e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Perkembangan Material Kamuflase Dan Stealth: Tinjauan Literatur Atas Mekanisme Penyerapan Gelombang Radar Dan Strategi Multispektral Untuk Aplikasi Pertahanan

Development of Camouflage and Stealth Materials: A Literature Review of Radar Wave Absorption Mechanisms and Multispectral Strategies for Defense Applications

Sulthan Fatih Aryantara*, Sovian Aritonang, Taufiq Irza

** Prodi Fisika Militer, Fakultas Matematika Militer dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan RI, Bogor, Indonesia*

aryantarafatih@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id , taufiqirza29@gmail.com

Abstract

The survivability of a military platform is no longer measured by firepower alone. How small a signature it leaves before enemy sensors matters just as much. This review maps the development of camouflage and stealth materials aimed at reducing radar cross section while suppressing contrast in the infrared and visible bands. Literature was retrieved from the OpenAlex and Crossref databases using combinations of the terms radar absorbing material, stealth, multispectral camouflage, metamaterial absorber, and MXene. Forty primary and review articles were selected and analysed thematically. The results show that the performance of an electromagnetic absorber is governed not by attenuation alone but by the balance between impedance matching and the ability to dissipate energy. The most widely reported families are carbon-based materials, magnetic absorbers built on carbonyl iron and spinel ferrites, MXenes, metamaterials, and high-temperature ceramics. Each carries limitations that pull in opposite directions. Thin absorbers perform well only over narrow bands, while broadband absorbers generally demand greater thickness and density. The central challenge is therefore not the pursuit of low reflection loss values at laboratory scale, but the integration of radar, infrared, and visible camouflage into a single architecture that also withstands mechanical loading and weathering. This review also identifies a research gap in the Indonesian context, where publications on stealth materials remain scarce compared with those on structural composites.

Keywords *: Radar Absorbing Material, Multispectral Camouflage, Metamaterial, Radar Cross Section, Defence*

Abstrak

Kemampuan bertahan sebuah platform militer tidak lagi diukur dari kekuatan tembakannya saja. Seberapa kecil jejak yang ditinggalkannya di hadapan sensor lawan kini sama pentingnya. Tinjauan literatur ini memetakan perkembangan material kamuflase dan stealth untuk menekan penampang lintang radar sekaligus meredam kontras pada pita inframerah dan tampak. Penelusuran pustaka dilakukan pada basis data OpenAlex dan Crossref dengan kombinasi kata kunci radar absorbing material, stealth, multispectral camouflage, metamaterial absorber, dan MXene. Sebanyak 40 artikel primer dan artikel tinjauan dipilih lalu dianalisis secara tematik. Hasil telaah memperlihatkan bahwa kinerja sebuah penyerap gelombang elektromagnetik tidak ditentukan oleh besarnya atenuasi semata, melainkan oleh keseimbangan antara pencocokan impedansi dan kemampuan mendisipasi energi. Keluarga material yang paling banyak dilaporkan adalah material berbasis karbon, penyerap magnetik dari besi karbonil dan ferit spinel, MXene, metamaterial, serta keramik tahan suhu tinggi. Masing-masing membawa keterbatasan yang saling bertolak belakang. Penyerap tipis hanya bekerja baik pada pita sempit, sedangkan penyerap broadband menuntut ketebalan dan densitas yang lebih besar. Tantangan utamanya karena itu bukan mengejar nilai reflection loss rendah di skala laboratorium, melainkan menyatukan kamuflase radar, inframerah, dan tampak dalam satu arsitektur yang sekaligus tahan beban mekanis dan cuaca. Tinjauan ini juga menandai

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

kesenjangan riset pada konteks Indonesia, tempat publikasi mengenai material stealth masih jauh lebih sedikit dibandingkan publikasi mengenai komposit struktural.

Kata Kunci: Material Penyerap Radar, Kamuflase Multispektral, Metamaterial, Penampang Lintang Radar, Pertahanan

Penulis Korespondensi : Sulthan Fatih Aryantara

I. PENDAHULUAN

Dalam tiga dekade terakhir, cara sebuah platform militer dianggap bertahan hidup telah berubah cukup mendasar. Radar pengintai modern, sensor inframerah beresolusi tinggi, kamera hiperspektral, sampai citra satelit komersial bekerja berlapis. Pesawat, kapal, atau kendaraan tempur bisa dikenali bukan hanya dari bentuknya, tetapi juga dari pantulan gelombang elektromagnetik, panas yang dipancarkannya, dan warna permukaannya (Shimoni, Haelterman and Perneel, 2019). Di titik ini makna kamuflase bergeser: dari sekadar menyembunyikan bentuk secara visual menjadi rekayasa sifat elektromagnetik dan termal suatu material.

Konsep yang menjadi titik tolak pembahasan ini adalah penampang lintang radar atau radar cross section (RCS), yakni ukuran efektif sebuah objek dalam memantulkan gelombang radar. Semakin kecil RCS, semakin lemah gema yang diterima radar lawan, dan semakin dekat platform tersebut dapat mendekat sebelum terdeteksi. Perhitungan RCS pada bentuk yang rumit sendiri sudah menjadi bidang tersendiri, misalnya melalui metode shooting and bouncing rays yang dikembangkan Ling, Chou and Lee (1989). Ada dua jalur untuk mereduksinya. Jalur pertama adalah rekayasa bentuk, agar energi yang datang dipantulkan ke arah lain. Jalur kedua adalah rekayasa material, agar energi tersebut diserap dan berubah menjadi panas. Jalur kedua inilah yang melahirkan kelas material penyerap radar atau radar absorbing material (RAM). Pendekatan bentuk punya batas karena umumnya mengorbankan performa aerodinamis, sementara pendekatan material lebih luwes untuk diterapkan pada struktur yang sudah ada. Di antara keduanya terdapat jalan tengah berupa permukaan yang dirancang khusus, misalnya lapisan artificial magnetic conductor tipis yang mampu menurunkan RCS tanpa mengubah garis besar objek (Paquay dkk., 2007), atau susunan permukaan EBG berpola papan catur yang menyebarkan energi datang ke beberapa arah sekaligus (Chen, Balanis and Birtcher, 2015).

Masalahnya, literatur RAM tidak mudah dibaca oleh peneliti di luar bidang ini. Kinerja penyerap hampir selalu dilaporkan sebagai nilai reflection loss minimum pada satu frekuensi tertentu, padahal angka tunggal itu tidak menggambarkan lebar pita yang benar-benar bisa dipakai. Metode pengukurannya pun berbeda-beda antar laboratorium, begitu pula ketebalan spesimennya, sehingga perbandingan antarpublikasi menjadi sulit dan gampang menyesatkan. Klaim kinerja di skala laboratorium juga jarang diikuti pembahasan soal ketahanan mekanis, stabilitas termal, dan kemudahan fabrikasi di skala industri. Isari dkk. (2024) menyoroti kecenderungan ini secara terang-terangan sebagai jebakan metodologis yang perlu diwaspadai ketika melaporkan kinerja pelindung elektromagnetik.

