

Analisis Perbandingan Efektivitas Dan Stabilitas Oksidasi Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGo}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Mxene}$, Dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNT}$ Sebagai Material Penyerap Gelombang Radar

Adzka Kamilah Tauhidah^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: adzka.tauhidah@gmail.com

ABSTRACT

This research focuses on a literature review regarding radar wave absorbing materials or Radar Absorbing Material (RAM) that uses Fe_3O_4 -based composites with three main matrices, namely reduced graphene oxide (rGO), MXene, and carbon nanotubes (CNT). This topic is important because the ability of a defense system, whether air, sea, or land, in reducing radar detection is greatly influenced by the effectiveness of electromagnetic wave absorbing materials. Fe_3O_4 materials are known to have strong magnetic properties, while rGO, MXene, and CNT function as conductive materials that can increase absorption through dielectric loss and impedance matching mechanisms. By understanding the comparative characteristics of the three, it is hoped that it will be possible to determine which material is the most effective and stable for use in stealth applications in defense environments.

Keywords: Radar Absorbing Material, Reflection Loss, Mxene, Graphene, Carbon nanotubes

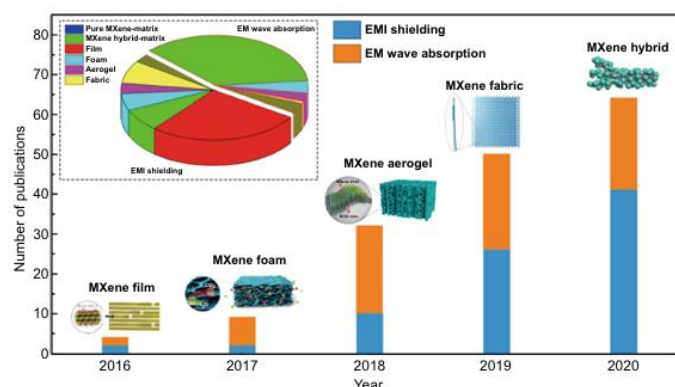
PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pertahanan tentunya akan menuntut adanya pertahanan modern yang mencakup berbagai aspek penting memastikan kekuatan maupun adaptabilitas suatu negara dalam menghadapi berbagai ancaman. Dalam menghadapi ancaman itulah tentunya negara memerlukan properti salah satunya dalam bentuk alutsista modern mulai dari pesawat tempur, kapal perang maupun sistem pertahanan yang dapat berupa rudal. Namun Alutsista tersebut tidak hanya dinilai dari segi ketahanan, namun diperlukannya *stealth technology* atau menyamarkan jejak elektromagnetik sehingga kerahasiaan operasi juga mendukung dalam meningkatkan efektivitas sistem militer.

Salah satu komponen penting yang dibutuhkan ialah material *Radar Absorbing Material* (RAM), yaitu material yang dirancang untuk mengurangi pantulan gelombang elektromagnetik dari radar dengan cara menyerap gelombang elektromagnetiknya dari permukaan objek baik pada pesawat tempur, kapal perang, kendaraan taktis maupun sistem pertahanan lainnya. Dalam beberapa penelitian terakhir terdapat berbagai jenis material yang telah diteliti secara global sebagai material penyerap gelombang, baik dari material berdimensi satu (1D) maupun dua dimensi (2D). Di antara material tadi, material 2D menjadi pilihan terbaik dikarenakan memiliki berat yang ringan, rasio aspek yang besar, serta sifat elektronik yang unggul [1].

Seperti yang telah disebutkan penelitian RAM mengalami peningkatan dari penggunaan material ferit konvensional menuju material komposit berbasis karbon dan logam oksida seperti *Reduced Graphene Oxide* (rGO), *carbon nanotube* (CNT), dan material dua dimensi yang baru yaitu Mxene [2] [3]. Mxene merupakan material baru yang pertama kali ditemukan pada tahun 2011 di Universitas Drexel dan disintesis pertama kali oleh Naguib pada tahun yang sama.

Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) sendiri memiliki struktur berlapis mirip dengan graphene tetapi memiliki kelebihan dimana kemampuannya dalam konduktivitas polarisasi yang lebih baik karena adanya gugus fungsi permukaan (-OH, -F, -O). Saat ini penelitian berbasis Mxene masih berada dalam tahap eksplorasi, namun sifat-sifat unggul material ini telah mendapat banyak pengakuan khususnya pada tahun 2016, Mxene menjadi material utama dalam EMI *shielding* dan RAM dengan jumlah publikasi yang tumbuh paling cepat. Dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Peningkatan Mxene sebagai material EMI [4]

