

TINJAUAN KOMPARATIF KINERJA RAM: FERRITE-KARBON HIBRIDA PADA RENTANG RADAR

Dira Yudha Ary Yulianto¹, Mirad Fahri², Yusuf Bramastya Apriliyanto³
dirayudha1@gmail.com¹, miradfahri@gmail.com², yusuf.bramastya@gmail.com³
 Universitas Pertahanan

Article Info

Article history:

Published Mei 31, 2026

Kata Kunci:

Bahan Penyerap Radar (RAM), Komposit Ferit-Karbon, Polianilin (PANI), PVDF, Barium Heksaferrit (Bam), Rugi-Rugi Refleksi (RL), Bandwidth Efektif, X-Band, Ku-Band, Pencocokan Impedansi, Doping Tanah Jarang, Struktur Core-Shell, Stealth 5G, Efektivitas Perisai.

Keywords:

Radar Absorbing Materials (RAM), Ferrite-Carbon Composites, Polyaniline (PANI), PVDF, Barium Hexaferrite (Bam), Reflection Losses (RL), Effective Bandwidth, X-Band, Ku-Band, Impedance Matching, Rare Earth Doping, Core-Shell Structure, 5G Stealth, Shielding Effectiveness.

ABSTRAK

Radar absorbing material (RAM) mengurangi radar cross section (RCS) pada platform stealth dengan mengubah energi gelombang elektromagnetik menjadi panas melalui loss magnetik dan loss dielektrik. Kajian komparatif ini menganalisis kinerja RAM berbasis ferrite ($BaFe_{12}O_{19}$, $BaTiO_3$), Fe-based, karbon (MWCNT, GO), serta komposit matriks polimer (PANI, PVDF, epoxy, PPy) dengan filler hibrida pada S-band, X-band, dan Ku-band. Parameter utama meliputi konstanta dielektrik/magnetik kompleks, reflection loss (RL) minimum, bandwidth efektif ($RL \leq -10$ dB), ketebalan lapisan, densitas, dan konfigurasi (single/multilayer). Ferrite unggul pada frekuensi rendah namun densitas tinggi, karbon ringan dan tipis tapi butuh matching impedansi presisi, sedangkan hibrida seperti PANI/ $BaFe_{12}O_{19}$ mencapai $RL < -50$ dB dengan bandwidth lebar. Doping (La, Zr, Ru) dan core-shell tingkatkan efisiensi tipis (≤ 3 mm). Kain GO- $BaFe_{12}O_{19}$ beri shielding effectiveness >60 dB multifungsi. Hasil tunjukkan PANI paling optimal untuk penyerapan puncak, PVDF untuk struktur tipis, merekomendasikan riset skalabilitas dan prototipe RCS.

ABSTRACT

Radar absorbing materials (RAMs) reduce radar cross section (RCS) on stealth platforms by converting electromagnetic wave energy into heat through magnetic and dielectric losses. This comparative study analyzes the performance of ferrite-based RAMs ($BaFe_{12}O_{19}$, $BaTiO_3$), Fe-based RAMs, carbon RAMs (MWCNT, GO), and polymer matrix composites (PANI, PVDF, epoxy, PPy) with hybrid fillers in the S-band, X-band, and Ku-band. Key parameters include complex dielectric/magnetic constant, minimum reflection loss (RL), effective bandwidth ($RL \leq -10$ dB), layer thickness, density, and configuration (single/multilayer). Ferrite excels at low frequencies but has high density, carbon is light and thin but requires precise impedance matching, while hybrids such as PANI/ $BaFe_{12}O_{19}$ achieve $RL < -50$ dB with wide bandwidth. Doping (La, Zr, Ru) and core-shell enhance the efficiency of thin (≤ 3 mm) GO- $BaFe_{12}O_{19}$ fabrics provide multifunctional shielding effectiveness of >60 dB. Results show PANI is optimal for peak absorption, PVDF for thin structures, recommending scalability research and RCS prototypes.

1. PENDAHULUAN

Radar absorbing material (RAM) dikembangkan secara khusus untuk menyerap gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi radar (2–18 GHz), sehingga mengurangi secara signifikan energi yang dipantulkan kembali ke antenna radar [24]. Penurunan energi pantul ini secara langsung berkorelasi dengan berkurangnya radar cross section (RCS), yaitu parameter kuantitatif yang mengukur “ukuran efektif” pantulan suatu objek terhadap radar [25]. Platform militer seperti pesawat tempur F-35 Lightning II, kapal selam kelas Virginia, dan kendaraan taktis Stryker memanfaatkan RAM sebagai elemen kritis dalam arsitektur stealth untuk mencapai RCS minimal tanpa mengorbankan integritas struktural, performa aerodinamika, atau fungsi operasional. Secara fundamental, pengurangan RCS dapat dicapai melalui dua strategi utama yang saling melengkapi, yaitu rekayasa bentuk geometris objek (shaping) dan aplikasi lapisan penyerap gelombang (RAM) [26]. Pendekatan shaping melibatkan modifikasi kontur permukaan dan sudut insiden untuk membelokkan gelombang radar menjauhi antenna pemancar melalui prinsip geometri refleksi, seperti penggunaan permukaan miring, edge alignment, dan planform alignment yang telah diterapkan pada pesawat F-117 Nighthawk dan B-2 Spirit. Namun, strategi ini memiliki keterbatasan signifikan terkait kebutuhan aerodinamika, distribusi beban struktural, volume internal sistem avionik, dan kompromi fungsional lainnya. Sebaliknya, lapisan RAM diterapkan sebagai pelapis fungsional pada permukaan untuk menyerap energi gelombang yang mengenai objek, mengonversi energi elektromagnetik menjadi panas melalui disipasi dielektrik dan magnetik di dalam material, sehingga residual pantulan menjadi sangat rendah.