Persoalan kedua datang dari sensor inframerah. Setiap benda bersuhu di atas nol mutlak memancarkan radiasi inframerah, jadi platform yang sudah "tak terlihat" bagi radar masih bisa terlacak lewat kontras termalnya. Upaya menekan kontras ini melahirkan pendekatan yang secara fundamental berbeda dari penyerapan gelombang mikro, karena yang diatur adalah emisivitas dan konduktivitas panas, bukan penyerapan energi elektromagnetik (Hu dkk., 2021). Yang membuatnya lebih rumit, strategi yang baik untuk radar belum tentu baik untuk inframerah, dan berlaku sebaliknya. Sejumlah upaya menyatukan keduanya sudah dilaporkan, misalnya lewat struktur yang

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

memisahkan fungsi penyerapan gelombang mikro dari fungsi pendinginan radiatif (Zhu dkk., 2021), tetapi solusi semacam itu masih berhenti di tahap purwarupa laboratorium.

Bagi Indonesia, persoalan ini punya dimensi strategis tersendiri. Sebagai negara kepulauan dengan garis pantai yang sangat panjang dan wilayah udara yang luas, kebutuhan akan kemampuan mengamati sekaligus menyembunyikan diri menjadi relevan, sementara kemampuan industri material pertahanan dalam negeri masih dalam tahap pembangunan. Sejumlah kajian dalam negeri sudah membahas material komposit untuk mendukung alutsista (Hutagalung, Aritonang and Murniati, 2025), tetapi pembahasan mengenai material penyerap gelombang dan kamuflase multispektral masih jarang ditemukan. Tinjauan ini berupaya mengisi celah tersebut dengan menyajikan peta perkembangan material kamuflase dan stealth secara sistematis, sekaligus menandai di mana peluang kontribusi riset nasional berada.

Dari uraian di atas, tinjauan ini hendak menjawab tiga hal. Pertama, bagaimana mekanisme fisis yang menentukan kinerja sebuah material penyerap gelombang elektromagnetik. Kedua, bagaimana perbandingan antarkeluarga material yang paling banyak dilaporkan beserta keterbatasannya masing-masing. Ketiga, seperti apa tantangan integrasi ketika kemampuan kamuflase radar, inframerah, serta tampak harus disatukan dalam satu sistem.

II. METODE

Tinjauan ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur naratif yang terstruktur, mengikuti kerangka umum pencarian, penyaringan, dan sintesis tematik. Penelusuran dilakukan pada dua basis data, yaitu OpenAlex dan Crossref, dengan memanfaatkan antarmuka pemrograman aplikasi kedua layanan tersebut. Cara ini dipilih agar metadata setiap rujukan diambil langsung dari sumber resmi, bukan dari ingatan penulis, sehingga risiko sitasi keliru dapat ditekan.

Kata kunci yang dipakai mencakup kombinasi radar absorbing material, electromagnetic wave absorption, stealth material, radar cross section reduction, metamaterial absorber, MXene electromagnetic wave absorption, carbonyl iron microwave absorption, conductive polymer electromagnetic interference shielding, infrared camouflage material, thermal camouflaging metamaterial, adaptive camouflage structural color, dan plasma stealth, ditambah padanan berbahasa Indonesia seperti komposit pertahanan serta material penyerap gelombang elektromagnetik. Rentang terbitan dibatasi antara tahun 2005 dan 2026.

Kriteria inklusi mencakup artikel yang secara langsung membahas mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik atau strategi kamuflase pada pita radar, inframerah, dan tampak; artikel tinjauan yang merangkum suatu keluarga material secara menyeluruh; serta artikel yang relevan dengan konteks kelembagaan pertahanan. Yang dikeluarkan adalah artikel yang hanya membahas sifat listrik atau magnetik tanpa kaitan dengan penyerapan gelombang, makalah konferensi tanpa naskah lengkap, dan publikasi tanpa identitas digital atau DOI sehingga sulit diverifikasi.

Dari hasil penelusuran dipilih 40 artikel yang dinilai paling representatif dan paling banyak dirujuk. Setiap entri diverifikasi melalui Crossref untuk memastikan kebenaran nama penulis, judul, nama jurnal, volume, dan nomor halaman. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara tematik dengan mengelompokkan artikel menurut mekanisme fisis yang dibahas dan keluarga material yang diteliti. Pengelompokan itu menghasilkan sebelas tema yang menjadi kerangka bagian pembahasan.

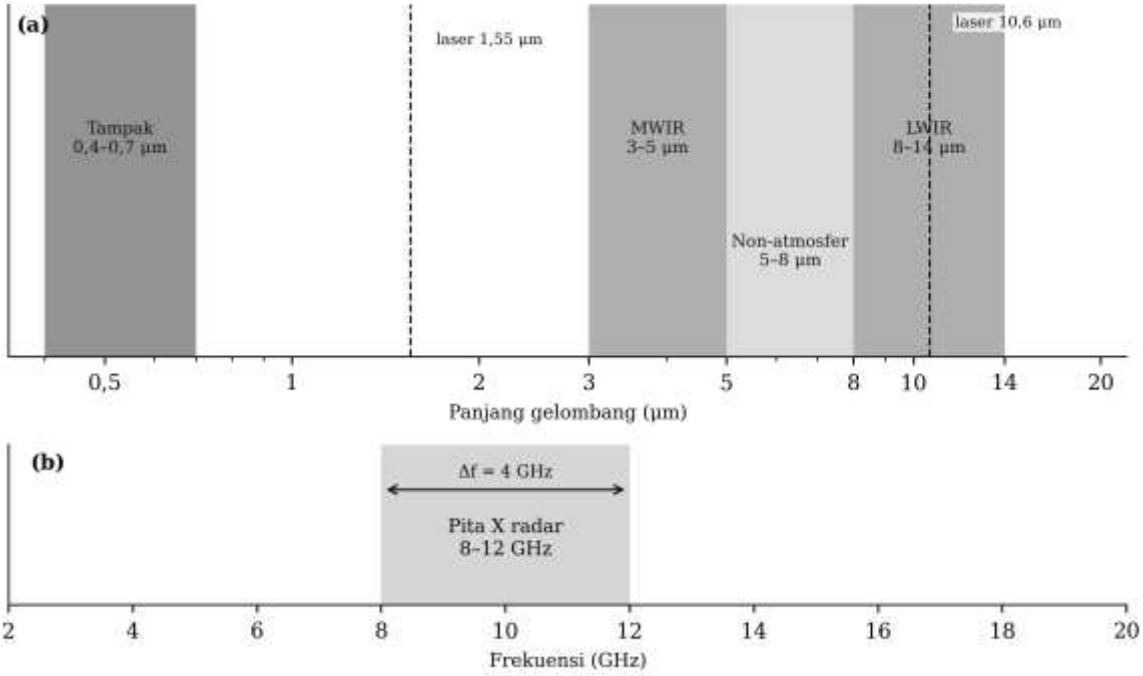
Perlu dikemukakan sejak awal bahwa tinjauan ini tidak melakukan meta-analisis terhadap nilai kinerja yang dilaporkan. Perbedaan metode pengukuran, ketebalan spesimen, dan komposisi material antarpublikasi tidak memungkinkan pembandingan kuantitatif yang sahih. Angka kinerja yang disebut dalam pembahasan karena itu disajikan sebagai ilustrasi kecenderungan, bukan sebagai nilai yang dapat diperbandingkan secara langsung.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum masuk ke pembahasan mekanisme, ada baiknya melihat lebih dahulu peta pita spektral yang harus ditangani oleh sebuah sistem kamuflase. Gambar 1 memperlihatkan rentang panjang gelombang dan frekuensi yang menjadi medan pertempuran sensor, mulai dari pita tampak sampai gelombang mikro. Jarak antarrentang itu sangat lebar, dari ratusan nanometer sampai sentimeter. Karena setiap pita memiliki prinsip kamuflase yang berbeda, tidak mengherankan bila perangkat yang dirancang untuk satu pita hampir selalu gagal pada pita lain. Zhu dkk. (2021) menyebut kesenjangan inilah yang membuat kamuflase multispektral menjadi persoalan rekayasa tersendiri, bukan sekadar penjumlahan beberapa teknologi.



