleh parameter-parameter yang tepat dengan tingkat penyerapan yang maksimal. Umumnya, jenis RAM dikelompokkan menjadi tipe *impedance matching* dan *resonant absorber*.

Kata Kunci: RAM, EMI, permitivitas, permeabilitas, *impedance matching*, *resonant absorber*

ABSTRACT

*R*adar absorbing material (RAM) is a material that which can absorb and reduce energy of

electromagnetic wave. Recently, RAMs are widely used as an isolator to protect electromagnetic wave interference (EMI) caused by external electromagnetic field and electromagnetic waves generated by radio frequency (RF) components that disturb the performance of a radio system. Whilest, the most strategic function is as anti-radar coating material to supply the needs of military systems such as aircraft, combat ships and other equipments. Generally, RAM must be resistive, magnetic and dielectric. Absorption at the resonant frequency region is indicated by the permitability and permeability values of the material. The Most literature has reported that the basic material which has the potential to absorb electromagnetic waves is ferrite-based magnetic material, namely barium hexaferrite and strontium hexaferrite. Therefore, the current development of research leads to modification and engineering of the material structure so that it is expected to obtain the right parameters with a maximum absorption rate. Generally, RAMs construction design are grouped on the impedance matching and resonant absorber types.

Keywords: RAM, EMI, permittivity, permeability, impedance matching, resonant absorber

I. PENDAHULUAN

Radar (*radio detection and ranging*) adalah sistem yang memancarkan gelombang elektromagnetik pada suatu objek tertentu kemudian menerima dan menganalisa gelombang pantulannya untuk menentukan jenis, posisi, jarak, dan kecepatan suatu objek. Dalam bidang pertahanan dan keamanan, radar mempunyai peranan penting sebagai salah satu sistem yang dapat membantu dalam pengawasan keamanan wilayah negara. Perkembangan penelitian teknologi sistem radar sebelum dan sesudah perang dunia ke dua, mengarah pada

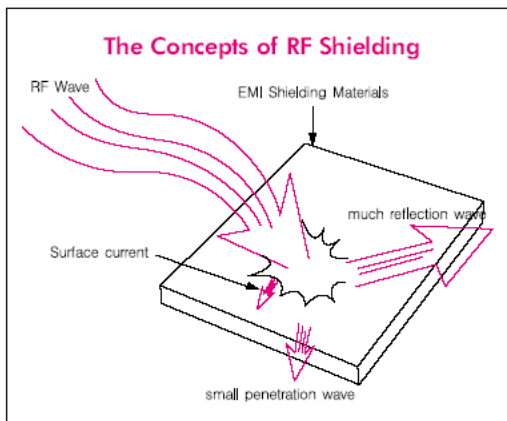
interaksi antara radiasi gelombang elektromagnetik dan bahan. Salah satu aspek penelitian adalah upaya untuk mengurangi atau melemahkan sinyal pantulan dari radar. Hal ini dilakukan tidak hanya untuk mengurangi sinyal radar melalui lapisan bahan penyerap pada struktur di sekitarnya seperti tiang penyangga radar, menara dan bangunan pendukung yang dapat menurunkan kinerja radar itu sendiri, namun lebih jauh lapisan bahan tersebut dapat juga membantu melemahkan sinyal pantulan agar tidak terdeteksi radar musuh. Maka dalam kurun waktu tersebut, terjadi peningkatan

penelitian terhadap bahan penyerap gelombang elektromagnetik atau lebih dikenal dengan sebutan *radar absorbing material* (RAM) yang ditandai dengan adanya proyek “*stealth*” yang dikembangkan oleh Amerika untuk *Advanced Technology Bomber and Advanced Technology Fighter* [1]. Teknik utama yang digunakan pada proyek tersebut adalah memodifikasi bentuk geometris dan penggunaan bahan penyerap radar sebagai pelapis permukaan. Geometri permukaan dibentuk sedemikian rupa untuk meredam gelombang pantulannya (*scattering*) tidak mengarah pada detektor radar, sementara bahan lapisan permukaan bertujuan untuk menyerap gelombang elektromagnetik dengan cara mengubah energinya menjadi energi yang lain.

Kemudian penelitian RAM berkembang pada berbagai aplikasi, seperti metamaterial absorber, lembaran (*sheet absorber*), dan piramidal absorber. Pada umumnya aplikasi penelitian metamaterial digunakan untuk *device filter* dan *antenna* tetapi dapat juga diaplikasikan sebagai metamaterial absorber. *Sheet absorber* digunakan

sebagai lapisan pembatas (*shielding*) untuk isolator terhadap interferensi gelombang elektromagnetik (EMI) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Ilustrasi pada Gambar 1 tersebut menunjukkan bagaimana kemampuan yang diharapkan dari *Radio Frequency Shielding Absorber* (RF *Shielding*) adalah harus dapat memantulkan gelombang elektromagnetik yang datang ke permukaan sebesar mungkin dan gelombang elektromagnetik yang diteruskan harus sekecil mungkin [2], sedangkan ilustrasi pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa material penyerap pada dasarnya diharapkan memiliki kemampuan untuk menyerap gelombang elektromagnetik melalui peredaman daya yang masuk ke dalam material dikonversikan menjadi panas sehingga intensitas gelombang yang terus menembus material telah sangat rendah atau tidak ada sama sekali. Kebanyakan contoh material tersebut berupa struktur geometri piramidal dengan lapisan karbon komposit sebagaimana yang digunakan sebagai lapisan *anechoic chamber*, yaitu sebuah ruangan yang dirancang khusus dengan lapisan *sponge carbon* berbentuk piramidal

agar terbebas dari refleksi gelombang yang berasal dari luar dan dalam [3].

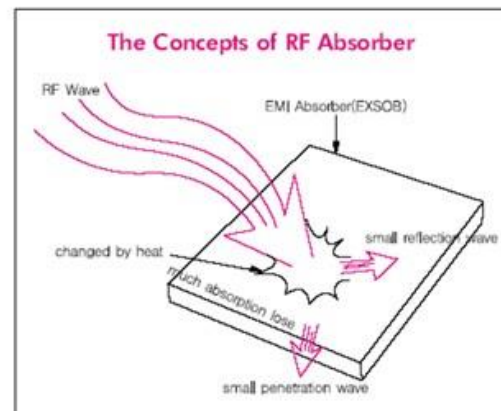


Gambar 1. Konsep dari RF sheilding[2]

Dalam disertasinya Wisnu Ari A (2014) [4] menuliskan bahwa material yang berpotensi untuk aplikasi penyerap gelombang elektromagnetik harus memenuhi syarat nilai permeabilitas magnetic dan permitivitas listrik yang besar. Dengan demikian, material penyerap tersebut harus bersifat dielektrik dan bersifat magnetik dengan nilai koersivitas yang rendah. Hal yang sama disampaikan juga oleh Maykel dalam disertasinya bahwa material penyerap gelombang elektromagnetik harus mempunyai sifat sifat permeabilitas dan permitivitas imajiner yang tinggi, saturasi magnetisasi yang tinggi, konduktivitas yang tinggi dan temperatur *curie* yang tinggi [5].

Makalah ini bersifat tinjauan literatur terkait dengan perkembangan

penelitian material penyerap gelombang elektromagnetik (RAM). Di



Gambar 2. Konsep dari RF absorber[2]

awal kajian telah disampaikan pembahasan singkat tentang aplikasi dan teori gelombang elektromagnetik yang melatarbelakangi penyerapan gelombang elektromagnetik ditinjau dari mekanisme *impedance matching* dan *resonant absorber* [5]

II. SEJARAH PERKEMBANGAN RAM

Penelitian RAM pertama kali dilakukan pada era 1930-an [6] setelah ditemukannya sistem radar dan paten pertama keluar pada 1936 di Belanda. *Absorber* tersebut dirancang dengan menggunakan metode resonansi seperempat panjang gelombang dan bahan yang digunakan adalah karbon hitam sebagai bahan *resistive lossy* dan

Titanium dioksida dengan permitivitas tinggi untuk mengurangi ketebalan.

Selama perang dunia II, Jerman mengembangkan bahan lapisan untuk penyamaran (kamufase) kapal selam dari deteksi radar. Bahan tersebut dinamakan material "Wesch", yaitu berbentuk lembaran karet yang dilapisi oleh bubuk besi karbonil (*carbonyl iron powder*) dengan ketebalan 0,3 inci pada frekuensi resonansi 3 GHz. Dengan konsep *Jaumann Absorber*, bahan ini pada bagian permukaan depan dibuat berlapis (*multilayer*) dengan menggunakan lapisan lembaran resistif dan *rigid plastic* yang dipasang silih berganti setebal 3 inci agar mendapatkan *bandwidth* yang lebar. Bahan ini memberikan capaian kerugian refleksi (*reflection loss*) sebesar - 20 dB pada jangkauan frekuensi 2 GHz - 15 GHz. Dalam periode yang sama, Amerika yang dipimpin oleh Halpern di MIT *Radiation Laboratory* telah mengembangkan material yang dikenal dengan "HARF" untuk cat anti radiasi. Versi *airbone* ini dinamai MX-410 dengan ketebalan 0,025 inci untuk daerah frekuensi resonansi *X-Band*. Berbahan dasar karbon hitam, absorber ini memberikan *reflection*

loss sebesar -15 dB sampai dengan - 20 dB [6].