Kinerja RAM pada dasarnya ditentukan oleh karakteristik elektromagnetik material, khususnya permittivitas kompleks ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) dan permeabilitas kompleks ($\mu_r = \mu' - j\mu''$), yang secara kolektif mengontrol kondisi matching impedansi antara medium udara ($Z_0 \approx 377 \Omega$) dan lapisan penyerap [27]. Matching impedansi yang optimal ($Z_{in} \approx Z_0$) meminimalkan koefisien refleksi di antarmuka udara-material dan memaksimalkan transmisi gelombang ke dalam lapisan untuk kemudian diredam secara internal. Dalam perspektif desain aplikasi, RAM yang layak harus mencapai reflection loss (RL) yang superior (sangat negatif, idealnya $RL \leq -20$ dB untuk penyerapan $\geq 99\%$ energi insiden) pada pita frekuensi radar operasional seperti S-band (2–4 GHz), C-band (4–8 GHz), X-band (8–12 GHz), dan Ku-band (12–18 GHz), dengan ketebalan lapisan minimal (≤ 3 mm untuk aerospace), densitas rendah (≤ 3 g/cm³), serta stabilitas termal dan mekanik yang memadai untuk kondisi operasional ekstrem. Seiring perkembangan material science, berbagai kelas RAM telah dikembangkan dengan mekanisme absorpsi spesifik untuk memenuhi spektrum tuntutan tersebut. Sistem berbasis ferrite dan material Fe based, seperti barium hexaferrite (BaFe₁₂O₁₉), nikel ferrite (NiFe₂O₄), cobalt ferrite (CoFe₂O₄), dan magnetite (Fe₃O₄), memanfaatkan loss magnetik dominan melalui fenomena natural resonance, domain wall resonance, serta eddy current loss yang efektif pada frekuensi mikro hingga milimeter wave [28]. Sementara itu, material berbasis karbon seperti carbon black, graphene nanoplatelets, dan reduced graphene oxide (rGO) mengandalkan loss dielektrik melalui konduktivitas listrik, polarisasi antarmuka, dan struktur nano-porous yang memicu multiple internal reflection serta conductive network loss. Kedua kelas ini masing-masing memiliki trade-off: ferrite menawarkan absorpsi kuat pada frekuensi rendah dengan densitas tinggi, sedangkan karbon unggul pada ketebalan tipis dan bobot ringan tetapi kurang efektif pada matching impedansi frekuensi rendah [29].

Untuk mengatasi keterbatasan masing-masing kelas, komposit polymer matrix dengan pengisi (filler) ferrite, logam, dan karbon telah muncul sebagai solusi hibrid generasi terbaru. Matriks polimer seperti epoxy resin, polyurethane (PU), polyvinylidene fluoride

(PVDF), atau polyaniline (PANI) berfungsi sebagai pengikat ringan yang fleksibel dan mudah dibentuk, sementara filler ferrite/Fe based menyumbang loss magnetik, dan filler karbon memberikan loss dielektrik tambahan beserta peningkatan konduktivitas [30]. Sistem hibrid seperti $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{epoxy}$ atau $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CNT}/\text{PU}$ memungkinkan tuning simultan terhadap reflection loss, bandwidth, ketebalan, dan densitas melalui pengaturan fraksi volume, morfologi filler (nanopartikel, nanofiber, nanosheet), serta orientasi spasial dalam matriks, sekaligus memfasilitasi aplikasi praktis melalui teknik spray coating, vacuum infusion, atau additive manufacturing. Meskipun kemajuan signifikan telah dicapai, literatur menunjukkan bahwa penelitian RAM masih menghadapi tantangan penting. Hasil eksperimen sering kali sulit dibandingkan langsung karena variasi jenis material, metode sintesis (kopresipitasi kimia, sol-gel, hydrothermal, mechanical alloying, in situ polimerisasi), dan konfigurasi lapisan (single layer konvensional, multilayer Dallenbach/Salisbury/Jaumann, atau metamaterial absorber berbasis split-ring resonator) [31]. Sejumlah review sistematis mengindikasikan bahwa kajian ferrite/Fe based, karbon, dan komposit hibrid sering terpisah-pisah, sehingga analisis komparatif lintas kelas material dalam parameter standar (RL, bandwidth, ketebalan, densitas) masih terbatas, apalagi dengan pertimbangan trade-off aplikasi stealth seperti sudut insiden oblique, polarisasi silang, dan skalabilitas industri. Berdasarkan kesenjangan tersebut, kajian ini bertujuan untuk: (i) mengulas secara mendalam karakteristik elektromagnetik dan kinerja eksperimental RAM berbasis ferrite dan Fe based beserta komposit polymer matrix dengan filler ferrite/logam/karbon, (ii) membandingkannya secara kuantitatif dengan sistem RAM berbasis karbon dalam hal reflection loss minimum, bandwidth efektif.

2. METODOLOGI

Kajian ini disusun melalui pendekatan literatur sistematis untuk menganalisis serta membandingkan kinerja berbagai radar absorbing material (RAM) berbasis ferrite dan Fe based, RAM berbasis karbon, serta komposit polymer matrix yang mengandung filler ferrite, logam, dan/atau karbon. Fokus analisis diarahkan pada hubungan antara sifat elektromagnetik material (permittivitas dan permeabilitas kompleks), karakteristik morfologi dan struktur (ukuran partikel, porositas, bentuk dan distribusi filler), konfigurasi lapisan (single layer, multilayer, serta struktur khusus seperti Dallenbach dan Salisbury), dan respons penyerapan gelombang mikro yang direpresentasikan oleh parameter reflection loss (RL), lebar bandwidth efektif, ketebalan lapisan optimum, dan densitas material. Literatur yang dianalisis terutama berasal dari periode 2015–2025 untuk merepresentasikan perkembangan terkini dalam desain dan aplikasi RAM, sedangkan referensi yang lebih lama digunakan secara selektif sebagai dasar konseptual untuk teori penyerapan gelombang elektromagnetik, desain struktur penyerap, dan klasifikasi material penyerap gelombang.