Gambar 1. Peta pita spektral yang relevan bagi kamuflase multispektral: (a) pita tampak, MWIR, jendela non-atmosfer, dan LWIR beserta posisi laser 1,55 µm dan 10,6 µm; (b) pita X radar 8–12 GHz. Sumber: disusun penulis berdasarkan Zhu dkk. (2021).

Mekanisme Dasar Penyerapan Gelombang Elektromagnetik

Ketika gelombang elektromagnetik mengenai suatu material, energinya terbagi ke tiga arah. Sebagian dipantulkan pada permukaan, sebagian diserap di dalam material, dan sebagian diteruskan ke sisi seberang. Penyerap radar yang baik berusaha menekan komponen pantulan dan transmisi sekaligus, sehingga energi yang tersisa benar-benar terdisipasi menjadi panas di dalam material. Dalam praktik pelaporan, kinerja penyerap dinyatakan lewat reflection loss yang dihitung dari impedansi masukan lapisan dan ditulis dalam satuan desibel. Nilai −10 dB, setara penyerapan sekitar 90 persen energi, lazim dipakai sebagai ambang untuk menentukan lebar pita efektif. Perlu ditegaskan bahwa penyerapan dan perisai (shielding) bukan hal yang sama. Perisai menahan energi agar tidak melewati bahan, dan sebagian besar energi itu bisa saja justru dipantulkan. Chung (2001) mengingatkan bahwa pada material perisai elektromagnetik, efisiensi perisai yang tinggi belum tentu berarti penyerapan yang tinggi, dan kekeliruan mencampuradukkan keduanya sering muncul dalam pelaporan.

Hal yang paling sering disalahpahami adalah anggapan bahwa penyerapan tinggi bisa dicapai hanya dengan menaikkan kemampuan disipasi. Bila impedansi permukaan material terlalu jauh berbeda dari impedansi

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

ruang bebas, gelombang akan langsung dipantulkan sebelum sempat masuk. Material dengan atenuasi sangat besar justru bisa memiliki pantulan yang besar pula. Konsep ini dikenal sebagai impedance matching, dan Hou dkk. (2024) menempatkannya sebagai syarat pertama yang harus dipenuhi sebelum orang berbicara soal mekanisme resonansi. Dalam bahasa sederhana, gelombang harus dibujuk masuk dulu, baru dihabisi di dalam.

Setelah gelombang masuk, disipasi energi berlangsung lewat dua jalur utama. Jalur pertama adalah dielectric loss, yaitu kehilangan energi akibat polarisasi dan konduktivitas material, yang umumnya dominan pada material berbasis karbon, polimer konduktif, dan MXene. Jalur kedua adalah magnetic loss, yakni kehilangan energi akibat proses magnetisasi dan resonansi dinding domain, yang dominan pada material berbasis besi, kobalt, nikel, dan ferit. Material yang menggabungkan keduanya, disebut penyerap hibrida, biasanya menunjukkan kinerja lebih baik karena mekanisme disipasinya saling melengkapi (Xiong dkk., 2024). Chen dkk. (2024) merangkum strategi perancangan material penyerap dalam tiga tingkat: rekayasa komposisi pada skala atom, rekayasa morfologi pada skala nano dan mikro, serta rekayasa struktur pada skala makro.

Material Penyerap Berbasis Karbon

Karbon menempati posisi sentral dalam literatur RAM karena tiga alasan sekaligus: ringan, konduktif, dan mudah dimodifikasi morfologinya. Peran karbon sebagai pengisi dalam matriks polimer sudah lama menjadi bahasan utama pada komposit pelindung elektromagnetik, sebagaimana dirangkum Thomassin dkk. (2013) sebelum gelombang riset beralih ke material dua dimensi. Kim dkk. (2023) dalam tinjauannya menunjukkan bahwa material berbasis karbon, mulai dari grafit, karbon aktif, nanotube, sampai graphene, telah menjadi tulang punggung pengembangan penyerap radar ringan. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan membentuk jaringan konduktif tiga dimensi yang memungkinkan gelombang terperangkap di dalam pori dan mengalami pantulan berulang sebelum akhirnya terdisipasi.

Namun sifat konduktif yang tinggi itu sekaligus menjadi kelemahannya. Konduktivitas yang terlalu besar menyebabkan ketidakcocokan impedansi, sehingga gelombang dipantulkan begitu saja di permukaan. Strategi yang umum ditempuh adalah menurunkan konduktivitas efektif melalui pembentukan porositas, penambahan pengisi magnetik, atau pengaturan tingkat oksidasi permukaan. Qing dkk. (2015) mendemonstrasikan hibridisasi dengan menggabungkan serpihan besi karbonil dan graphene ke dalam matriks epoksi-silikon, dan melaporkan bahwa kombinasi keduanya menghasilkan penyerap yang lebih tipis dengan pita lebih lebar dibandingkan masing-masing komponen secara terpisah. Qiu dkk. (2015) menempuh jalur serupa dengan menyusun komposit magnetit–nanotube karbon–serat karbon berongga, dan menunjukkan bahwa rongga di dalam serat menambah ruang bagi pantulan internal yang memperpanjang lintasan gelombang sebelum terdisipasi.

Keterbatasan lain yang jarang dibahas adalah stabilitas jangka panjang. Material karbon berpori cenderung menyerap kelembapan dan mengalami perubahan sifat dielektrik seiring waktu. Pada aplikasi pertahanan, material dituntut tetap berfungsi setelah terpapar hujan, garam laut, dan sinar ultraviolet selama bertahun-tahun. Aspek ketahanan lingkungan ini masih menjadi celah yang belum banyak diteliti secara sistematis. Meski begitu, arah perbaikan sudah terlihat. Wu dkk. (2022) mengembangkan aerogel ringan CuS@rGO yang tidak hanya menyerap gelombang mikro secara sangat lebar, tetapi sekaligus menunjukkan sifat stealth inframerah.

Material Penyerap Magnetik: Besi Karbonil dan Ferit

Material magnetik menawarkan mekanisme disipasi yang berbeda dari karbon, yaitu melalui rugi histeresis, resonansi domain, dan resonansi dinding domain. Besi karbonil merupakan material yang paling matang secara industri karena ketersediaannya luas, biayanya relatif rendah, dan sifat magnetiknya dapat dikendalikan lewat ukuran serta bentuk partikel. Sista dkk. (2021) mencatat bahwa besi karbonil telah lama dipakai sebagai pengisi pada cat penyerap radar, dengan kinerja yang sangat bergantung pada bentuk partikel. Partikel berbentuk serpihan umumnya lebih efektif daripada partikel bulat karena meningkatkan anisotropi bentuk dan memperluas area permukaan.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Ferit spinel merupakan kelompok lain yang banyak diteliti. Kostishin, Isaev and Salogub (2024) merangkum bahwa ferit menawarkan resistivitas listrik tinggi sehingga menekan arus eddy, serta stabilitas kimia yang baik. Kelemahannya adalah densitas yang relatif tinggi, bertentangan dengan kebutuhan platform udara yang menuntut material seringan mungkin. Upaya mengatasinya ditempuh lewat komposit ferit-polimer, tetapi penambahan polimer umumnya menurunkan fraksi volume magnetik dan ikut mengurangi kinerja penyerapan.