Pada periode pasca perang (1945-1950), perkembangan material mengarah pada *broadband absorber*, yaitu material yang mampu menyerap gelombang elektromagnetik pada jangkauan frekuensi yang lebar dengan struktur geometri permukaan yang berbentuk piramida runcing. Tipe penyerap seperti itu biasanya digunakan untuk lapisan ruangan *anechoic chambers* [6][7]. Pada periode yang sama dilakukan investigasi terhadap bahan yang dapat meredam gelombang mikro, yaitu plester yang dilumasi karbon, grafit, besi oksida, bubuk besi, bubuk aluminium dan tembaga, baja wol, busa, plastik dan keramik.

Pada 1950-an, RAM mulai diproduksi secara komersial oleh *Sponge Products Company*. Produknya dinamai "Spongex" yang didasarkan pada rambut hewan yang dilapisi karbon. Produk ini memiliki tebal 2 inci dengan *reflection loss* -20 dB pada frekuensi 2,4 GHz-10 GHz. Perusahaan ini juga memproduksi penyerap dengan ketebalan 4 inci dan 8 inci untuk keperluan frekuensi rendah. Perusahaan ini kemudian bergabung dengan *Emerson* dan

Cuming Inc dan *McMillan Industrial Corporation*. Pada tahun itu dilakukan juga penelitian terhadap penyerap dari rangkaian analog yang menjelaskan secara teori penyerapan yang terjadi pada sebuah komponen yang dimodelkan dengan reflektivitas. Penelitian ini pertama kali dilakukan oleh Severin dan Meyer berupa sebuah rangkaian yang terdiri dari rangkaian loop resistansi dan berkembang pada kurun waktu 1960-1970-an. Pada tahun yang sama ditemukan teknologi *screen printing* untuk proses pembuatan *absorber jauman layer* dan pyramid absorber untuk ruang *anechoic chambers* hasil *reflection loss* sudah mencapai -60 dB [6].

Pada 1970-1980 kemajuan penelitian RAM ditandai dengan adanya pesawat anti radar F-117 yang menggunakan *iron ball paint* yang diisolasi secara elektrik pada ukuran-ukuran tertentu yang dilarutkan pada 2 bagian cat epoxy. Setiap bola-bola mikroskopis terlapis oleh kuarsa (silicon oksida) sebagai isolasi, ketika *iron ball paint* masih dalam keadaan cair maka dilakukanlah perlakuan medan magnet dengan kekuatan tertentu dan pada jarak tertentu untuk menghasilkan pola medan magnet

tertentu pada *carbonyl iron ball* [8]. Pada 1980, Eugene F. Knott dan Kent B. Langseth melakukan penelitian terhadap kelemahan dari kinerja “*jaumann absorber*” karena faktor geometri lengkungan [9]. Pada 1984-1990-an penelitian mengarah pada analisa pengaruh ketebalan absorber baik untuk *single layer* ataupun *multilayer* dan penggunaan ferrit sebagai bahan penyerap [10][11][12][13]. G. P. Srivastava dan (1992) melakukan penelitian terhadap bahan ferrit yang dikombinasikan dengan *rubber* dan *carbon*. Penelitian dilakukan untuk melihat pengaruh komposisi bahan terhadap ketebalan. Pada perbandingan rubber : carbon : ferrit adalah 1 : 0,4 : 0,6 dengan ketebalan 5 mm menghasilkan nilai *reffelction loss* sebesar -60 dB pada frekuensi 3,25 GHz [14]. Pada 1993-2000, perkembangan penelitian penyerap gelombang elektromagnetik mengarah pada bentuk desain struktur, analisa dan optimasi *jauman* dan *tapered absorber* untuk *single layer* dan *multilayer* serta pengaruhnya terhadap perilaku gelombang elektromagnetik [15] [16].

Pada 2000-2010-an, penelitian dan pengembangan bahan penyerap gelombang elektromagnetik kebanyakan mengarah pada bahan

yang bersifat magnetik. M.R. Meshram dkk (2004) membuat *absorber* dengan bahan *barium ferrite heksagonal* ($[\text{BaCo}_{0.5\delta} \text{Ti}_{0.5\delta} \text{Mn}_{0.1} \text{Fe}_{(11.87-\delta)} \text{O}_{19}]$ dan $[\text{Ba}(\text{MnTi})_{\delta} \text{Fe}_{(12-2\delta)} \text{O}_{19}]$ pada δ sebesar 1.6 memberikan hasil respon *reflection loss* yang lebar pada daerah *x-band* rata rata sebesar 8 dB [17]. Sementara Alexandre R. Bueno (2008) dalam penelitiannya menggunakan bahan $\text{Ni}_{0.50-x} \text{Zn}_{0.50-x} \text{Me}_{2x} \text{Fe}_2\text{O}_4$ (Me = Cu, Mn, Mg) dengan variasi $x = 0,00$ dan $x=0,10$ pada daerah frekuensi kerja X-band menghasilkan *reflection loss* sebesar -35,02 dB [18]. Pada kurun waktu tersebut, umumnya penelitian tentang sifat-sifat penyerap gelombang mikro mengarah pada eksplorasi bahan magnetik dan optimalisasi dengan cara mensubstitusi oleh unsur yang lain. Proses tersebut dilakukan diantaranya bertujuan untuk meningkatkan penyerapan seperti yang dilakukan oleh Rahul Sharma [19] dengan material yang digunakannya adalah $(\text{BaNi}_x\text{Ti}_x \text{Fe}_{12-2x}\text{O}_{19})$ ($x = 0.4$) dengan ukuran ~ 10 nm, memperlebar *bandwidth* [20], dan optimasi dengan metode komputasi [21][22][23].

Pada dekade terakhir (2011-sekarang) penelitian dan pengembangan sifat bahan penyerap gelombang mikro masih mengeksplorasi bahan magnetik dengan doping untuk optimalisasi penyerapan, ketebalan dan daerah frekuensi kerja yang lebar (*broadband*). Qian Zhou, Xiaowei Yin dkk (2017) melakukan penelitian dengan struktur dua lapisan dengan menggunakan resin epoksi diperkuat α -Fe membentuk sistem komposit. Dari percobaan tersebut memberikan hasil penyerapan 90% pada daerah frekuensi 2,64 GHz sampai dengan 40 GHz [24]. Pada dekade ini, banyak dilakukan penelitian penyerap gelombang elektromagnetik pada frekuensi kerja yang lebar (*broadband*) diantaranya adalah Davide Micheli menggunakan karbon berukuran nano dan mikro dengan metode *multilayer absorber*. Pada frekuensi 8 GHz-12 GHz dengan ketebalan 1 cm *loss factor* (LF >90%) dan LF dapat mencapai > 99% dengan ketebalan 2 cm [25]. Pawandeep Kaur dkk (2018) melakukan percobaan menggunakan bahan strontium hexaferrite dengan komposisi kimia $\text{Sr}_{0.85}\text{La}_{0.15} (\text{MnZr})_x \text{Fe}_{12-2x} \text{O}_{19}$ dengan variasi ($x = 0; 0,25;$

0,50; 0,75; 1,0) pada frekuensi K-band (18 GHz-26,5 GHz) dan Ka-band (26,5 GHz-40 GHz). Pada K-band, hasil karakterisasi memberikan nilai *reflection loss* minimum -47,8 dB pada frekuensi 22,56 GHz dan terjadi pada variasi $x=1$ dengan ketebalan 1,1 mm, sedangkan pada Ka-band menghasilkan *reflection loss* minimum -29,9 dB pada frekuensi 34 GHz dan terjadi pada variasi sampel $x=0,5$ dengan ketebalan 0,85 mm [26]. *Broadband microwave absorber* juga dapat dibuat dengan merekayasa struktur, seperti yang dilakukan oleh Won-Ho Choi dkk (2014) dengan menggunakan struktur mirip sarang lebah [27]. Chenguang Wu dkk (2018) mencoba meningkatkan lebar pita penyerapan dengan merancang struktur permukaan menggunakan besi karbonil dan komposit karet sehingga menghasilkan *reflection loss* pada X-band di bawah -10 dB [28]. Sementara Isa Araz dan Fazilet Genc dengan bahan barium hexaferrit yang didoping Cobalt (Co) menghasilkan *reflection loss* -20 dB pada frekuensi 2 GHz- 18 GHz [29]. Selain broadband absorber, penelitian berkembang kepada lapisan material yang tipis (*thin absorber*) dengan tingkat penyerapan tinggi [30][31][32][33][34].