Analisis difokuskan pada perbandingan parameter kinerja utama yang dilaporkan dalam studi eksperimental, meliputi nilai RL minimum, frekuensi puncak penyerapan, lebar bandwidth pada kriteria $\text{RL} \leq -10$ dB, ketebalan lapisan yang digunakan untuk mencapai kondisi optimum, serta densitas. Selain itu, metode sintesis yang digunakan pada masing-masing sistem RAM, seperti kopresipitasi, sol-gel, hydrothermal, mechanical milling, in situ polimerisasi, dan teknik komposit lainnya, dievaluasi secara komparatif untuk melihat pengaruhnya terhadap homogenitas struktur, ukuran dan distribusi partikel, sifat magnetik dan dielektrik, serta kemampuan material untuk mencapai matching impedansi. Desain struktur lapisan, mencakup konfigurasi single layer konvensional, double layer Dallenbach, Salisbury screen, Jaumann absorber, serta metamaterial absorber, juga dianalisis untuk menjelaskan bagaimana variasi susunan lapisan, pemilihan konstanta dielektrik/magnetik

tiap lapisan, dan pengaturan ketebalan berkontribusi terhadap peningkatan penyerapan dan perluasan bandwidth.

Dalam konteks mekanisme penyerapan, kajian ini menelaah kontribusi berbagai mekanisme utama pada masing masing kelas material, seperti loss magnetik (natural resonance, domain wall resonance, dan eddy current loss) yang dominan pada sistem ferrite dan Fe based, loss dielektrik (polarisasi antarmuka, dipolar polarization, dan conduction loss) pada sistem berbasis karbon dan polimer konduktif, serta fenomena multiple scattering dan resonansi geometrik pada struktur berpori atau hierarkis. Mekanisme mekanisme tersebut dibandingkan untuk menjelaskan perbedaan performa antara RAM berbasis ferrite/Fe based, RAM berbasis karbon, dan RAM komposit hibrid pada kondisi frekuensi, ketebalan, dan konfigurasi lapisan yang sebanding, dengan penekanan pada trade off antara nilai RL, bandwidth, dan ketebalan.

Dalam konteks keberlanjutan dan kelayakan aplikatif, kajian ini juga mencakup aspek proses dan material yang relevan untuk implementasi skala besar, antara lain ketersediaan dan biaya bahan baku (misalnya ferrite dari sumber mineral lokal, karbon yang berasal dari limbah biomassa atau sumber terbarukan, serta monomer polimer komersial), kompleksitas tahapan sintesis dan fabrikasi (jumlah langkah proses, kebutuhan suhu dan tekanan tinggi, serta penggunaan pelarut atau bahan kimia berbahaya), dan potensi penerapan lapisan pada substrat nyata seperti baja, aluminium, atau komposit struktural. Aspek aspek tersebut dianalisis secara kualitatif berdasarkan informasi yang disajikan pada masing masing publikasi, dengan mempertimbangkan kebutuhan bahan kimia tambahan, konsumsi energi proses, serta kemampuan desain untuk mencapai kombinasi kinerja tinggi (RL besar, bandwidth lebar) pada ketebalan dan densitas yang tetap rendah, sehingga material yang diulas tidak hanya unggul secara teknis di laboratorium, tetapi juga realistis untuk diimplementasikan dalam aplikasi stealth dan pengendalian interferensi elektromagnetik di lingkungan industri dan pertahanan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Contoh sistem RAM berbasis ferrite/Fe-based dan komposit karbon dari literatur

No Jurnal	Sistem RAM	Bahan utama	Jenis bahan	Informasi kinerja
1	La-doped BaM/PANI	BaFe ₁₂ O ₁₉ (doping La) + polianilin	Ferrite + polimer konduktif	Doping La dan karboksilasi permukaan meningkatkan polarisasi antarmuka sehingga memperbaiki penyerapan gelombang mikro dan pencocokan impedansi.
2	MnZn ferrite-PANI	MnZn ferrite + polianilin	Ferrite + polimer konduktif	Lapisan PANi meningkatkan konduktivitas dan sifat magnetik untuk penyerapan gelombang.
3	PANI-coated Ba _{0.9} La _{0.1} Fe _{11.9} Ni _{0.1} O ₁₉ /rGO	Ferrite + PANI + rGO	Ferrite + polimer + karbon 2D	RL min -49.1 dB pada 14.08 GHz dengan ketebalan 1.9 mm.

No Jurnal	Sistem RAM	Bahan utama	Jenis bahan	Informasi kinerja
4	Ni-Mn ferrite/rGO	Ni-Mn ferrite + rGO	<i>Ferrite</i> + karbon 2D	Konduktivitas dan kapasitansi tinggi. Berpotensi untuk penyerapan gelombang EM.
5	NiO-ZnO/PPy-PANI	NiO + ZnO + PPy/PANI	Komposit multi-fase	Kombinasi oksida logam dan polimer meningkatkan sifat redoks, transfer muatan, dan potensi penyerapan gelombang elektromagnetik.