Strategi yang kini berkembang pesat adalah penurunan material menggunakan kerangka logam-organik atau metal-organic framework (MOF) sebagai prekursor. Zhang dkk. (2015) menunjukkan bahwa pirolisis Fe_3O_4 yang terimobilisasi dalam MOF menghasilkan komposit Fe–Co/karbon nanopori yang menggabungkan fasa magnetik dengan matriks karbon konduktif dalam satu struktur. Nilai tambahnya terletak pada dua mekanisme disipasi yang bekerja sekaligus, dengan porositas yang sekalian membantu pencocokan impedansi.

MXene sebagai Material Dua Dimensi

MXene, kelompok karbida dan nitrida logam transisi dua dimensi dengan rumus umum $M_{n+1}X_nT_x$, muncul sebagai salah satu material paling aktif diteliti dalam satu dekade terakhir. Tonggak pentingnya adalah laporan Iqbal dkk. (2020) di jurnal Science mengenai penyerapan gelombang elektromagnetik yang tidak biasa pada Ti_3CNT_x. Laporan itu menunjukkan bahwa MXene dapat mencapai penyerapan sangat tinggi pada ketebalan yang jauh lebih tipis dibandingkan penyerap konvensional. Sifat ini berasal dari kombinasi konduktivitas tinggi, kekayaan gugus fungsi permukaan, dan struktur berlapis yang memungkinkan pantulan internal berulang.

Cao dkk. (2019) dalam tinjauan komprehensifnya menjelaskan bahwa gugus fungsi permukaan pada MXene, seperti –O, –OH, dan –F, memainkan peran ganda. Di satu sisi menyediakan situs polarisasi yang memperkaya dielectric loss, di sisi lain memodifikasi konduktivitas sehingga membantu pencocokan impedansi. Kelenturan kimia inilah yang menjadikan MXene sebagai platform yang mudah dikompositkan dengan material lain, termasuk polimer, ferit, dan karbon. Fondasi pemanfaatan MXene untuk keperluan ini sebenarnya diletakkan oleh Shahzad dkk. (2016), yang melaporkan bahwa film MXene setipis beberapa mikrometer mampu menahan gelombang elektromagnetik jauh lebih baik daripada logam dengan ketebalan sama, dan bahwa mekanisme dominannya adalah penyerapan, bukan pantulan. Liu dkk. (2017) kemudian menunjukkan bahwa keunggulan itu dapat dipertahankan pada struktur berbusa yang ringan dan hidrofobik, sementara Zhang dkk. (2020) membuktikan bahwa film MXene berdiri sendiri dapat diproduksi dalam skala lebih besar dengan konduktivitas yang sangat tinggi.

Meski begitu, MXene menghadapi persoalan serius pada aspek aplikasi. Sintesisnya melibatkan asam kuat dan prosesnya belum sepenuhnya ramah lingkungan, stabilitasnya terhadap oksidasi di udara terbatas, dan skalabilitas produksinya masih jadi pertanyaan. Bagi negara yang sedang membangun kemandirian industri pertahanan, ketergantungan pada proses sintesis yang rumit merupakan pertimbangan yang tidak bisa diabaikan begitu saja.

Metamaterial dan Permukaan Selektif Frekuensi

Berbeda dari material konvensional yang mengandalkan komposisi, metamaterial mencapai sifat penyerapan melalui struktur geometris yang dirancang pada skala lebih kecil daripada panjang gelombang. Watts, Liu and Padilla (2012) meletakkan dasar konseptual bagi kelas penyerap ini dengan menunjukkan bahwa susunan elemen resonan dapat dirancang agar impedansinya cocok dengan ruang bebas pada frekuensi tertentu, sehingga pantulan dapat ditekan mendekati nol meskipun ketebalan strukturnya sangat kecil.

Keunggulan utama metamaterial adalah ketebalan ekstrem dan kemampuan menyetel frekuensi kerja melalui perubahan dimensi geometri, bukan melalui perubahan komposisi kimia. Sejumlah peneliti menempuh arah lain dengan meniru susunan berskala mikro pada makhluk hidup, misalnya struktur pada sayap serangga, untuk memperoleh sifat penyerapan yang sulit dicapai oleh geometri biasa (Xu dkk., 2023). Kelemahan fundamentalnya adalah sifat pita sempit: penyerapan sempurna hanya terjadi pada frekuensi resonansi. Ding dkk. (2012) mengusulkan penggabungan beberapa resonator dengan frekuensi berbeda dalam satu sel satuan untuk

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

memperlebar pita, dan pendekatan semacam ini kemudian menjadi arah umum pengembangan penyerap metamaterial broadband.

Dari sudut pandang aplikasi pertahanan, metamaterial menawarkan keunggulan berupa kemungkinan difabrikasi dengan teknik pencetakan dan litografi yang sudah mapan di industri elektronika. Namun struktur resonan umumnya sensitif terhadap sudut datang dan polarisasi, dua hal yang sangat sulit dikendalikan pada platform nyata yang orientasinya berubah-ubah terhadap sumber radar.

Keramik dan Material Tahan Suhu Tinggi

Aplikasi pada kecepatan hipersonik memunculkan persoalan yang tidak dihadapi material polimer maupun karbon: suhu permukaan dapat melampaui kemampuan termal material organik. Delfini dkk. (2018) membahas pengembangan penyerap berbasis keramik untuk lingkungan antariksa, dengan penekanan pada kebutuhan menggabungkan sifat penyerapan gelombang dengan ketahanan terhadap siklus termal. Tang dkk. (2025) memperbarui tinjauan tersebut dan mencatat bahwa keramik seperti silikon karbida dan silikon nitrida menjadi kandidat utama karena mampu mempertahankan sifat mekanis dan elektromagnetiknya pada suhu tinggi. Delfini dkk. (2018) juga mencatat bahwa komposit karbon/karbon dengan fraksi serat di bawah 35 persen masih rentan terhadap retak matriks, sementara di atas 35 persen penguatan oleh serat mulai efektif menahan perambatan retak. Temuan itu menunjukkan bahwa pada material struktural penyerap, optimasi elektromagnetik tidak bisa dipisahkan dari optimasi mekanik.

Tantangan pada kelas material ini terletak pada pertukaran antara sifat listrik dan sifat mekanis. Keramik yang sangat konduktif pada suhu tinggi cenderung mengalami peningkatan pantulan permukaan, sehingga strategi rekayasa impedansi yang berhasil pada suhu ruang belum tentu berlaku pada suhu operasional. Selain itu, proses densifikasi keramik menuntut suhu dan tekanan tinggi yang membatasi ukuran komponen yang dapat dibuat.

Plasma sebagai Pendekatan Non-Material

Pendekatan yang sering terlewat dalam tinjauan berbahasa Indonesia adalah pemanfaatan lapisan plasma. Prinsipnya, medan plasma diciptakan di sekitar objek sehingga konstanta dielektrik efektif berubah dan gelombang datang mengalami penyerapan atau pembelokan sebelum mencapai permukaan benda. Chaudhury and Chaturvedi (2005) melakukan komputasi tiga dimensi yang menunjukkan bahwa perisai plasma dapat menurunkan RCS secara signifikan, sedangkan Bai dkk. (2015) menganalisis struktur lapis ganda yang menggabungkan plasma dengan RAM dan menemukan bahwa kombinasi keduanya memberi kinerja lebih baik daripada masing-masing secara terpisah pada sudut datang miring.