III. MEKANISME PENYERAPAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

Secara umum sifat listrik dan magnetik suatu material dielektrik ditandai dengan permitivitas dan permeabilitas kompleks, seperti ditunjukkan oleh persamaan 1 dan 2 [35]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad (1)$$

$$\mu^* = \mu' + j\mu'' \quad (2)$$

Bagian riil permitivitas (ε') menyatakan besarnya jumlah energi dari medan listrik luar yang disimpan dalam material, sedangkan bagian imajiner (ε'') menyatakan besarnya energi yang hilang karena medan listrik dari luar. Jika bagian imajiner sama dengan nol maka material tersebut merupakan material *lossless* dan disebut sebagai *loss factor*. Hal yang sama untuk permeabilitas, bagian riil (μ') menyatakan besarnya jumlah energi dari medan magnet luar yang tersimpan dalam material sedangkan bagian imajiner (μ'') menunjukkan jumlah energi yang terdisipasi karena medan magnet [36].

Permitivitas muncul dari polarisasi dielektrik material. Kuantitas ε' dapat disebut juga sebagai konstanta

dielektrik suatu material. Kuantitas ϵ'' adalah ukuran redaman dari medan listrik yang disebabkan oleh material. *Loss tangent* listrik dari suatu material didefinisikan sebagai berikut:

$$\tan \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \tag{3}$$

Semakin besar *loss tangent* suatu material, maka semakin besar redamannya ketika gelombang bergerak melalui material. Hal yang sama berlaku untuk medan magnet, yaitu :

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \tag{4}$$

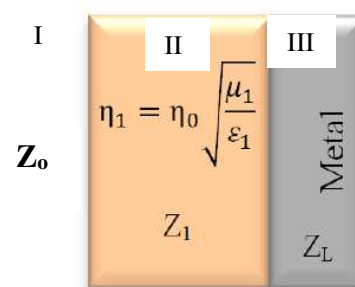
Kedua komponen tersebut berkontribusi terhadap kompresi panjang gelombang di dalam material. Karena gelombang elektromagnetik (EM) merupakan gabungan dua buah gelombang antara gelombang listrik dan magnet, maka kehilangan baik di medan magnet ataupun listrik akan melemahkan energi dalam gelombang. Dalam kebanyakan peredam, baik permitivitas dan permeabilitas merupakan fungsi frekuensi dan dapat bervariasi secara signifikan bahkan pada rentang frekuensi yang kecil. Jika permitivitas kompleks dan permeabilitas diketahui pada rentang frekuensi tertentu, maka efek material pada gelombang akan diketahui.

Paul Dixon dalam tulisannya yang berjudul “*The theory and Application of RF/Microwave Absorber*” [35], gelombang yang merambat melalui suatu material mengalami redaman (*attenuation*) per satuan panjang tempuh. Tingkat redaman dapat dihitung oleh persamaan 5 dan dinyatakan dalam dB/cm.

$$A_t(\text{dB/cm}) = \frac{2\pi(8,686)}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu' \epsilon' \left(\sqrt{(1 + \tan^2 \delta_e)(1 + \tan^2 \delta_m)} - (1 - \tan \delta_e \tan \delta_m) \right)}{2}} \tag{5}$$

Menurut persamaan 5 bahwa gelombang yang merambat melalui suatu material akan mengalami redaman yang besar per satuan panjang apabila material tersebut memiliki nilai ϵ' dan μ' yang besar.

Y.S. Lee dkk [37] menjelaskan model penyerapan gelombang elektromagnetik untuk material *single layer* yang ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Model penyerapan gelombang elektromagnetik pada sistem material *single layer*.

Gelombang elektromagnetik yang berasal dari daerah I akan mengalami pantulan ketika mengenai material pada daerah II yang dilapisi konduktor

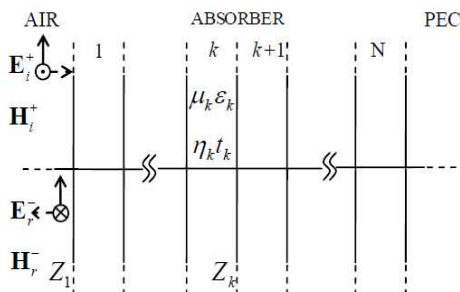
(III). Besarnya impedansi ruang udara Z_0 ditunjukkan oleh persamaan 6 dan besarnya impedansi material ditunjukkan oleh persamaan 7. Apabila besarnya impedansi material mendekati nilai impedansi ruang udara maka gelombang pantulannya akan sangat kecil.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ Ohm} \quad (6)$$

$$Z_1 = Z_0 \tanh\left(j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f d\right) \quad (7)$$

Dimana c , f dan d masing-masing adalah kecepatan propagasi gelombang dalam udara, frekuensi gelombang datang dan ketebalan material. Besarnya *reflection loss* dari impedansi material (Z_1) ternormalisasi yang dilapisi logam dinyatakan oleh persamaan 8. Berdasarkan persamaan 8 ini, nilai RL menjadi besar dengan meningkatnya nilai Z_1 .

$$RL(dB) = -20 \log \left[\frac{Z_1 - 1}{Z_1 + 1} \right] \quad (8)$$



Gambar 4. Model penyerapan gelombang elektromagnetik pada sistem material *multilayer* [38]

Heyong Liu dkk menjelaskan model penyerapan gelombang elektromagnetik pada sistem *multilayer*, dengan ilustrasi pada Gambar 4 [38]. Sumber gelombang datang berada dari daerah 1 (daerah z) dengan E_i^+, H_i^+ masing-masing adalah medan listrik dan medan magnet yang datang, sedangkan E_r^-, H_r^- masing masing adalah medan listrik dan medan magnet yang direfleksikan oleh sistem material. Namun demikian, dalam paper ini, penyerapan *multilayer* tidak dibicarakan lanjut

Besaran ukuran penyerapan energi gelombang elektromagnetik oleh material penyerap dinyatakan sebagai *reflection loss* (RL) dihitung sesuai dengan persamaan 9.

$$RL = 20 \log |\Gamma| \quad (9)$$

Dalam hal ini besaran Γ menunjukkan koefisien refleksi pada batas udara dan medium penyerap yang dapat dihitung berdasarkan persamaan 10.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (10)$$

Dalam hal ini, Z_{in} adalah impedansi medium yang dilintasi oleh gelombang EM, γ adalah konstanta propagasi, Z_0 adalah impedansi intrinsik udara, Γ adalah koefisien

refleksi, μ_0 adalah permeabilitas magnetik udara sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m dan ϵ_0 adalah permitivitas listrik udara sebesar $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

3.1. Mekanisme penyerapan *matching impedance*

Pada Gambar 3 telah diperlihatkan gelombang elektromagnetik yang berjalan pada medium I *free space* (udara) menuju medium II (material) yang dilapisi metal (medium III) sebagai reflektor sempurna. Teori gelombang elektromagnetik menjelaskan bahwa ketika gelombang datang berinteraksi dengan material maka akan terjadi sebagian energi gelombang dipantulkan dan sebagian energi diserap [39]. Penyerapan sempurna terjadi apabila impedansi material (Z_1) sama dengan impedansi karakteristik gelombang *free space* (Z_0) artinya tidak ada energi gelombang yang dipantulkan (*zero reflection*).

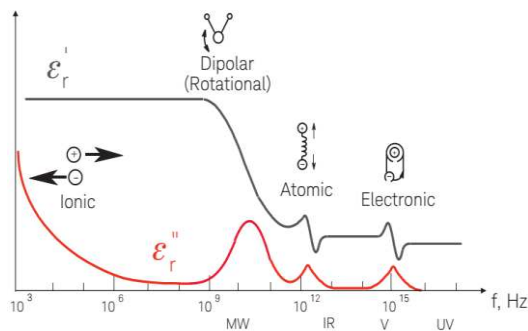
Untuk mendapatkan nilai impedansi Z_1 mendekati nilai impedansi Z_0 adalah tidak mudah karena menurut persamaan 7, Z_1 merupakan fungsi dari permitivitas (ϵ_r) dan permeabilitas (μ_r) kompleks suatu material. Hal yang paling mudah dilakukan untuk mendapatkan impedansi *matching* Z_1 adalah

dengan cara mengatur besarnya ketebalan material (d) tersebut. Besarnya *reflection loss* dari material yang dilapisi logam ditunjukkan oleh persamaan 9 dan 10. Secara matematis, apabila $Z_1 = Z_0$ maka *RL* bernilai tak berhingga yang berarti energi gelombang datang diserap seluruhnya melalui mekanisme resonansi [40].

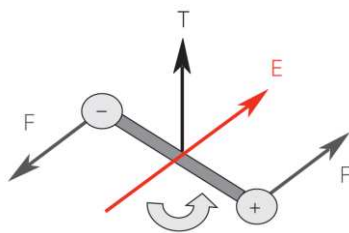
3.2. Mekanisme fisik penyerapan melalui metode resonansi

Telah dijelaskan bahwa ketika kondisi *matching impedance* terpenuhi, maka mekanisme penyerapan berlangsung melalui proses resonansi. Proses ini dapat terjadi pada material yang bersifat dielektrik, magnetik dan resistif. Jika gelombang elektromagnetik datang dan berinteraksi dengan material dielektrik, maka akan terjadi medan internal yang menginduksi gerak translasi dan gerak rotasi dari dipol listrik sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5. Tahanan elastis, gaya gesek dan momen inersia di dalam material akan melawan efek gerak yang ditimbulkan oleh medan induksi tersebut [5]. Pada Gambar 6 diberikan ilustrasi gerak translasi dan rotasi dipol listrik dalam material dibawah pengaruh medan listrik.