Tabel 1 merangkum beberapa sistem RAM berbasis *ferrite* dan komposit konduktif yang dilaporkan dalam literatur dengan informasi kinerja seperti *reflection loss* (RL), frekuensi, dan ketebalan. Sistem *La-doped* BaM/PANI menunjukkan bahwa doping La dan modifikasi permukaan meningkatkan polarisasi antarmuka serta pencocokan impedansi sehingga penyerapan gelombang mikro menjadi lebih efektif, sedangkan MnZn ferrite-PANI menegaskan peran *ferrite* sebagai penyerap magnetik dan PANi sebagai peningkat konduktivitas serta *bandwidth*. Kinerja optimal terlihat pada komposit berbasis *ferrite* yang dikombinasikan dengan karbon 2D seperti rGO, khususnya PANI-coated yang mencapai RL minimum -49.1 dB pada 14.08 GHz dengan ketebalan 1.9 mm, menunjukkan sinergi antara loss magnetik dan dielektrik. Selain itu, sistem Ni-Mn ferrite/rGO dan komposit multi-fase NiO-ZnO/PPy-PANI memperlihatkan bahwa kombinasi oksida logam, polimer konduktif, dan karbon mampu meningkatkan transfer muatan, polarisasi antarmuka, serta *multiple scattering*, sehingga secara keseluruhan meningkatkan efisiensi penyerapan gelombang elektromagnetik dan memperluas rentang frekuensi kerja.

Tabel 2. Karakteristik material RAM berdasarkan metode sintesis

No Jurnal	Material RAM	Metode sintesis	Kategori	Kinerja penyerapan
6	<i>La-doped BaFe₁₂O₁₉ (La-BaM) dan polyaniline (PANI)</i>	<i>sol-gel</i>	<i>Magnetic-dielectric composite</i>	Komposit La-BaM/PANI dengan 10% La (M1-C) dan 50% La (M5-C) menunjukkan <i>reflection loss</i> sangat baik, masing-masing sekitar $-47,83$ dB dan $-43,53$ dB, dengan bandwidth absorpsi sekitar $3,98$ GHz dan $3,43$ GHz, sehingga mampu menyerap

No Jurnal	Material RAM	Metode sintesis	Kategori	Kinerja penyerapan
				sekitar 99,99% gelombang mikro yang datang dan berpotensi tinggi sebagai material penyerap gelombang <i>X-band</i> .
7	$BaFe_{12-x}Zr_xO_{19}$	<i>Sol-gel</i>	<i>Single-phase M-type barium ferrite</i>	Doping Zr^{4+} pada $BaFe_{12-x}Zr_xO_{19}$ menghasilkan <i>reflection loss</i> sekitar -50 dB dalam rentang <i>milimeter-wave</i> dengan <i>bandwidth</i> absorpsi sekitar 12 GHz ($RL < -10$ dB), serta ketebalan <i>matching</i> yang sangat tipis sekitar 1 mm, sehingga material ini sangat potensial sebagai penyerap gelombang <i>mm-wave</i> .
8	$BaFe(12-2x)Sn_xZn_xO_{19}$	<i>Mechanical alloying</i>	<i>Single-phase M-type barium ferrite dengan co-doping Zn^{2+}-Sn^{4+}</i>	Komposisi $BaFe(12-2x)Sn_xZn_xO_{19}$ dengan $x = 0,35$ memberikan <i>reflection loss</i> sekitar -28,1 dB pada <i>X-band</i> dengan <i>bandwidth</i> absorpsi sekitar 3,1 GHz, serta impedansi masukan yang hampir cocok dengan 50 Ω , sehingga material ini cocok sebagai penyerap gelombang <i>mikro X-band</i> .

No Jurnal	Material RAM	Metode sintesis	Kategori	Kinerja penyerapan
9	$SrFe_{12-x}Ru_xO_{19}$ dan $BaFe_{12-x}Ru_xO_{19}$	Kalsinasi keramik (solid-state sintering)	Single-phase M-type hexaferrite dengan dopan Ru^{4+}	Pada $SrFe_{12-x}Ru_xO_{19}$ dengan $0,5 \leq x \leq 1,5$, diperoleh <i>reflection loss</i> ≤ -10 dB di rentang 0,1–18 GHz, dengan RL optimum sekitar -32 dB pada $x = 1,0$ dan 1,3 serta bandwidth terlebar sekitar 6,55 GHz pada $x = 1,0$ (ketebalan 2,3 mm); untuk $x = 0,5$, $RL \leq -10$ dB terjadi pada 14,2–18 GHz, sehingga doping Ru menjadikan $SrFe_{12-x}Ru_xO_{19}$ sebagai material penyerap gelombang efektif dalam rentang 4,0–18 GHz.
10	Komposit PANI/ $BaFe_{12}O_{19}$	In-situ polymerization	Ceramic-polymer composite	Komposit PANI/ $BaFe_{12}O_{19}$ mampu mencapai <i>reflection loss</i> sekitar -59,92 dB pada ketebalan penyerap 1,0–5,0 mm dengan kandungan komposit hanya 30 wt% dalam matriks parafin, serta menunjukkan bandwidth absorpsi cukup lebar di rentang 8,12–13,44 GHz dengan $RL < -10$ dB, sehingga komposit ini memiliki potensi tinggi sebagai material penyerap gelombang mikro X-band.

No Jurnal	Material RAM	Metode sintesis	Kategori	Kinerja penyerapan
11	komposit berlapis (<i>single-layer</i> dan <i>double-layer</i>) yang dilapisi Barium ferrite ($BaFe_{12}O_{19}$) dan Graphene oxide (GO).	Coating strategy (lapisan $BaFe_{12}O_{19}$ dan GO) diterapkan pada permukaan kain komposit	Flexible textile-based composite	Double-layer kain komposit dengan GO sebagai lapisan atas dan $BaFe_{12}O_{19}$ sebagai lapisan bawah mencapai <i>shielding effectiveness</i> (SE) sekitar 66,57 dB pada ketebalan hanya 1,1 mm, serta mencatat minimum <i>reflection loss</i> (RL) -11,41 dB pada 1,33 GHz, menunjukkan kinerja pelindung dan penyerap elektromagnetik yang sangat baik pada frekuensi rendah.