Keterbatasan plasma terletak pada kebutuhan daya listrik untuk mempertahankan keadaan terionisasi, kompleksitas peralatan, dan ketergantungan kinerja pada kondisi atmosfer. Meski demikian, pendekatan ini menunjukkan bahwa masalah stealth tidak selalu harus diselesaikan lewat rekayasa material padat, dan bahwa penggabungan beberapa mekanisme bisa memberi hasil yang tidak dapat dicapai oleh satu mekanisme saja.

Kamuflase Inframerah dan Pengaturan Emisivitas

Sensor inframerah bekerja dengan mendeteksi perbedaan pancaran radiasi termal, jadi platform yang RCS-nya sudah direduksi tetap bisa dikenali apabila kontras suhunya tinggi. Strategi kamuflase inframerah karena itu berpusat pada pengaturan emisivitas permukaan, bukan pada penyerapan gelombang mikro. Hu dkk. (2021) merangkum pendekatan metamaterial termal yang memungkinkan pengaturan emisivitas secara spasial, sehingga distribusi suhu yang terdeteksi sensor tidak lagi mencerminkan bentuk objek sebenarnya.

Pendekatan yang lebih dinamis diilustrasikan Xu, Stiubianu and Gorodetsky (2018), yang mengembangkan sistem pemantul inframerah adaptif terinspirasi kemampuan kamuflase sefalopoda. Sistem itu memungkinkan perubahan emisivitas secara aktif sebagai respons terhadap lingkungan, meniru cara cumi-cumi mengubah warna kulitnya. Yang dkk. (2021) memperluas tinjauan ini dengan menekankan bahwa material adaptif inframerah umumnya memanfaatkan transisi fasa, perubahan struktur kristal, atau migrasi ion sebagai pemicu perubahan sifat optik. Perkembangan terbaru bahkan mengarah pada kain metafabric dengan emisivitas inframerah sangat rendah

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

yang sekaligus mampu mengelola panas dan gelombang elektromagnetik, sebagaimana dilaporkan Yu dkk. (2025). Arah ini menarik karena membawa riset stealth keluar dari laboratorium dan mendekat ke bentuk yang dapat dipakai pada personel maupun platform.

Salah satu material yang paling banyak diteliti untuk keperluan ini adalah vanadium dioksida atau VO_2, yang mengalami transisi fasa insulator-logam pada suhu sekitar 68 derajat Celsius dan disertai perubahan emisivitas cukup besar. Ji dkk. (2018) mengembangkan nanopartikel inti-cangkang VO_2/ZnS untuk memperbaiki warna dan meningkatkan ketahanan oksidasi, dua persoalan yang selama ini membatasi penerapan VO_2. Namun suhu transisi yang jauh di atas suhu operasional normal menjadi kendala tersendiri, sehingga upaya pendopingan untuk menurunkannya masih terus dilakukan.

Kamuflase Tampak dan Warna Struktural

Pada pita tampak, kamuflase konvensional mengandalkan pigmen yang menyerap sebagian panjang gelombang. Pendekatan ini punya keterbatasan mendasar: warnanya statis, sehingga kontras muncul kembali begitu lingkungan berubah. Alternatif yang kini berkembang adalah warna struktural, yaitu warna yang muncul akibat interferensi cahaya pada struktur periodik berskala nano, bukan akibat penyerapan pigmen. Keunggulannya, warna jenis ini bisa berubah secara aktif apabila struktur periodiknya dapat dikendalikan.

Zhang dkk. (2022) mendemonstrasikan kristal fotonik lunak berbasis kristal cair fase biru yang diintegrasikan dengan MXene, sehingga warna dapat diubah secara elektrokromik sekaligus memberi fungsi kamuflase inframerah. Yang membuatnya menonjol adalah kemampuannya merangkum dua pita spektral sekaligus dalam satu material, meski kompleksitas fabrikasinya masih tinggi. Lu dkk. (2024) melangkah lebih jauh dengan komposit logam cair berpola kisi pada poliester termetalsasi, yang kemampuan perisai elektromagnetiknya dapat dinyalakan dan dimatikan, sekaligus memberi kinerja stealth inframerah. Kemampuan beralih semacam itu penting karena sebuah platform kadang perlu memancarkan tanda pengenal sendiri dan kadang harus menghilang. Yang dkk. (2024) mengembangkan metode pencetakan berkecepatan tinggi untuk menghasilkan grafis warna struktural dengan pantulan melingkar terpolarisasi dan respons mekanokromik, sebuah langkah ke arah produksi skala besar yang selama ini menjadi hambatan utama warna struktural.

Integrasi Multispektral sebagai Tantangan Utama

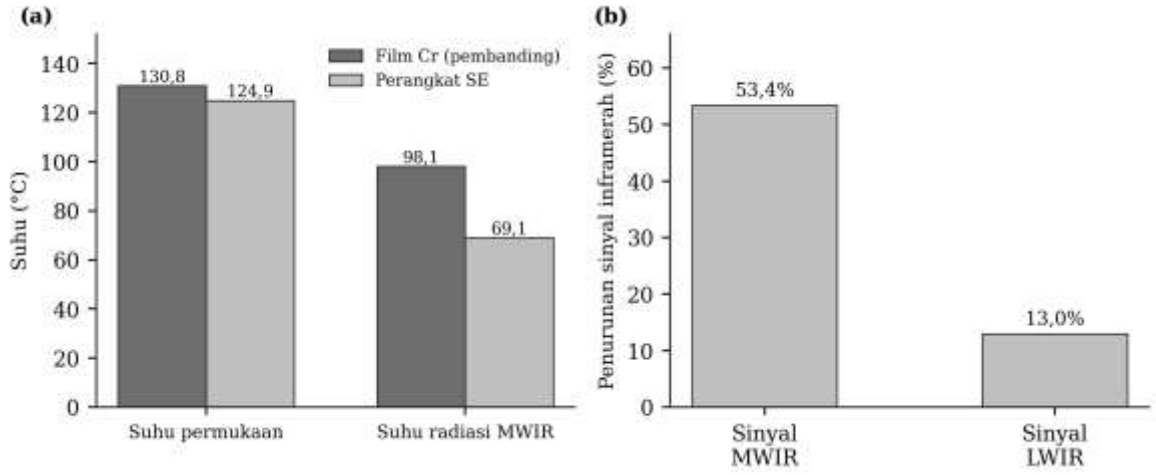
Apabila setiap pita spektral dibahas terpisah, kesan yang muncul adalah bahwa solusi untuk masing-masing pita sudah tersedia. Kenyataannya tidak demikian, karena tuntutan antarpita sering saling bertentangan. Penyerapan gelombang mikro yang baik menuntut konduktivitas tertentu, sedangkan emisivitas inframerah yang rendah menuntut sifat optik yang lain. Warna tampak yang menyatu dengan lingkungan menuntut reflektansi tertentu pada panjang gelombang 400 sampai 700 nanometer, yang tidak selalu sejalan dengan kebutuhan pita radar.