Pada jangkau frekuensi rendah terjadi perubahan arah medan listrik yang lambat yang diikuti dengan perubahan rotasi dipol. Seiring dengan kenaikan frekuensi, momen inersia dan gaya gesek menghasilkan hambatan sampai dengan tidak terjadi lagi rotasi. Gesekan dan momen inersia yang menyertai penyerahan dipol mengakibatkan terjadinya penyerapan energi gelombang elektromagnetik yang terdisipasi dalam bentuk panas.



Gambar 5. Frekuensi respon dari mekanisme dielektrik [5]



Gambar 6. Rotasi dipol pada medan listrik [5]

Pada material magnetik, resonansi yang terjadi antara gelombang elektromagnetik dengan material dibagi menjadi dua mekanisme, yaitu *domain wall resonance* dan *spin elektron resonance* (*Ferromagnetic resonance*). *Domain wall resonance*

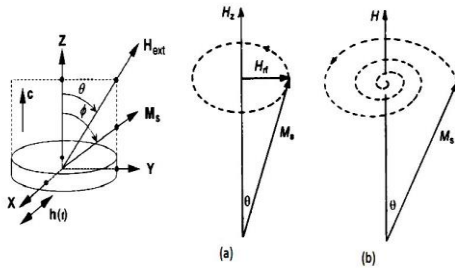
adalah resonansi yang terjadi pada domain-domain magnet yang diakibatkan oleh induksi gelombang elektromagnetik. Sedangkan *spin elektron resonance* adalah resonansi yang terjadi pada elektron yang sedang berpresisi pada arah medan magnet internal akibat induksi gelombang elektromagnetik.

Pada *domain wall resonance*, perubahan orientasi domain magnet akibat induksi magnet akan menghasilkan *restoring force* (gaya pemulih) dengan arah berlawanan. Menurut persamaan 11 momen inersia *domain wall* dan gesekan dengan sesama domain menghasilkan hambatan berupa disipasi energi

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = 2M_s B(t) \quad (11)$$

Dimana x adalah perubahan orientasi domain wall, m sebagai masa domain, β sebagai faktor damping atau redaman yang dipengaruhi oleh porositas, impuritas, dan cacat kristal, k sebagai koefisien kelakuan yang merupakan nilai intrinsik material, M_s adalah magnetisasi total material dan $B(t)$ adalah medan magnet induksi gelombang elektromagnetik. Persamaan 11 memberikan kesimpulan bahwa material yang mengandung banyak cacat (porositas,

impuritas dan cacat kristal) akan mengalami disipasi energi yang semakin besar.



Gambar 7. Mekanisme resonansi gelombang elektromagnetik terhadap rotasi magnetik di sekitar medan anisotropis. (a) Gerakan berpresisi sekitar medan anisotropis H_z oleh medan magnet gelombang elektromagnetik H_{RF} . (b) Presisi elektron saat mendisipasikan energi [5].

Pada *spin elektron resonance* yang ditunjukkan oleh Gambar 7, jika arah medan magnetik gelombang elektromagnetik tegak lurus terhadap medan statik material pada frekuensi yang sama dengan frekuensi resonansinya, maka energi gelombang elektromagnetik akan menghasilkan torsi yang membuat jari-jari elektron yang sedang berpresisi menjadi lebih besar atau memiliki energi yang lebih besar dari sebelumnya. Gerak presisi pada level energi yang lebih tinggi tersebut menghasilkan vibrasi kristal dalam bentuk gelombang spin. Faktor masa, koefisien kelakuan, porositas, impuritas dan cacat kristal akan menghalangi pergerakan gelombang

spin tersebut sehingga terjadi disipasi energi.

IV. EKSPLORASI BAHAN PENYERAP GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

Pada penjelasan di atas, material untuk RAM tersusun dari material-material yang memiliki sifat magnetik, elektrik dan resistif yang ditunjukkan oleh parameter-parameter permitivitas (ϵ), permeabilitas (μ), resistivitas (R) atau konduktivitas (σ) suatu bahan [40][41]. Apabila gelombang elektromagnetik merambat dalam media suatu RAM, maka akan terjadi resonansi penyerapan yang diakibatkan oleh adanya parameter-parameter material tersebut. Namun perlu diketahui bahwa RAM tentu tidak mampu menyerap gelombang radar pada semua frekuensi karena setiap material memiliki karakteristik resonansi yang berbeda-beda, sehingga usaha maksimal yang dapat dilakukan adalah menemukan komposisi material yang tepat yang diharapkan memiliki kemampuan penyerapan gelombang yang paling maksimal.

Kebanyakan produk komersial absorber yang telah dibuat berbasis karbon. Biasanya produk tersebut berbentuk busa yang dilapisi karbon.

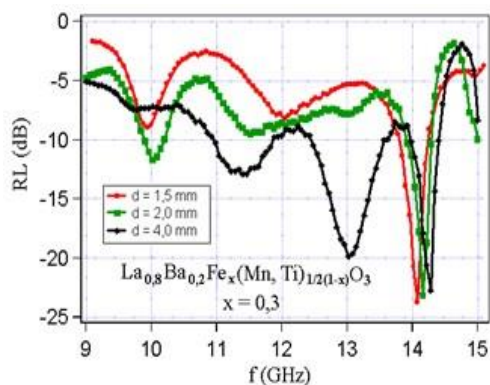
Lapisan karbon ini bertindak sebagai resistansi dari ruang bebas yang dapat mengurangi interferensi gelombang elektromagnetik yang masuk. Akan tetapi dari bahan lapisan karbon mempunyai kekurangan yaitu hanya memiliki nilai permeabilitas saja, sedangkan untuk memperoleh nilai permitivitasnya dibangun dengan penambahan unsur lain misalnya besi [42]. Berdasarkan parameter-parameter bahan/material yang dapat mempengaruhi besarnya penyerapan gelombang elektromagnetik, maka saat ini bahan absorber yang memenuhi persyaratan tersebut adalah bahan magnet yang berbasis ferit. Bahan magnetik berbasis ferrit ini, umumnya yang banyak digunakan adalah barium hexaferit dan strosium hexaferit karena bahan tersebut memiliki permeabilitas yang tinggi, saturasi magnetisasi yang tinggi, stabilitas kimia yang baik dan tahan korosi karena berbasis oksida [43][44].

Karena gelombang elektromagnetik terdiri dari gelombang listrik dan magnetik yang keduanya berjalan saling tegak lurus, sehingga material penyerap gelombang elektromagnetik merupakan senyawa komposit yang terdiri-dari material magnetik dan

dielektrik yang harus memiliki nilai koersivitas yang rendah dan saturasi magnetisasi yang tinggi sehingga diharapkan *spin magnetic* dari bahan ini dapat beresonansi dengan gelombang elektromagnetik. Untuk itu, maka perlu memodifikasi dan merekayasa bahan tersebut agar mendapatkan parameter-parameter yang cocok dan tepat untuk mendapatkan penyerapan gelombang elektromagnetik yang maksimal pada daerah frekuensi yang diharapkan. Umumnya, modifikasi dan rekayasa bahan magnetik berbasis ferit ini meliputi proses pembentukan senyawa dan penambahan unsur-unsur lain. Berikut ini adalah beberapa modifikasi dan rekayasa struktur yang pernah dilakukan terhadap bahan magnetik berbasis ferit:

1. Wisnu A. Adi [3] telah melakukan pengembangan bahan magnetik sistem $\text{La}_{(1-y)}\text{Ba}_y\text{Fe}_x\text{Mn}_{1/2(1-x)}\text{Ti}_{1/2(1-x)}\text{O}_3$ dengan variasi $x=0-1,0$ dan $y=0-1,0$. Pembentukan senyawa tersebut melalui proses *mechanical milling*. Efek substitusi ion Fe pada sistem $\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{Fe}_x\text{Mn}_{(1-x)}\text{O}_3$ mengakibatkan permeabilitas bahan menjadi meningkat dan permitivitasnya menurun sedangkan substitusi ion Ti pada

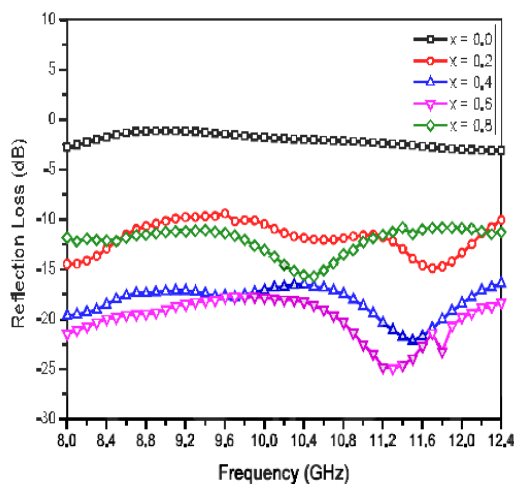
sistem $\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{Ti}_x\text{Mn}_{(1-x)}\text{O}_3$ berpengaruh sebaliknya, menimbulkan permeabilitas bahan yang menurun dan permitivitasnya meningkat. Sehingga atom Mn pada komposisi $\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{Fe}_x\text{Mn}_{1/2(1-x)}\text{Ti}_{1/2(1-x)}\text{O}_3$ disubstitusi oleh Fe dan Ti agar sifat permeabilitas dan permitivitas bahan meningkat. Banyak variasi sampel yang dilakukan pada penelitian tersebut dan hasil yang paling optimal dicapai pada keadaan variasi $y=0,28$ dan $x=0,3$ yaitu pada komposisi $\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{Fe}_{0,3}\text{Mn}_{0,35}\text{Ti}_{0,35}\text{O}_3$ dengan capaian *reflection loss* sebesar -23,5 dB yang artinya terjadi penyerapan sebesar 99,55 %. Keadaan tersebut terjadi pada frekuensi 14,1 GHz dengan ketebalan sampel 1,5 mm seperti yang ditunjukkan oleh gambar 8.