Tabel 2 mengelompokkan material RAM berdasarkan metode sintesis utama. Secara keseluruhan, keenam jenis material RAM ini menunjukkan kinerja penyerapan dan perlindungan gelombang elektromagnetik yang kuat, namun dengan karakteristik yang saling melengkapi dan berbeda tergantung pada komposisi, struktur, metode sintesis, dan kategorinya: komposit *La doped BaFe₁₂O₁₉/PANI* sebagai *magnetic-dielectric composite* memberikan *reflection loss* sangat tinggi (sekitar -47,83 dB) dengan *bandwidth* relatif lebar di *X band* ($\pm 3,98$ GHz), menunjukkan bahwa kombinasi ferit magnetik dengan polimer konduktif sangat efektif untuk meningkatkan penyerapan; sementara *BaFe_{12-x}Zr_xO₁₉* (*M ferrite* dengan *doping* Zr^{4+}) memanfaatkan peningkatan permitivitas dan *multi resonance permeability* untuk mencapai RL sekitar -50 dB dengan *bandwidth* sangat lebar ± 12 GHz di *millimeter wave*, sekaligus memungkinkan ketebalan *matching* yang sangat tipis (sekitar 1 mm), menjadikannya sangat efisien untuk desain tipis di frekuensi tinggi; *BaFe(12-2x)Sn_xZn_xO₁₉* yang disintesis dengan *mechanical alloying* sebagai *M ferrite* dengan *co doping* Zn^{2+} - Sn^{4+} menunjukkan kinerja menengah dengan RL sekitar -28,1 dB dan *bandwidth* $\pm 3,1$ GHz di *X band*, cocok sebagai ferit lunak dengan *impedance matching* yang baik meskipun bukan kinerja tertinggi; komposit *PANI/BaFe₁₂O₁₉* dengan *in situ polymerization* mencatat RL tertinggi dalam daftar ini (sekitar -59,92 dB) dengan kandungan komposit hanya 30 wt% dalam parafin dan *bandwidth* $\pm 8,12$ -13,44 GHz, menunjukkan kombinasi unggulan antara keramik ferit dan polimer konduktif untuk penyerap *X band* berbasis matriks padat; *SrFe_{12-x}Ru_xO₁₉/BaFe_{12-x}Ru_xO₁₉* sebagai *M type hexaferrite* dengan *doping* Ru^{4+} mampu menyerap gelombang dalam rentang 0,1-18 GHz dengan RL optimum sekitar -32 dB dan *bandwidth* hingga $\pm 6,55$ GHz, sehingga unggul sebagai material dengan cakupan frekuensi sangat luas meskipun kinerja puncaknya lebih rendah dibanding *PANI/BaFe₁₂O₁₉*; sedangkan komposit berlapis *BaFe₁₂O₁₉-GO* pada kain fleksibel tidak hanya menawarkan RL sekitar -11,41 dB pada 1,33 GHz tetapi juga

shielding effectiveness sangat tinggi ($\pm 66,57$ dB) pada ketebalan tipis 1,1 mm, plus ketahanan UV, stabilitas mekanik, dan fitur *stealth* inframerah, menjadikannya kombinasi unik antara fleksibilitas, perlindungan elektromagnetik di frekuensi rendah, dan fungsi *multi purpose* untuk aplikasi PPE dan pelindung perangkat di era 5G. Dengan demikian, jika dinilai dari kinerja penyerap puncak dan lebar *bandwidth* di *X band*, komposit PANI/BaFe₁₂O₁₉ dan BaFe_{12-x}Zr_xO₁₉ berada di posisi terdepan, sedangkan kain komposit GO-BaFe₁₂O₁₉ unggul dari sisi fleksibilitas, tipis, dan multifungsi, sehingga keduanya menjadi kandidat utama untuk aplikasi praktis di perangkat elektronik terintegrasi dan perlindungan manusia modern.

Tabel 3. Karakteristik polimer dalam material RAM

No	Jenis polimer	Material pengisi	Kinerja
12	Polyaniline (PANI)	BaFe ₁₂ O ₁₉	Komposit PANI/BaFe ₁₂ O ₁₉ menunjukkan <i>reflection loss</i> maksimum mencapai $-59,92$ dB pada ketebalan penyerap 1,0–5,0 mm.
13	Polyvinylidene fluoride (PVDF)	BaFe ₁₂ O ₁₉	Pada ketebalan 1,5 mm dengan rasio BaFe ₁₂ O ₁₉ : PVDF = 1 : 1,0, komposit mencapai minimum <i>reflection loss</i> sekitar $-58,04$ dB dengan EAB ($RL \leq -10$ dB) sekitar 5,53 GHz pada rentang frekuensi 11,65–15,63 GHz dan 16,36–17,91 GHz.
14	Epoxy resin	BaTiO ₃ /BT	Komposit BT/epoxy resin menunjukkan $RL > -10$ dB (artinya cukup baik untuk penyerapan/gelombang terbimbing) di rentang frekuensi luas dalam <i>X-band</i> dan <i>Ku-band</i> (8,0–18,5 GHz), dengan RL lebih baik pada konsentrasi BT yang lebih rendah karena peningkatan impedansi matching.
15	Polyaniline (PANI)	Barium hexaferrite nanopowders (BaM)	Komposit La-BaM/PANI menunjukkan <i>reflection loss</i> maksimum sekitar $-63,6$ dB pada 7,76 GHz dengan ketebalan optimal 3,28 mm.
16	Polypyrrole (PPy)	Barium hexaferrite (BaM/BaFe ₁₂ O ₁₉)	Pada ketebalan 3,5 mm, komposit BT/BaM/CNT@PPy, BT@PPy/BaM/CNT, dan BT/BaM@PPy/CNT menunjukkan RL minimum sekitar $-3,7$ dB, -5 dB, dan $-5,68$ dB, masing-masing.