Zhu dkk. (2021) memberi salah satu contoh paling jelas mengenai kerumitan ini lewat struktur yang memisahkan fungsi secara berlapis: satu lapisan menangani penyerapan gelombang mikro, lapisan lain menangani pendinginan radiatif, dan lapisan ketiga menangani kamuflase tampak serta laser. Keberhasilan pendekatan berlapis ini menunjukkan bahwa integrasi multispektral lebih mungkin dicapai melalui arsitektur material berlapis daripada melalui pencarian satu material tunggal yang memenuhi semua fungsi.

Angka hasil pengujian Zhu dkk. (2021) memperlihatkan seberapa besar manfaat nyata dari arsitektur berlapis itu. Pada masukan daya 25 W, suhu permukaan perangkat berlapis tercatat 124,9 °C, sementara film kromium sebagai pembanding mencapai 130,8 °C. Selisihnya memang hanya 5,9 °C, tetapi akibatnya pada sinyal inframerah jauh lebih besar: suhu radiasi pada MWIR turun dari 98,1 °C menjadi 69,1 °C. Secara keseluruhan, intensitas sinyal inframerah pada MWIR turun 53,4 persen, sedangkan pada LWIR turun 13,0 persen (Gambar 3). Penurunan yang jauh lebih kecil pada LWIR menunjukkan bahwa pengendalian emisivitas tidak bekerja merata di seluruh pita, dan inilah yang membuat perancangan kamuflase termal menjadi rumit.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 2. Kinerja perangkat kamuflase multispektral berlapis pada masukan daya 25 W: (a) suhu permukaan dan suhu radiasi MWIR, dibandingkan film kromium sebagai pembanding; (b) penurunan intensitas sinyal inframerah pada pita MWIR dan LWIR. Sumber: diolah dari Zhu dkk. (2021).

Hal lain yang jarang dibahas adalah efek pendinginan radiatif pada jendela non-atmosfer. Zhu dkk. (2021) melaporkan bahwa pada suhu permukaan 150 °C, pelepasan panas melalui jendela 5–8 μm meningkatkan daya pendinginan total dari 136 W m^{-2} menjadi 252 W m^{-2}, hampir dua kali lipat. Bagi platform yang menghasilkan panas internal besar, kemampuan membuang panas justru menjadi kebutuhan operasional, bukan sekadar bonus. Di sinilah terlihat bahwa kamuflase termal dan manajemen termal sebenarnya dua sisi dari persoalan yang sama.

Dari sudut pandang rekayasa, arsitektur berlapis membawa konsekuensi tersendiri. Penambahan lapisan berarti penambahan massa, ketebalan, dan kerumitan manufaktur. Pada aplikasi dirgantara, setiap kilogram dan setiap milimeter berarti, sehingga optimasi multispektral pada akhirnya bukan persoalan material semata, melainkan persoalan perancangan sistem.

Perbandingan Antarkeluarga Material

Berdasarkan telaah di atas, perbandingan antarkeluarga material dapat diringkas seperti pada Tabel 1. Perbandingan ini bersifat kualitatif dan dimaksudkan memberi gambaran mengenai posisi masing-masing keluarga material, bukan sebagai peringkat kinerja.

Tabel 1. Perbandingan kualitatif keluarga material penyerap dan material kamuflase

Keluarga material	Mekanisme dominan	Keunggulan	Keterbatasan utama
Berbasis karbon	Dielectric loss	Ringan, konduktif, morfologi mudah direkayasa	Impedansi mudah tidak cocok, rentan kelembapan
Besi karbonil	Magnetic loss	Matang secara industri, biaya relatif rendah	Densitas tinggi, pita relatif sempit
Ferit spinel	Magnetic loss	Resistivitas tinggi, stabilitas kimia baik	Berat, fraksi volume magnetik terbatas
MXene	Dielectric loss dan polarisasi antarmuka	Penyerapan tinggi pada ketebalan tipis	Stabilitas oksidasi rendah, sintesis belum skalabel
Metamaterial	Resonansi geometris	Sangat tipis, frekuensi dapat disetel	Pita sempit, sensitif sudut dan polarisasi
Keramik	Dielectric loss pada suhu tinggi	Tahan suhu ekstrem	Fabrikasi sulit, optimasi suhu ruang tidak berlaku
Plasma	Modifikasi dielektrik efektif	Tidak menambah massa struktur	Butuh daya, kompleks, bergantung atmosfer

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

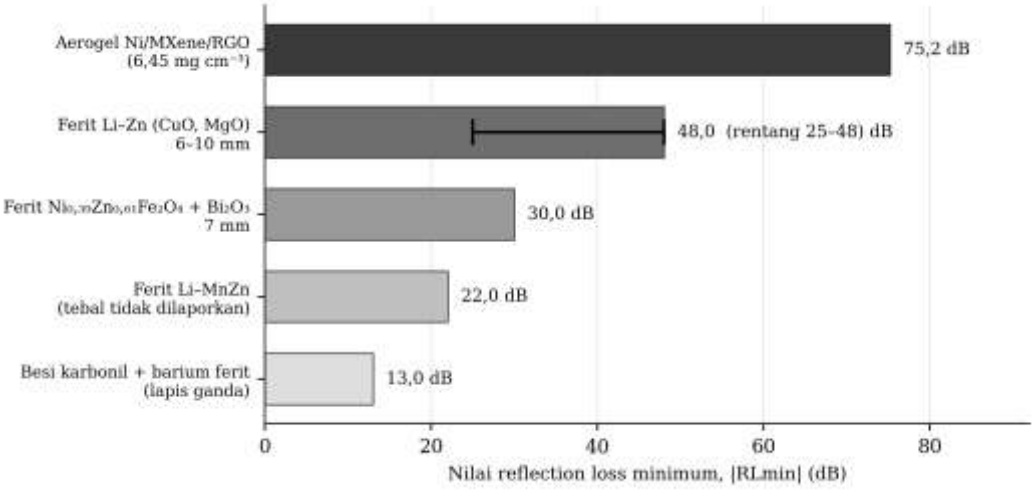
VO_2 dan material fasa	Perubahan emisivitas	Adaptif terhadap lingkungan	Suhu transisi tinggi, oksidasi terbatas
Kristal fotonik	Interferensi optik	Warna aktif, dapat disatukan dengan pita lain	Fabrikasi kompleks, skalabilitas terbatas

Selain perbandingan kualitatif, sejumlah studi melaporkan angka kinerja yang dapat disandingkan sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Angka-angka ini dikutip apa adanya dari publikasi aslinya, termasuk ketebalan spesimen, karena tanpa informasi ketebalan sebuah nilai reflection loss kehilangan makna.

Tabel 2. Nilai kinerja yang dilaporkan sejumlah studi penyerap gelombang elektromagnetik

Material	**|RLmin| (dB)**	**Lebar pita efektif**	**Ketebalan**	**Sumber**
Aerogel Ni/MXene/RGO	75,2	7,3 GHz	tipis, 6,45 mg cm^{-3}	Liang dkk. (2021)
Lapis ganda Cu-ITO-Cu (pita X)	> 8,25	8–12 GHz (X-band)	≈ 1 mm (FR4)	Zhu dkk. (2021)
Ferit Li–Zn + CuO, MgO	25–48	n/a	6–10 mm	Kostishin dkk. (2024)
Ferit $Ni_{0,39}Zn_{0,61}Fe_2O_4$ + Bi_2O_3	30,0	980 MHz	7 mm	Kostishin dkk. (2024)
Ferit Li–MnZn	22,0	2 GHz	n/a	Kostishin dkk. (2024)
Besi karbonil + barium ferit	> 8	2–18 GHz	n/a	Delfini dkk. (2018)

Angka-angka yang dilaporkan berbagai studi memperjelas gambaran pada Tabel 1. Gambar 2 merangkum nilai reflection loss minimum yang dicapai beberapa keluarga material, lengkap dengan ketebalan spesimen yang dilaporkan. Yang perlu dicatat, perbandingan ini bukan perbandingan setara, karena ketebalan dan metode pengukurannya berbeda. Aerogel Ni/MXene/RGO yang dilaporkan Liang dkk. (2021) mencapai |RLmin| 75,2 dB pada ketebalan sangat tipis dan densitas hanya 6,45 mg cm^{-3}, angka yang tampak jauh lebih baik daripada ferit $Ni_{0,39}Zn_{0,61}Fe_2O_4$ yang mencapai 30 dB pada ketebalan 7 mm. Namun keduanya tidak dapat langsung diadu, karena yang satu berupa aerogel berpori dan yang lain berupa keramik padat.