Gambar 8. Kurva RL $(\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2})\text{Fe}_{0,3}\text{Mn}_{0,35}\text{Ti}_{0,35}\text{O}_3$ sebagai fungsi ketebalan [3]

2. Maykel T. E. Manawan [5] melakukan penelitian terhadap sistem nanokomposit hexaferit untuk meningkatkan sifat magnetik dan penyerapan gelombang mikro. Proses yang dilakukan dalam penelitiannya adalah menggunakan teknik *mechanical alloying* dan destruksi ultrasonik daya tinggi dengan mengeksplorasi bahan magnetik $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Ti}_x\text{Mn}_x\text{O}_{19}$ pada variasi $x = 0, 0,2, 0,4, 0,6,$ dan $0,8$. Pembentukan fasa barium hexaferit (BHF) dilakukan melalui proses *ball milling* dengan menggunakan variasi rasio atom Ba dan Fe masing-masing adalah 12, 11 dan 10 dengan variasi lama waktu proses *milling*. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan fasa tunggal BHF karena semakin lama proses *ball milling* menimbulkan adanya puncak Fe_2O_3 akibat terjadi terkikisnya bola-bola baja sewaktu proses *milling*. Fasa tunggal barium heksaferit (BHF) terbentuk pada variasi Ba/Fe = 11 dengan lama waktu *milling* 10 jam dan sintering selama 2 jam pada suhu 1100°C . Sementara, pembentukan nanopartikel dilakukan melalui proses destruksi ultrasonik pada frekuensi tinggi (20 kHz) kemudian

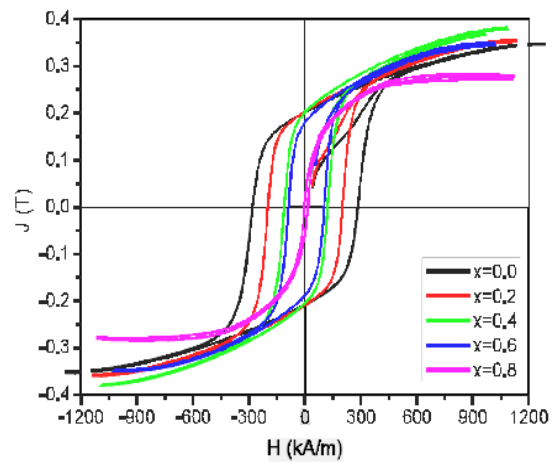
diendapkan selama 48 jam dan hasil endapannya diproses kembali. Hasil pengukuran dengan *particle size analyzer* (PSA) menunjukkan bahwa ukuran partikel mengecil dengan bertambahnya durasi waktu perlakuan ultrasonik. Sifat magnetik BHF mengalami penurunan nilai magnetisasi saturasi dan koersivitas pada variasi $x=0,8$ ketika disubstitusi ion Ti^{2+} dan Mn^{4+} sehingga terjadi perubahan sifat magnetik dari bersifat *hard*-magnetik menjadi *soft*-magnetik. Penyerapan gelombang elektromagnetik yang paling tinggi terjadi pada variasi $x = 0,6$ yaitu $-24,88$ dB atau $99,67$ % terserap oleh material seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Karakterisasi serapan $BaFe_{12-2x}Ti_xMn_xO_{19}$ [5]

Sementara pada $x=0,8$ terjadi penurunan penyerapan karena

kontribusi sifat magnetik yang kecil seperti yang ditunjukkan oleh kurva histeresis pada Gambar 10.



Gambar 10. Kurva histeresis $BaFe_{12-2x}Ti_xMn_xO_{19}$ [5]

3. Ghasemi dkk (2006) dalam penelitiannya telah melakukan rekayasa struktur senyawa $BaFe_{12-x}(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{x/2}O_{19}$ dengan variasi $x= 0, 1, 2$ dan 3 [45]. Pada penelitiannya, substitusi atom Fe dengan Mn, Cu dan Ti melalui proses *mixing* selama 8 jam dan disintering pada temperatur 1250 °C selama 3 jam. Variasi komposisi yang dilakukan dalam penelitiannya adalah komposisi A $[BaFe_{11}(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{1/2}O_{19}]$, komposisi B $[BaFe_{10}(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{2/2}O_{19}]$ dan C $[BaFe_9(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{3/2}O_{19}]$. Perbedaan variasi x pada struktur senyawa tersebut menghasilkan sifat-sifat magnetik, yaitu

magnetisasi remanen (B_r), medan koersivitas (H_c), produk energi maksimum (BH_{max}), dan medan anisotropi (H_s) yang berbeda seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat kemagnetan material $BaFe_{12-x}(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{x/2}O_{19}$ [45]

Comp. (x)	$B_r(T)$	H_cJ (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	H_s (kA/m)
0	0,367	278,5	25,5	944,3
1	0,184	10,4	0,6	961,7
2	0,216	16,3	1,5	956,7
3	0,278	24,2	3,6	954,8

Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa perbedaan variasi x pada komposisi struktur senyawa tersebut mengakibatkan perubahan sifat magnetik yang ditunjukkan oleh nilai permeabilitas relatif (μ_r) yang meningkat dengan nilai x yang semakin besar dan nilai maksimal didapat dari variasi dengan komposisi C. Dengan mengontrol substitusi Mn, Cu, dan Ti terhadap Fe dapat mempengaruhi besarnya penyerapan gelombang elektromagnetik yang terjadi pada frekuensi di atas 15 GHz dengan ketebalan (d_m) 1,8 mm seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-sifat penyerapan gelombang elektromagnetik senyawa $BaFe_{12-x}(Mn_{0,5}Cu_{0,5}Ti)_{x/2}O_{19}$ [45]

Comp. (x)	<i>Electromagnetic wave absorption properties of composites</i>			
	Min. RL value (dB)	d_m (mm) (RL < -20 dB)	f_m (GHz) (min. RL)	Frequency range (GHz) (RL < -20 dB)
0	5,7	1,8	17,75	—
1	22,2	1,8	16,71	0,4
2	51,23	1,8	16,72	2,91
3	51,78	1,8	18,78	2,90

4. T. Kagotani dkk (2004) melakukan modifikasi sistem M-type barium ferit yang disubstitusi Zr^{2+} untuk Fe^{3+} dan La^{3+} untuk Ba^{2+} , dengan senyawa empiris $Ba_{(1-x)}La_xZn_xFe_{(12-x-y)}Zr_{y/2}Mn_{y/2}O_{19}$ ($x = 0,0 - 0,5$; $y = 1,0 - 3,0$) menunjukkan bahwa substitusi La dan penambahan Zn sebagai aditif dapat meningkatkan nilai magnetisasi saturasi (M_s) sebesar 4-5% [46].

Untuk itu, penelitiannya difokuskan pada variasi $x = 0,0$ yaitu struktur senyawa $BaFe_{(12-y)}Zr_{y/2}Mn_{y/2}O_{19}$. Pada variasi y lebih dari 1,5 menginformasikan bahwa elemen aditif tidak mensubstitusi Fe^{3+} dalam struktur ferit tetapi telah tercampur sebagai inklusi dalam sampel. Pengolahan data dari S-parameters yang dihasilkan dari pengukuran menghasilkan besaran permeabilitas ril dan imajiner yang

berbeda seiring dengan perubahan nilai y . Nilai permeabilitas ril dan imajiner untuk masing masing y adalah 7,7 dan 6,7 untuk $y=1,5$ dan 7,2 dan 7,0 untuk $y = 1,4$. Berdasarkan perhitungan maka diperoleh nilai *reflection loss* (RL) lebih kecil dari -20 dB dan besarnya penyerapan gelombang elektromagnetik ini berubah sesuai dengan ketebalan material. Penyerapan terbesar diperoleh pada ketebalan material 0,8 mm pada variasi $y=1,4$.