Tabel 3 menyajikan polimer yang benar-benar disebutkan dalam literatur. Secara keseluruhan, kelima komposit ini menunjukkan bahwa kombinasi BaFe₁₂O₁₉ (BaM) dengan matriks polimer konduktif menghasilkan kinerja penyerap gelombang yang sangat baik, namun dengan karakteristik yang berbeda tergantung pada jenis polimer dan desain struktur; komposit PANI/BaFe₁₂O₁₉ (No. 12) menampilkan RL tertinggi sekitar $-59,92$ dB dengan rentang ketebalan yang fleksibel (1,0–5,0 mm), sehingga sangat efektif di *X band* dengan kombinasi *loss* magnetik BaM dan *loss* dielektrik PANI; komposit BaFe₁₂O₁₉@PVDF (No. 13) dengan struktur *core-shell* mendekati performa setara dengan

RL sekitar $-58,04$ dB pada ketebalan tipis $1,5$ mm dan EAB sekitar $5,53$ GHz di *X band* dan *Ku band*, menunjukkan bahwa PVDF sebagai matriks dielektrik tipis mampu memberikan *impedance matching* yang baik; komposit *BT/epoxy* (No. 14) memiliki $RL < -10$ dB yang cukup baik di rentang $8,0-18,5$ GHz, tetapi dengan nilai absorpsi lebih rendah karena $BaTiO_3$ berada dalam fase kubik paraelektrik, sehingga lebih berperan sebagai material dielektrik pelapis daripada penyerap primer; komposit *La BaM/PANI* (No. 15) menggabungkan *doping* tanah jarang yang memperkuat polarisasi interfasial dan mencapai RL maksimum sekitar $-63,6$ dB pada $7,76$ GHz dengan ketebalan $3,28$ mm, menjadikannya salah satu kandidat terkuat dengan kombinasi *impedance matching* dan *bandwidth* yang seimbang; sementara komposit *BT/BaM/CNT@PPy* (No. 16) dan variasinya menunjukkan RL yang lebih rendah (sekitar $-3,7$ hingga $-6,88$ dB pada $3,5$ mm), meskipun jaringan konduktif PPy yang terbentuk saat *in situ synthesis* dapat meningkatkan *dielectric-magnetic complementary* dan *impedance matching*, namun belum mencapai level optimasi yang sama dengan komposit berbasis PANI. Dengan demikian, PANI sebagai matriks tampak paling unggul dalam mengintegrasikan *loss* magnetik BaM dan *loss* dielektrik, sedangkan PVDF dan *epoxy* lebih cocok untuk aplikasi struktur tipis dan lapisan dielektrik dengan RL moderat, sedangkan PPy cenderung memberikan peningkatan dielektrik lebih besar tetapi dengan RL absolut yang lebih rendah dalam susunan yang diuji.

Tabel 4. Struktur Lapisan RAM

No.	Jurnal	Struktur lapisan	Material	Kinerja
17	<i>Adaptive learning of prediction and simulation on the influence of Fe thickness on the energy gap of ZnO/Fe/ZnO tri-layer thin films</i>	<i>Tri-layer thin films</i>	ZnO/Fe/ZnO	Ketebalan Fe mengurangi <i>energy gap</i> dan meningkatkan <i>refractive index</i> . <i>sciencedirect</i>
18	<i>Magnetic double-layer MOF nanocomposites Fe3O4@ZIF-8@ZIF-67 for efficient adsorptive removal of organic dye and antibiotic</i>	<i>Double-layer MOF nanocomposites</i>	Fe3O4@ZIF-8@ZIF-67	Kapasitas adsorpsi tinggi untuk pewarna organik dan antibiotik.
19	<i>Design, Fabrication, and Validation of a CNT-Phenolic Dallenbach RAS with High-Temperature Matching-Frequency Stability</i>	<i>Dallenbach single layer</i>	CNT-Phenolic	Stabilitas frekuensi matching suhu tinggi dan daya tahan <i>aero-thermal</i> .
20	<i>Multi-layer radar absorber design with ALD-coated fabrics</i>	<i>Multi-layer</i>	ALD-coated fabrics (ZnO/TiO2)	<i>Reflection coefficient</i> - 10 dB pada $2-8$ GHz untuk TM/TE polarisasi, sudut

No.	Jurnal	Struktur lapisan	Material	Kinerja
				insiden 0°–40°.

Tabel 4 membandingkan struktur lapisan. *Single layer BaM/PANI baseline* dengan ketebalan tertentu menghasilkan *reflection loss* signifikan pada frekuensi tertentu, sedangkan perbandingan BaM:PANI tertentu mencapai *reflection loss* yang lebih baik. *Dallenbach single layer BaM + karbon aktif* pada baja menghasilkan *reflection loss* optimal dengan ketebalan spesifik. *Double layer Dallenbach* merupakan struktur paling superior; *PANI–BaM* mencapai *reflection loss* sangat rendah dengan absorpsi hampir sempurna dan *bandwidth* luas menggunakan ketebalan presisi $\frac{1}{4}\lambda$, jauh lebih baik dibandingkan *single layer*.

Tabel 5. Material RAM berdasarkan pita frekuensi target

No.	Jurnal	Pita Frekuensi	Rentang (GHz)	Material RAM terbaik
21	<i>The enhanced microwave absorption in S-band of flaky FeSiCr@FexN composites</i>	<i>S-band</i>	2-4	FeSiCr@FexN
22	<i>Fe₂O₃/PVDF-HFP nanocomposite: a study of dielectric behaviour and electromagnetic interference shielding performance in the X band frequency range</i>	<i>X-band</i>	8-12	Fe ₂ O ₃ /PVDF-HFP
23	<i>Axially oriented peapod-like Fe₃C/Fe nanotubes encapsulated in electrospun N-doped carbon nanofibers for broadband microwave absorption covering the entire Ku-band</i>	<i>Ku-band</i>	12.4-18	Fe ₃ C/Fe@N-CNF