Gambar 3. Nilai reflection loss minimum yang dilaporkan beberapa keluarga material penyerap. Batang abu-abu menunjukkan nilai tunggal, garis putus-putus pada ferit Li–Zn menunjukkan rentang 25–48 dB. Sumber: disusun penulis berdasarkan Liang dkk. (2021), Kostishin dkk. (2024), dan Delfini dkk. (2018).

Contoh lain memperlihatkan betapa lebar sebaran hasil antarpublikasi. Ferit Li–Zn dengan tambahan CuO dan MgO dilaporkan mencapai |RLmin| antara 25 dan 48 dB, tetapi hanya pada ketebalan 6 sampai 10 mm. Sementara itu kombinasi besi karbonil dan barium ferit dalam bentuk lapis ganda hanya mencapai 13 dB, meski keunggulannya justru terletak pada lebar pita, yaitu di bawah −8 dB sepanjang 2 sampai 18 GHz (Delfini dkk., 2018). Di sinilah terlihat bahwa angka RLmin tunggal memang menyesatkan: material dengan nilai minimum paling rendah belum tentu paling berguna, karena bisa jadi hanya bekerja pada satu titik frekuensi.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Satu pola yang muncul dari perbandingan tersebut adalah adanya pertukaran yang konsisten antara lebar pita, ketebalan, dan massa. Tidak ada satu pun keluarga material yang unggul pada ketiga aspek sekaligus. Temuan ini sejalan dengan penilaian Hou dkk. (2024) bahwa kemajuan pada bidang ini lebih banyak berasal dari optimasi keseimbangan daripada dari penemuan material yang benar-benar baru.

Kesenjangan Riset dan Peluang bagi Indonesia

Ada tiga kesenjangan yang terlihat dari literatur yang terkumpul. Yang paling mendasar bersifat metodologis. Sebagian besar publikasi melaporkan kinerja berdasarkan simulasi atau pengukuran laboratorium pada spesimen berukuran kecil, sementara validasi pada struktur nyata masih jarang. Isari dkk. (2024) menyoroti bahwa selisih antara nilai yang dilaporkan dan penurunan RCS yang terukur pada objek nyata sering kali cukup besar, dan itu sebaiknya disampaikan terus terang dalam setiap pelaporan.

Kesenjangan berikutnya menyangkut penerapan. Ketahanan lingkungan, biaya produksi, dan ketersediaan bahan baku belum menjadi bagian standar dari pelaporan kinerja. Padahal bagi negara yang sedang membangun kemandirian industri pertahanan, ketiga hal itu justru menjadi penentu utama apakah suatu material layak diadopsi atau tidak.

Yang terakhir bersifat kontekstual. Penelusuran pada basis data menunjukkan publikasi dari institusi Indonesia mengenai material stealth dan penyerap gelombang elektromagnetik sangat sedikit jumlahnya. Publikasi dalam negeri yang ada lebih banyak membahas komposit struktural untuk alutsista, dan belum menyentuh aspek penyerapan gelombang secara mendalam. Kondisi ini bisa dibaca sebagai kekurangan, tetapi juga sebagai peluang, karena bidang ini masih terbuka luas bagi peneliti nasional, terutama bila diarahkan pada pemanfaatan bahan baku lokal.

Beberapa arah yang tampak menjanjikan untuk konteks Indonesia antara lain pemanfaatan mineral besi lokal sebagai sumber partikel magnetik, pengembangan penyerap berbasis biomassa karbon, serta kajian awal mengenai karakterisasi RCS platform kecil seperti kendaraan tak berawak. Arah-arah tersebut memiliki kesamaan karakteristik: memanfaatkan sumber daya yang tersedia di dalam negeri, tidak menuntut fasilitas sintesis yang sangat canggih, dan memiliki jalur penerapan yang jelas.

IV. KESIMPULAN

Dari telaah terhadap 40 artikel yang terkumpul, kinerja sebuah material penyerap gelombang elektromagnetik ternyata ditentukan oleh keseimbangan antara pencocokan impedansi dan kemampuan disipasi energi, bukan oleh besarnya atenuasi semata; material dengan atenuasi sangat tinggi dapat justru memantulkan gelombang apabila impedansinya tidak cocok dengan ruang bebas. Setiap keluarga material juga membawa keterbatasan yang saling bertolak belakang, sehingga tidak ada satu material tunggal yang mampu memenuhi seluruh tuntutan lebar pita, ketebalan, massa, dan ketahanan lingkungan sekaligus. Karena itu, tantangan utama pengembangan material kamuflase dewasa ini bukan terletak pada pencapaian nilai penyerapan rendah di skala laboratorium, melainkan pada penyatuan kemampuan radar, inframerah, dan tampak dalam satu arsitektur yang sekaligus memenuhi tuntutan mekanis dan ekonomis.

Tinjauan ini tentu memiliki keterbatasan. Pengelompokan tema dilakukan secara naratif dan tidak mengikuti protokol tinjauan sistematis yang ketat, sehingga potensi bias seleksi tidak dapat dikesampingkan sepenuhnya. Analisis juga dilakukan berdasarkan metadata dan abstrak artikel, bukan pembacaan menyeluruh terhadap setiap naskah, sehingga rincian metodologis tiap studi belum terverifikasi sepenuhnya. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan tinjauan sistematis dengan protokol yang terdaftar, sekaligus membandingkan kinerja antarpublikasi secara kuantitatif dengan mengendalikan variabel ketebalan dan metode pengukuran.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

DAFTAR PUSTAKA

Bai, B., Li, X., Xu, J. and Liu, Y. (2015) 'Reflections of electromagnetic waves obliquely incident on a multilayer stealth structure with plasma and radar absorbing material', IEEE Transactions on Plasma Science, 43(8), pp. 2588–2597. doi: 10.1109/TPS.2015.2447536.

Cao, M.-S. et al. (2019) '2D MXenes: electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding', Chemical Engineering Journal, 359, pp. 1265–1302. doi: 10.1016/j.cej.2018.11.051.

Chaudhury, B. and Chaturvedi, S. (2005) 'Three-dimensional computation of reduction in radar cross section using plasma shielding', IEEE Transactions on Plasma Science, 33(6), pp. 2027–2034. doi: 10.1109/TPS.2005.860122.

Chen, G. et al. (2024) 'Mechanisms, design, and fabrication strategies for emerging electromagnetic wave-absorbing materials', Cell Reports Physical Science, 5(7), p. 102097. doi: 10.1016/j.xcrp.2024.102097.