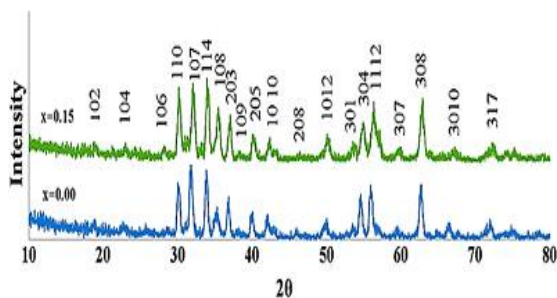
5. Wang Jing dkk (2007) telah melakukan penelitian terhadap sifat penyerapan gelombang mikro melalui substitusi *rare-earth* (RE) dimana RE yang digunakan adalah Dy, Nd, Pr terhadap barium ferit tipe-W [47]. Modifikasi struktur senyawa yang diamati dibagi menjadi 4 variasi, yaitu S1 [Ba(MnZn)_{0,3}Co_{1,4}Fe₁₆O₂₇], S2 [Ba(MnZn)_{0,3}Co_{1,4}Dy_{0,01}Fe_{15,99}O₂₇], S3 [Ba(MnZn)_{0,3}Co_{1,4}Nd_{0,01}Fe_{15,99}O₂₇] dan S4 [Ba(MnZn)_{0,3}Co_{1,4}Pr_{0,01}Fe_{15,99}O₂₇]. Dalam papernya menjelaskan bahwa sebagian kecil ion logam tanah jarang (RE³⁺) dapat menggantikan ion Fe³⁺. Dengan substitusi *rare-earth* (RE) pada Fe mempengaruhi juga sifat dielektrik

dan magnetik struktur senyawa tersebut. Sifat magnetik dengan substitusi Dy pada variasi S2 memiliki nilai permeabilitas ril yang lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa substitusi Dy (S1) sedangkan bagian imajiner nya memiliki nilai kecil pada frekuensi 8 GHz-12 GHz. Sementara untuk sifat dielektrik memiliki nilai permitivitas ril dan imajiner yang lebih kecil dibandingkan dengan S1 pada daerah frekuensi yang sama. Penyerapan gelombang mikro yang terbaik terjadi pada substitusi Dy (S2) sebesar -10 dB pada frekuensi 9,9 GHz dan penyerapan semakin meningkat pada lebar pita 8,16 GHz. Penyerapan tertinggi sebesar -51,92 dB pada struktur material dengan ketebalan 2,1 mm.

6. Amit Arora dan Sukhleen Bindra Narang [48] menjelaskan BHF tanpa *dopping* memiliki karakterisasi serapan pada frekuensi sekitar 45 GHz dan bandwidth-nya yang sempit untuk digunakan sebagai material penyerap gelombang mikro. Untuk memperbaikinya, dilakukan sintesa terhadap senyawa hexaferit dengan formula kimia Ba_(1-2x)La_xNa_xFe₁₀CoZrO₁₉ dengan variasi ($x=0,0$; 0,05 ; 0,10 ; 0,15,

; 0,20, ; 0,25) dengan menggunakan teknik reaksi *solid state* pada temperatur tinggi. Proses kalsinasi dilakukan pada suhu 1250°C selama 8 jam dan 1250°C selama 3 jam.

Hasil studi dengan XRD menggunakan radiasi Cu-K α memperlihatkan bahwa pembentukan fasa yang sama pada variasi $x=0,0$ dan $x=0,15$ dimana munculnya puncak yang sama untuk barium ferit baik yang didoping dan tidak didoping tetapi hanya memberikan perubahan pada intensitasnya dan sedikit pergeseran posisi puncak-puncak difraksinya karena efek substitusi, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Pola difraksi XRD

$\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{CoZrO}_{19}$ ($x=0,00$, dan $0,15$)

Pengaruh substitusi ion La^{3+} dan Na^+ terhadap sifat magnetik dari senyawa $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{CoZrO}_{19}$ ($0,00 \leq x \leq$

$0,25$) adalah penurunan nilai magnetisasi saturasi (M_s) dengan kenaikan nilai x , yaitu 18,95 emu/g untuk $x=0,00$ hingga 11,18 emu/g untuk $x=0,01$ dan kemudian meningkat lagi menjadi 20,91 emu/g pada $x=0,25$ seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat-sifat magnetik $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{CoZrO}_{19}$ dengan perbedaan variasi x [48].

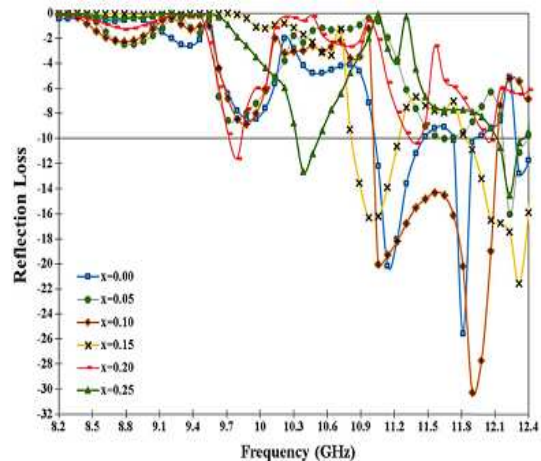
Sample (x)	M_s (emu/g)	H_c (Oe)	M_r (emu/g)	H_a (Oe)	Curie temp. ($^{\circ}\text{C}$)
0,00	18,95	380,52	4,55	384,02	662
0,05	17,28	715,46	6,51	274,25	468
0,10	11,18	1006,69	4,55	297,81	506
0,15	16,26	1297,73	6,82	344,74	536
0,20	18,12	1326,08	7,83	356,91	580
0,25	20,91	1374,80	8,94	415,83	652

Penurunan M_s ini disebabkan oleh adanya peningkatan substitusi ion non magnetik La^{3+} dan Na^+ yang memberikan pelemahan medan magnet internal dan interaksi perpindahan (*super-exchange interaction*) dari $\text{Fe}^{3+}\text{-O-Fe}^{3+}$. Nilai koersivitas (H_c) meningkat dengan bertambahnya fraksi atom substitusi yang disebabkan karena adanya peningkatan nilai *anisotropy field* (H_a). Volume *unit cell* menjadi berkurang karena ukuran ion La^{3+} (1,13 Å) and Na^+ (1,02 Å) lebih kecil dibandingkan dengan ion Ba^{2+} (1,34 Å).

Hasil karakterisasi sifat penyerapan gelombang elektromagnetik diperoleh dengan melakukan pengukuran sampel menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan metode *full-port*. Dari pengukuran tersebut diperoleh S-parameter untuk *reflection* (S11 dan S22) dan *transmission* (S21 dan S22). Dari parameter tersebut maka besarnya *reflection loss* (RL) diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan persamaan 15, 17, 7 dan 8. Pada daerah frekuensi X-band (8,2 GHz-12,4 GHz). Nilai ϵ' untuk seluruh sampel berkisar 6,5-10 dan sisanya hampir bernilai konstan.

Semakin kecil nilai variasi substitusi x pada sampel mengakibatkan nilai ϵ' semakin meningkat disebabkan sifat konduktivitasnya yang menurun. Sedangkan nilai μ' mengalami penurunan dengan kenaikan variasi substitusi x yang disebabkan oleh kerapatan porositas dan *grain boundaries* yang mengalami peningkatan. Untuk menentukan besarnya nilai *reflection loss* (RL) dilakukan pengujian pada ketebalan sampel 1,3 mm dengan variasi nilai x yang

hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 12 dan Tabel 4. Penyerapan tertinggi terjadi pada variasi x = 0,10 dengan reflection loss -30,28 dB pada frekuensi 11,89 GHz.



Gambar 12. Reflection loss terhadap frekuensi pada perbedaan variasi x senyawa $Ba_{(1-2x)}La_xNa_xFe_{10}CoZrO_{19}$ [48]

Tabel 4. Reflection loss pada variasi x

Variasi x	Reflection loss (dB)	Frekuensi (GHz)
0,00	-20,00	11,14
0,05	-16,05	12,23
0,10	-30,28	11,89
0,15	-21,59	12,32
0,20	-10,13	12,06
0,25	-14,52	12,23

V. TEKNIK PENGUKURAN

Pengukuran merupakan salah satu tahapan yang sangat penting dalam proses penelitian untuk mendapatkan karakterisasi material. Berdasarkan literatur yang ada, peralatan ukur yang umumnya digunakan untuk mendapatkan

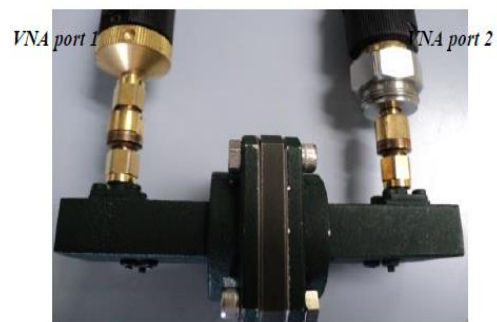
informasi karakterisasi material adalah *x-ray diffraction* (XRD), *particle size analyzer* (PSA), *scanning electron microscopy* (SEM), *permagraph* dan *vector network analyzer*.