Tabel 5 mengklasifikasikan material *Radar Absorbing Material* (RAM) berdasarkan pita frekuensi radar target utama yang relevan untuk aplikasi militer dan industri. *S-band*

digunakan untuk radar pencarian jarak jauh sehingga memerlukan material ringan dan tahan getaran, maka *FeSiCr@FexN flaky composites* dipilih berkat densitas rendah dan proses fabrikasi mudah. *X-band* merupakan pita frekuensi dominan untuk *Active Electronically Scanned Array* (AESA) radar sehingga *Fe₂O₃/PVDF-HFP* menjadi pilihan optimal yang mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) melalui prinsip *Dallenbach layer*. *Ku-band* diperlukan untuk *Electromagnetic Compatibility* (EMC) *shielding* pada fasilitas industri dan ruang uji radar sehingga *Fe₃C/Fe@N-CNF* unggul berkat sinergi konduktivitas tinggi dan sifat magnetik. *Broadband* paling komprehensif untuk ruang *anechoic chamber* dan platform *multiband* modern menggunakan *Mxene/Fe₃O₄* yang diuji rentang penuh melalui *Vector Network Analyzer* (VNA).

4. KESIMPULAN

Kajian komparatif mendalam ini membuktikan bahwa komposit hibrida *ferrite-carbon* dengan matriks polimer konduktif seperti *PANI/BaFe₁₂O₁₉* dan *PVDF/BaFe₁₂O₁₉* unggul dalam mencapai *reflection loss* di bawah -50 dB dengan *bandwidth* lebar di *X-band/Ku-band*, didukung sinergi *loss* magnetik ferit (*natural resonance, domain wall resonance, eddy current loss*) dan *loss* dielektrik karbon/polimer (*polarisasi antarmuka, konduksi, multiple scattering*) untuk *impedance matching* optimal yang meminimalkan refleksi dan memaksimalkan disipasi energi gelombang elektromagnetik menjadi panas. Material berbasis *doping* (Zr^{4+} , Ru^{4+} , La) dan struktur *core-shell* tidak hanya meningkatkan efisiensi tipis (≤ 3 mm) serta cakupan frekuensi luas (hingga 18 GHz) melalui penguatan polarisasi interfasial dan *multi-resonance permeability*, tetapi juga mengurangi densitas sehingga cocok untuk aplikasi *aerospace* dengan *trade-off* minimal antara kinerja dan bobot. Meskipun komposit PPy dan *epoxy* menunjukkan kinerja lebih moderat karena fase paraelektrik BaTiO₃ atau konduktivitas berlebih yang menyebabkan *mismatch impedance*, kain fleksibel *GO-BaFe₁₂O₁₉* menonjol dengan *shielding effectiveness* >60 dB pada ketebalan 1,1 mm plus multifungsi (tahan UV, *stealth* IR, stabilitas mekanik), ideal untuk *5G shielding*, *PPE*, dan pelindung perangkat elektronik terintegrasi di era perang modern. Secara keseluruhan, PANI sebagai matriks paling efektif untuk penyerapan puncak dan *bandwidth X-band*, PVDF unggul untuk struktur tipis dengan EAB >5 GHz, sementara *epoxy* dan PPy lebih berperan sebagai lapisan dielektrik pelapis dengan RL moderat (< -10 dB). Riset lanjutan direkomendasikan pada skalabilitas industri menggunakan sumber lokal (pasir besi, biomassa karbon), integrasi *multilayer Dallenbach/Salisbury* untuk *broadband* 2–18 GHz, uji RCS prototipe pada sudut insiden *oblique* dan polarisasi silang, serta pemodelan AI untuk optimasi kompleks dielektrik/magnetik agar mencapai kemandirian teknologi *stealth* nasional yang kompetitif secara global.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Militer, Universitas Pertahanan Indonesia, atas penyediaan fasilitas dan akses literatur selama proses penelitian berlangsung. Segala bentuk dukungan finansial, institusional, dan moral sangat dihargai.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, W., Yang, M., Liu, X., et al. (2024). Effects of interfacial polarization induced by La doping and surface carboxylation on microwave absorption properties of BaM/PANI composites. *Journal of Materials Science*, 59, 16535–16550.
- [10] Xu, H., Qi, Y., & Zhang, Z. (2024). The structure and microwave absorbing properties of PANI/BaFe₁₂O₁₉ composites prepared by in-situ aniline polymerization method. *Journal of Alloys and Compounds*, 1000, 175079.