Chen, W., Balanis, C. A. and Birtcher, C. R. (2015) 'Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63(6), pp. 2636–2645. doi: 10.1109/TAP.2015.2414440.

Chung, D.D.L. (2001) 'Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials', Carbon, 39(2), pp. 279–285. doi: 10.1016/S0008-6223(00)00184-6.

Delfini, A. et al. (2018) 'Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment', Materials, 11(9), p. 1730. doi: 10.3390/ma11091730.

Ding, F. et al. (2012) 'Ultra-broadband microwave metamaterial absorber', Applied Physics Letters, 100(10), p. 103506. doi: 10.1063/1.3692178.

Hou, Z.-L. et al. (2024) 'A perspective on impedance matching and resonance absorption mechanism for electromagnetic wave absorbing', Carbon, 222, p. 118935. doi: 10.1016/j.carbon.2024.118935.

Hu, R. et al. (2021) 'Thermal camouflaging metamaterials', Materials Today, 45, pp. 120–141. doi: 10.1016/j.mattod.2020.11.013.

Hutagalung, A. Y. M., Aritonang, S. and Murniati, R. (2025) 'Eksistensi material komposit guna menunjang alutsista pertahanan negara', Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, 8(1). doi: 10.30596/rmme.v8i1.17378.

Iqbal, A. et al. (2020) 'Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti3CNTx (MXene)', Science, 369(6502), pp. 446–450. doi: 10.1126/science.aba7977.

Isari, A. A. et al. (2024) 'Structural design for EMI shielding: from underlying mechanisms to common pitfalls', Advanced Materials, 36(24), p. 2310683. doi: 10.1002/adma.202310683.

Ji, H. et al. (2018) 'VO2/ZnS core-shell nanoparticle for the adaptive infrared camouflage application with modified color and enhanced oxidation resistance', Solar Energy Materials and Solar Cells, 176, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.solmat.2017.11.037.

Kim, S.-H. et al. (2023) 'Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies', Advanced Science, 10(32), p. 2303104. doi: 10.1002/advs.202303104.

Kostishin, V. G., Isaev, I. M. and Salogub, D. V. (2024) 'Radio-absorbing magnetic polymer composites based on spinel ferrites: a review', Polymers, 16(7), p. 1003. doi: 10.3390/polym16071003.

Liang, L. et al. (2021) 'Multifunctional magnetic Ti3C2Tx MXene/graphene aerogel with superior electromagnetic wave absorption performance', ACS Nano, 15(4), pp. 6622–6632. doi: 10.1021/acsnano.0c09982.

Ling, H., Chou, R.-C. and Lee, S.-W. (1989) 'Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37(2), pp. 194–205. doi: 10.1109/8.18706.

Liu, J. et al. (2017) 'Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding', Advanced Materials, 29(38), p. 1702367. doi: 10.1002/adma.201702367.

Lu, Y. et al. (2024) 'Stretchable liquid metal grid/metallized polyurethane composites with switchable electromagnetic interference shielding and efficient infrared stealth performance', Chemical Engineering Journal, 500, p. 157311. doi: 10.1016/j.cej.2024.157311.

Paquay, M. et al. (2007) 'Thin AMC structure for radar cross-section reduction', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 55(12), pp. 3630–3638. doi: 10.1109/TAP.2007.910306.

Qing, Y. et al. (2015) 'Graphene nanosheet- and flake carbonyl iron particle-filled epoxy-silicone composites as thin-thickness and wide-bandwidth microwave absorber', Carbon, 86, pp. 98–107. doi: 10.1016/j.carbon.2015.01.002.

Qiu, J. et al. (2015) 'Fabrication and microwave absorption properties of magnetite nanoparticle–carbon nanotube–hollow carbon fiber composites', Carbon, 81, pp. 20–28. doi: 10.1016/j.carbon.2014.09.011.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Shahzad, F. et al. (2016) 'Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)', Science, 353(6304), pp. 1137–1140. doi: 10.1126/science.aag2421.

Shimoni, M., Haelterman, R. and Perneel, C. (2019) 'Hyperspectral imaging for military and security applications: combining myriad processing and sensing techniques', IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 7(2), pp. 101–117. doi: 10.1109/MGRS.2019.2902525.

Sista, K. S. et al. (2021) 'Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding: a review', Journal of Alloys and Compounds, 853, p. 157251. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157251.

Tang, K. et al. (2025) 'Research progress on high-temperature-resistant electromagnetic wave absorbers based on ceramic materials: a review', Nanomaterials, 15(4), p. 268. doi: 10.3390/nano15040268.

Thomassin, J.-M. et al. (2013) 'Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials', Materials Science and Engineering: R: Reports, 74(7), pp. 211–232. doi: 10.1016/j.mser.2013.06.001.

Watts, C. M., Liu, X. and Padilla, W. J. (2012) 'Metamaterial electromagnetic wave absorbers', Advanced Materials, 24(23), pp. OP98–OP120. doi: 10.1002/adma.201200674.

Wu, Y. et al. (2022) 'Ultrabroad microwave absorption ability and infrared stealth property of nano-micro CuS@rGO lightweight aerogels', Nano-Micro Letters, 14(1), p. 171. doi: 10.1007/s40820-022-00906-5.

Xiong, X. et al. (2024) 'Recent progress in carbon-based materials and loss mechanisms for electromagnetic wave absorption', Carbon, 219, p. 118834. doi: 10.1016/j.carbon.2024.118834.

Xu, C., Stiubianu, G. T. and Gorodetsky, A. A. (2018) 'Adaptive infrared-reflecting systems inspired by cephalopods', Science, 359(6383), pp. 1495–1500. doi: 10.1126/science.aar5191.

Xu, Z. et al. (2023) 'Bionic structures for optimizing the design of stealth materials', Physical Chemistry Chemical Physics, 25(8), pp. 5913–5925. doi: 10.1039/D2CP06086H.

Yang, J. et al. (2021) 'Beyond the visible: bioinspired infrared adaptive materials', Advanced Materials, 33(14), p. 2004754. doi: 10.1002/adma.202004754.

Yang, Y. et al. (2024) 'High-throughput printing of customized structural-color graphics with circularly polarized reflection and mechanochromic response', Matter, 7(6), pp. 2091–2107. doi: 10.1016/j.matt.2024.03.011.

Yu, R. et al. (2025) 'Infrared ultralow-emissivity polymeric metafabric conductors enabling remarkable electromagnetic and thermal management', Advanced Functional Materials, 35(22), p. 2421347. doi: 10.1002/adfm.202421347.

Zhang, J. et al. (2020) 'Scalable manufacturing of free-standing, strong Ti3C2Tx MXene films with outstanding conductivity', Advanced Materials, 32(23), p. 2001093. doi: 10.1002/adma.202001093.

Zhang, X. et al. (2015) 'Thermal conversion of an Fe3O4@metal-organic framework: a new method for an efficient Fe-Co/nanoporous carbon microwave absorbing material', Nanoscale, 7(30), pp. 12932–12942. doi: 10.1039/C5NR03176A.

Zhang, X. et al. (2022) 'Three-dimensional electrochromic soft photonic crystals based on MXene-integrated blue phase liquid crystals for bioinspired visible and infrared camouflage', Angewandte Chemie International Edition, 61(42), p. e202211030. doi: 10.1002/anie.202211030.

Zhu, H. et al. (2021) 'Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling', Nature Communications, 12(1), p. 1805. doi: 10.1038/s41467-021-22051-0.