Teknik pengukuran yang dibahas dalam bagian ini adalah metode pengukuran dengan menggunakan VNA untuk mendapatkan parameter ϵ , μ dan tingkat penyerapan gelombang elektromagnetik. Prinsip kerja VNA dijelaskan oleh diagram blok pada Gambar 13, dimana sumber gelombang elektromagnetik (gelombang datang) yang berinteraksi dengan *material under test* (MUT) akan mengalami sebagian daya dipantulkan dan sebagian lagi ditransmisikan. Selanjutnya daya yang dipantulkan dan yang ditransmisikan, masing-masing diproses melalui perangkat detektor dan menampilkan informasi MUT dalam bentuk parameter-S dan besaran impedansi. Ada juga VNA yang dilengkapi *optional* untuk pengukuran dielektrik konstan (ϵ) dan permeabilitas (μ) MUT [49].

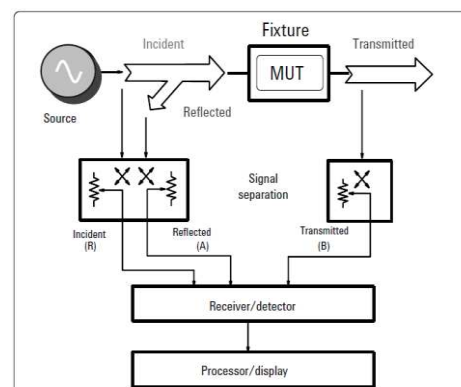
Akan tetapi tidak semua VNA dilengkapi dengan *optional* untuk mengukur nilai-nilai tersebut sehingga data hasil pengukuran parameter-S

harus diolah terlebih dengan metode Nicholson-Ross-Weir (NRW) melalui persamaan 12-17 [36]. Gambar 14 menunjukkan *set-up* pengukuran untuk mendapatkan parameter ϵ dan μ [50]. Dimana λ_0 merupakan panjang gelombang udara, λ_c adalah panjang gelombang *cutoff* dan L adalah tebal dari material.

Pengukuran tingkat penyerapan energi gelombang elektromagnetik dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu metode *one port* VNA dan transmisi gelombang dalam ruangan *anechoic chambers* [51].



Gambar 13. Diagram blok VNA [50]



Gambar 14. Pengukuran dengan *two-port* [50]

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (12)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (13)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (14)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (15)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\epsilon_r^* \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (16)$$

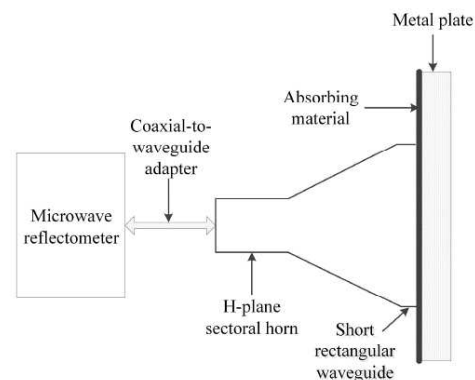
$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \right) \quad (17)$$

5.1 Teknik *one-port*

Pada teknik pengukuran *one port*, sampel harus dilapisi logam *perfect electrical conductor* (PEC) sebagai bahan refleksi sempurna. Sampel dapat berbentuk serbuk, pelet dan material yang dilapiskan pada plat logam. Dengan metode ini gelombang datang akan mengalami pemantulan dan penyerapan oleh objek material sehingga evaluasi gelombang pantul dan gelombang yang diteruskan dapat memberikan informasi mengenai karakter serapan material tersebut.

Ketika medium 1 (material yang diuji) bersifat meneruskan gelombang

datang maka pada medium kedua (*metal plate*) akan merefleksikan kembali gelombang tersebut sehingga nilai *reflection loss*-nya besar. Dan apabila material yang diuji mengalami penyerapan maka gelombang datang tidak akan mengenai plat logam sehingga gelombang yang direfleksikan (*reflection loss*) sangat kecil. Oleh karena itu, teknik pengukuran ini dapat memastikan bahwa RAM yang diuji mengalami penyerapan gelombang elektromagnetik. Skema pengukuran dengan teknik *one-port* ditunjukkan pada Gambar 15 [51] [52].

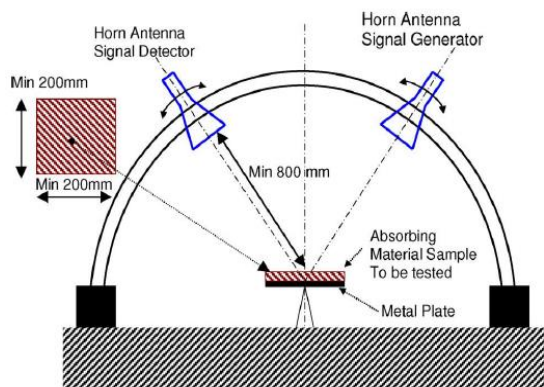


Gambar 15. Skematik pengukuran dengan *one-port* [51]

5.2 Teknik transmisi gelombang

Teknik ini dilakukan dalam ruangan *anechoic chambers* yang dilengkapi dengan dua buah antena sebagai pemancar dan penerima. Jarak antara antena dengan sampel material dapat diatur disesuaikan dengan dimensi

material dan diatur sudut antena pemancar dan antena penerima gelombang. Bagian antena pemancar terhubung dengan signal generator sebagai sumber energi gelombang dan antena penerima terhubung dengan spektrum analyzer sebagai detektor gelombang pantulan. Gambar 16 menunjukkan skema pengukuran dalam ruangan *anechoic chambers* [25].



Gambar 16. Pengukuran di dalam *anechoic chambers* [25]

Prinsip kerja metode ini adalah ketika gelombang datang dari antena pemancar mengenai objek sampel material maka akan mengalami pemantulan dan penyerapan. Gelombang pantul akan dideteksi oleh antena penerima dan hasilnya ditampilkan oleh spektrum analyzer. Besarnya penyerapan gelombang elektromagnetik diperoleh dengan membandingkan besarnya gelombang pantulan yang berasal

dari objek material yang memiliki pantulan sempurna dengan gelombang pantulan yang diakibatkan oleh material uji. Besarnya penyerapan yang terjadi pada sampel material dapat dihitung dari selisih dua gelombang pantulan tersebut.

VI. KESIMPULAN

Dalam kajian pustaka tentang RAM ini telah disampaikan penelitian dan perkembangan material penyerap gelombang elektromagnetik yang bekerja pada daerah frekuensi RADAR. Penelitian dimulai hampir bersamaan dengan penemuan radar pada 1930-an. Telah diperlihatkan bahwa parameter-parameter material yang mempengaruhi sifat penyerapan adalah impedansi, permeabilitas, permitivitas, resistivitas dan ketebalan lapisan bahan penyerap. Parameter-parameter utama tersebut banyak dimiliki oleh bahan berbasis *hexaferrite* yang telah luas dikenal sebagai material keramik magnetik. Umumnya material keramik magnetik yang digunakan adalah *barium* dan *stronsium hexaferrit* atas dasar material tersebut mudah untuk dimodifikasi dan direkayasa strukturnya melalui substitusi oleh ion-

ion lain sehingga sifat magnetik dan dielektriknya berubah. Oleh karena itu, perkembangan RAM saat ini lebih mengarah pada modifikasi dan rekayasa struktur untuk mendapatkan tingkat penyerapan gelombang elektromagnetik yang paling optimal. Perkembangan teknologi radar saat ini adalah mampu mendeteksi gelombang elektromagnetik dengan daya yang sangat kecil maka penelitian untuk menemukan suatu komposisi struktur RAM masih terus dilakukan seiring dengan perkembangan penelitian radar itu sendiri. Pada akhirnya penelitian RAM ini diharapkan menemukan komposisi material yang memiliki karakterisasi *zero reflection* untuk seluruh daerah frekuensi operasi radar dan untuk aplikasi lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Ilmu Bahan-bahan, Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Indonesia dimana penulis sedang menempuh studi S3 melalui jalur riset. Ucapan terima kasih juga penulis tujuakan kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah

menyediakan berbagai fasilitas termasuk fasilitas riset.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Gaylor, "Radar absorbing materials- Mechanisms and materials," *MRL Tec. Rep.*, no. February 1989, pp. 1–36, 1989.
- [2] DSIC21 (IDSORB Series) "Flexible Electromagnetic Wave Absorber" Available : <http://www.mpassociates.com/ebook/files/197912!IDSOB.spec.pdf>
- [3] Tokin, "Anechoic Chamber." [Online]. Available: <http://www.ijnet.or.jp/EMCE>.
- [4] wisnu A. Adi, "Development of Magnetic Material $La_{(1-y)}Ba_yFe_xMn_{1/2(1-x)}Ti_{1/2(1-x)}O_3$ ($x = 0 - 1.0$ and $y = 0 - 1.0$) System As For Electro- magnetic Wave Absorber," Desertasi, FMIPA, Material Sains, Universitas Indonesia 2014.
- [5] Maykel T. E. Manawan, "Peningkatan Sifat Magnetik dan Absorpsi Gelombang Mikro pada Sistem Nanokomposit Berpenguat Hexaferit melalui Proses Mechanical Alloying dan Destruksi UltraSonik Daya Tinggi", Desertasi, FMIPA, Material Sains, Universitas Indonesia 2014.
- [6] K. He *et al.*, "Review of Radar Absorbing Materials Defence R & D Canada – Atlantic," *Def. Res. Dev. Canada*, vol. 60, no. January,