- [11] Wang, H., Liu, Y., & Zhao, X. (2024). Flexible and firm multilayer BaFe₂O₉/GO coated composite fabric for high-performance electromagnetic shielding and wave absorption. *Progress in Organic Coatings*, 195, 108676.
- [12] Xu, H., Qi, Y., & Zhang, Z. (2024). The structure and microwave absorbing properties of PANI/BaFe₂O₉ composites prepared by in-situ aniline polymerization method. *Journal of Alloys and Compounds*, 1000, 175079.
- [13] Chen, C., Chen, G., Chen, F., Zhang, Z., Wang, J., Su, Z., ... & Gao, R. (2023). Achieving superior electromagnetic-absorbing performances in the hexagonal flake BaFe₂O₉@PVDF composites. *Inorganic Chemistry*, 63(1), 353-368.
- [14] Murugan, M., Kokate, V. K., Bapat, M. S., & Sapkal, A. M. (2010). Synthesis of nanosized barium titanate/epoxy resin composites and measurement of microwave absorption. *Bulletin of Materials Science*, 33(6), 657-662.
- [15] Liu, X., Ji, R., Yang, M., Chen, W., Chen, H., Song, X., ... & Zhang, L. (2023). Facilitating enhanced microwave absorption properties of barium hexaferrite/polyaniline composites based on tunable interfacial polarization by rare earth doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 937, 168391.
- [16] Motamedi, A., Rahmanifard, R., & Adibi, M. (2021). Synthesis and microwave absorption characteristics of BaFe₂O₉/BaTiO₃/MWCNT/polypyrrole quaternary composite. *Synthetic Metals*, 280, 116873.
- [17] Mohamed, R. A., Baradács, E., Atyia, H. E., et al. (2025). Adaptive learning of prediction and simulation on the influence of Fe thickness on the energy gap of ZnO/Fe/ZnO tri-layer thin films. *European Physical Journal B*, 98, 156.
- [18] Huang, J., Li, J., Lu, C., et al. (2025). Magnetic double-layer MOF nanocomposites Fe₃O₄@ZIF-8@ZIF-67 for efficient adsorptive removal of organic dye and antibiotic. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 23, 34.
- [19] Lee, Y. G., & Jang, M. S. (2026). Design, fabrication, and validation of a CNT–phenolic Dallenbach RAS with high-temperature matching-frequency stability. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*.
- [2] Kamran, M., & Anis-ur-Rehman, M. (2020). Enhanced transport properties in Ce doped cobalt ferrites nanoparticles for resistive RAM applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 822, 153583.
- [20] Atıcı, Ş., Yiğit, E., & Akyıldız, H. I. (2025). Multi-layer radar absorber design with ALD-coated fabrics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36, 1454.
- [21] Wang, B., Wu, Z., Xu, Y., et al. (2025). The enhanced microwave absorption in S-band of flaky FeSiCr@Fe₃N composites. *Journal of Materials Science*, 60, 23447–23462.
- [22] Hemamalini, V., Thanasekaran, G., Vijayajayanthi, M., et al. (2026). Fe₂O₃/PVDF-HFP nanocomposite: A study of dielectric behaviour and electromagnetic interference shielding performance in the X band frequency range. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 37, 200.
- [23] Jing, Y., Zhang, T., Yang, X., et al. (2026). Axially oriented peapod-like Fe₃C/Fe nanotubes encapsulated in electrospun N-doped carbon nanofibers for broadband microwave absorption covering the entire Ku-band. *Journal of Nanoparticle Research*, 28, 96.
- [24] Susanto, H. A. (2018). Desain dan simulasi metamaterial absorber untuk aplikasi radar cross section reduction. *E-Link: Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 13(2), 80–84.
- [25] Aritonang, S., Xaviera, A. N., Devina, A., Panjaitan, T. B., & Nareswari, V. A. (2024). Sintesis BaM/PANI doping Cu optimasi sifat radar absorbing material pada aplikasi pelapisan alpalhankam. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 7(1), 144–150.
- [26] Verma, M., Abbas, S. M., & Prasad, N. E. (2021). RCS reduction in context of stealth technology: Theoretical aspects. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 4(3).
- [27] Priyono, P., Abidin, N., & Nurhasanah, I. (2019). Pengukuran permitivitas kompleks material magnetik menggunakan metode S-parameter dengan pendekatan Nicolson–Ross–Weir. *Berkala Fisika*, 22(2), 56–61.

- [28] Ouamara, D., & Dubas, F. (2019). Permanent-magnet eddy-current losses: A global revision of calculation and analysis. *Mathematical and Computational Applications*, 24(3), 67.
- [29] Lee, J., Hong, Y. K., Lee, W., & Park, J. (2013). Impedance matching of electrically small antenna with Ni-Zn ferrite film. *Journal of Magnetism*, 18(4), 428–431.
- [3] Luo, J., Zuo, Y., Shen, P., Yan, Z., & Zhang, K. (2017). Excellent microwave absorption properties by tuned electromagnetic parameters in polyaniline-coated $\text{Ba}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{Fe}_{11.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_{19}$ /reduced graphene oxide nanocomposites. *RSC Advances*, 7(58), 36433–36443.
- [30] Donya, H., Darwesh, R., Alotaibi, M. F., & Farid, H. M. T. (2023). A comparative study of spinel ferrites/PANI composites for high-frequency applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 108(3), 695–703.
- [31] Kafshgari, L. A., Ghorbani, M., & Azizi, A. (2019). Synthesis and characterization of manganese ferrite nanostructure by co-precipitation, sol–gel, and hydrothermal methods. *Particulate Science and Technology*.
- [4] Beloev, H. I., Beloev, I. H., Iliev, I. K., et al. (2026). Synergistic Ni–Mn ferrite/rGO nanocomposites for high-performance supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 37, 52
- [5] Elumalai, P., Charles, J., & Gunasekaran, R. (2025). Electrochemical investigations on redox-active NiO and ZnO incorporated binary PPy/PANI polymer matrices for supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36, 1619.
- [6] Tho, P. T., Tran, N., Tuan, N. Q., Ho, T. A., Xuan, C. T. A., Toan, H. N., & Lee, B. W. (2023). Detailed microwave loss mechanisms for nanocomposites of La-doped $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ and polyaniline. *Ceramics International*, 49(14), 23669–23679.
- [7] Liu, C., Xu, Q., Tang, Y., Wang, Z., Ma, R., Ma, N., & Du, P. (2016). Zr 4+ doping-controlled permittivity and permeability of $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ and the extraordinary EM absorption power in the millimeter wavelength frequency range. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(40), 9532–9543.
- [8] Taryana, Y., Wahyu, Y., Manaf, A., Manawan, M., & Adi, W. A. (2022). Structural and microwave absorption properties of $\text{BaFe}_{(12-2x)}\text{Sn}_x\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ ($x= 0.05\text{--}1.0$) ceramic magnets. *Materialia*, 23, 101455.
- [9] Chang, Y., Zhang, Y., Li, L., Liu, S., Liu, Z., Chang, H., & Wang, X. A. (2020). Microwave absorption in 0.1–18 GHz, magnetic and structural properties of $\text{SrFe}_{12-x}\text{Ru}_x\text{O}_{19}$ and $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ru}_x\text{O}_{19}$. *Journal of Alloys and Compounds*, 818, 152930.