- pp. 551–555, 2005.
- [7] J. W. Tiley, "RADIO WAVE ABSORPTION DEVICE," 2464006, 1949.
- [8] "Radiation-absorbent material - Wikipedia."
- [9] K. B. L. EUGENE F. KNOTT, "Performance Degradation of Jaumann Absorbers due to Curvature," pp. 137–139, 1980.
- [10] H. M. Musal and H. T. Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, no. 5, pp. 3851–3853, 1989.
- [11] Y. Kakimi, N. Yoshida, and I. Fukai, "Analysis of Absorbing Characteristics of Thin-Type," vol. 3, no. 3, pp. 323–328, 1989.
- [12] Y. M. and K. TANOUE, "Electromagnetic Absorption and Shield Properties of Lossy Composite Multilayers," *IEEE Trans.*, pp. 370–374, 1990.
- [13] H. F. Harmuth, "Use of Ferrites for Absorption of Electromagnetic Waves," no. 2, pp. 1984–1986, 1985.
- [14] P. P. S. and J. N. G. P. Srivastava, "Microwave Absorber Composed of Rubber, Carbon and Ferrites," in *Asia-pacific Microwave Conference, Adelaide*, 1992, pp. 239–242.
- [15] L. J. Du Toit, "The Design of Jauman Absorbers," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 36, no. 6, pp. 17–25, 1994.
- [16] B. Chambers, "Symmetrical radar absorbing structures," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 5, pp. 404–405, 1995.
- [17] M. R. Meshram, N. K. Agrawal, B. Sinha, and P. S. Misra, "Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 271, no. 2–3, pp. 207–214, 2004.
- [18] Alexandre R. Bueno, Maria L. Gregori, Maria C.S. No´ brega, "Microwave-absorbing properties of $\text{Ni}_{0.50-x}\text{Zn}_{0.50-x}\text{Me}_{2x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (Me = Cu, Mn, Mg) ferrite–wax composite in X-band frequencies", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320, pp. 864–870, 2008.
- [19] R. Sharma, R. C. Agarwala, and V. Agarwala, "Development of electroless (Ni-P)/ $\text{BaNi}_{0.4}\text{Ti}_{0.4}\text{Fe}_{11.2}\text{O}_{19}$ nanocomposite powder for enhanced microwave absorption," *J. Alloys Compd.*, vol. 467, no. 1–2, pp. 357–365, 2009.
- [20] R. S. Meena, S. Bhattacharya, and R. Chatterjee, "Complex permittivity, permeability and wide band microwave absorbing property of La^{3+} -substituted U-type hexaferrite," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322, no. 14, pp. 1923–1928, 2010.

- [21] X. Yu, G. Lin, D. Zhang, and H. He, "An optimizing method for design of microwave absorbing materials," *Mater. Des.*, vol. 27, no. 8, pp. 700–705, 2006.
- [22] M. Chen, Y. Pei, and D. Fang, "Computational method for radar absorbing composite lattice grids," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 591–594, 2009.
- [23] M. Cao *et al.*, "Computation design and performance prediction towards a multi-layer microwave absorber," *Mater. Des.*, vol. 23, no. 6, pp. 557–564, 2002.
- [24] Q. Zhou, X. Yin, F. Ye, X. Liu, L. Cheng, and L. Zhang, "A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption," *Mater. Des.*, vol. 123, pp. 46–53, 2017.
- [25] D. Micheli *et al.*, "Broadband electromagnetic absorbers using carbon nanostructure-based composites," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 59, no. 10, pp. 2633–2664, 2011.
- [26] P. Kaur, S. Bahel, and S. B. Narang, "Hexagonal Ferrite in 18-40 GHz frequency range," *J. Magn. Mater.*, vol. 15, 2018.
- [27] J.-H. Shin, W.-H. Choi, C.-G. Kim, W.-J. Lee, W.-Y. Lee, and T.-H. Song, "Design of broadband microwave absorber using honeycomb structure," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 4, pp. 292–293, 2014.
- [28] C. Wu *et al.*, "Enhanced and broadband absorber with surface pattern design for X- Band," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 1, pp. 55–60, 2018.
- [29] F. G. Isa Araz, "Development of Broadband Microwave Absorber," *J Supercond Nov Magn Charact.*, pp. 17–21, 2017.
- [30] W. H. Choi, J. H. Shin, T. H. Song, J. B. Kim, W. Y. Lee, and C. G. Kim, "A thin hybrid circuit-analog (CA) microwave absorbing double-slab composite structure," *Compos. Struct.*, vol. 124, pp. 310–316, 2015.
- [31] H. Xu, S. Bie, Y. Xu, W. Yuan, Q. Chen, and J. Jiang, "Broad bandwidth of thin composite radar absorbing structures embedded with frequency selective surfaces," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 80, pp. 111–117, 2016.
- [32] D. S. Costa, E. L. Nohara, and M. C. Rezende, "Comparative study of experimental and numerical behaviors of microwave absorbers based on ultrathin Al and Cu films," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 194, pp. 322–326, 2017.
- [33] Z. Yang, F. Luo, W. Zhou, H. Jia, and D. Zhu, "Design of a thin and broadband microwave absorber using double layer frequency selective surface," *J. Alloys*

- Compd.*, vol. 699, pp. 534–539, 2017.
- [34] F. Wang *et al.*, “Design of an ultra-thin absorption layer with magnetic materials based on genetic algorithm at the S band,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 451, pp. 770–773, 2018.
- [35] P. Dixon, “THEORY AND APPLICATIN OF RF/MICROWAVE ABSORBERS.”
- [36] K. C. Yaw (Rohde&Schwarz), “Measurement of Dielectric Material Properties,” *Meas. Tech.*, pp. 1–35, 2006.
- [37] Y. S. Lee *et al.*, “Single Layer Microwave Absorber Based on Rice Husk-MWCNTs Composites”, vol. 11, no. 14, pp. 8932–8937, 2016.
- [38] H. Liu, L. Zhang, Y. Gao, Y. Shen, and D. Shi, “Electromagnetic Wave Absorber Optimal Design Based on Improved Particle Swarm Optimization,” *EMC’09/Kyoto*, pp. 797–800, 2009.
- [39] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edi. John Wiley & Sons, 2012.
- [40] Z. Ma, C. T. Cao, Q. F. Liu, and J. B. Wang, “A new method to calculate the degree of electromagnetic impedance matching in one-layer microwave absorbers,” *Chinese Phys. Lett.*, vol. 29, no. 3, pp. 3–6, 2012.
- [41] M. Jalali, “Improving Electromagnetic Shielding with Metallic Nanoparticles,” Concordia University, 2013.
- [42] W. Meng, D. Yuping, L. Shunhua, L. Xiaogang, and J. Zhijiang, “Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 20, pp. 3442–3446, 2009.
- [43] X. Tang and K. ao Hu, “Preparation and electromagnetic wave absorption properties of Fe-doped zinc oxide coated barium ferrite composites,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 139, no. 2–3, pp. 119–123, 2007.
- [44] J. Dho, E. K. Lee, J. Y. Park, and N. H. Hur, “Effects of the grain boundary on the coercivity of barium ferrite BaFe₁₂O₁₉,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 285, no. 1–2, pp. 164–168, 2005.
- [45] A. Ghasemi, A. Hossienpour, A. Morisako, A. Saatchi, and M. Salehi, “Electromagnetic properties and microwave absorbing characteristics of doped barium hexaferrite,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 302, no. 2, pp. 429–435, 2006.
- [46] T. Kagotani, D. Fujiwara, S. Sugimoto, K. Inomata, and M. Homma, “Enhancement of GHz

- electromagnetic wave absorption characteristics in aligned M-type barium ferrite $Ba_{1-x}La_xZn_xFe_{12-x-y}(Me_{0.5}Mn_{0.5})_yO_{19}$ ($x = 0.0-0.5$; $y = 1.0-3.0$, Me: Zr, Sn) by metal substitution," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 272–276, no. SUPPL. 1, pp. 2003–2005, 2004.
- [47] W. Jing, Z. Hong, B. Shuxin, C. Ke, and Z. Changrui, "Microwave absorbing properties of rare-earth elements substituted W-type barium ferrite," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 312, no. 2, pp. 310–313, 2007.
- [48] A. Arora and S. B. Narang, "Investigation of Microwave Absorptive Behavior of La-Na Substituted M-Type Co-Zr Barium Hexaferrites in X-Band," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 29, no. 11, pp. 2881–2886, 2016.
- [49] A. Note, "Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials."
- [50] K. Y. You *et al.*, "Dielectric measurements for low-loss materials using transmission phase-shift method," *J. Teknol.*, vol. 77, no. 10, pp. 69–77, 2015.
- [51] J. Stanier, "The use of Vector Analyzer for Measuring The performance of Radar Absorbing Material," p. 12, 1994.
- [52] S. Guan, Y. Wang, and D. Jia, "A Field Performance Evaluation Scheme for Microwave-Absorbing Material Coatings," *Coatings*, vol. 7, no. 3, p. 38, 2017.