Kombinasi Mxene dengan oksida magnetic seperti Fe_3O_4 terbukti dapat meningkatkan efek *multiple reflection* dan *magnetic loss*, serta dalam memperbaiki *impedance matching* sehingga dapat memperluas *effective absorption bandwidth* (EAB). Beberapa penelitian lain juga menyebutkan dengan adanya kombinasi antara graphene maupun rGO dengan partikel magnetik Fe_3O_4 dapat menghasilkan komposit dengan nilai *reflection loss* (RL) dibawah -40dB. Namun perbandingan langsung antara rGO/ Fe_3O_4 , Mxene/ Fe_3O_4 , atau CNT/ Fe_3O_4 sebagai material penyerapan gelombang masih belum banyak ditemukan terhadap parameter utama yaitu nilai (RL), (IL), serta stabilitas oksidasi lingkungan.

Dikarenakan Sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu bidang material tanpa mempertimbangkan keseimbangan antara nilai-nilai yang telah disebutkan tadi, sehingga masih terdapat gap dalam menentukan material komposit mana yang paling optimal dan efektif sebagai radar absorbing material (RAM) bagi aplikasi pertahanan dengan performa tinggi dan daya tahan lingkungan yang baik. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja elektromagnetik dari ketiga jenis material komposit penyerap berdasarkan nilai *reflection loss* (RL) dan *insertion Loss* (IL) pada rentang frekuensi yang dibutuhkan radar. Selanjutnya dapat menilai stabilitas oksidasi masing-masing material dengan ketahanan terbaik terhadap reaksi oksidasi. Maka diharapkan penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk menentukan material komposit paling efisien dan memiliki keseimbangan yang kuat dalam penyerapan dan ketahanannya untuk RAM dalam bidang aplikasi pertahanan.

METODE PENELITIAN

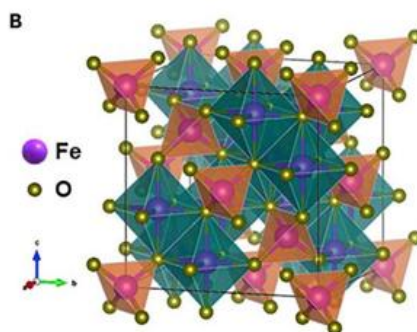
Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kajian Pustaka (literatur review) yang bertujuan agar dapat menganalisis dan membandingkan hasil-hasil dari penelitian terdahulu mengenai material penyerap gelombang (RAM) berbasis nanomaterial. Pendekatan ini dipilih dikarenakan sesuai dalam menemukan dan menggali informasi yang telah tersedia serta mengidentifikasi arah pengembangan material yang berpotensi dalam sistem pertahanan modern. Proses kajian dilakukan dengan menelusuri baik dari sumber internasional maupun nasional ilmiah bereputasi yang membahas penggunaan reduced graphene oxide (rGO), MXene, dan carbon nanotube (CNT) yang dikombinasikan dengan partikel magnetik yaitu Fe_3O_4 . Setiap literatur dan sumber yang dikaji berfokus pada pengukuran kinerja masing-masing material terhadap nilai refleksi (Reflection Loss, RL), insertion loss (IL), dan stabilitas oksidasi dalam rentang frekuensi radar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Umum Material Fe_3O_4

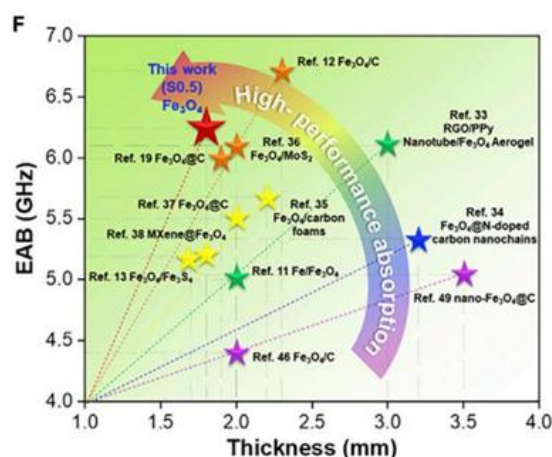
Magnetit (Fe_3O_4) sejenis ferit telah banyak digunakan untuk EMW dikarenakan biayanya yang rendah, ramah lingkungan, dan rugi magnetik yang tidak terlalu banyak [5]. Untuk mencapai penyerapan gelombang elektromagnetik yang tinggi maka dengan menggabungkan nanopartikel

Fe_3O_4 dengan bahan karbon dielektrik dianggap dapat mengurangi kepadatan dan dapat memperluas bandwidth penyerapan absorben, dapat digabungkan dengan komposit seperti Mxene/ Fe_3O_4 , Graphene/ Fe_3O_4 , maupun CNT/ Fe_3O_4 [6]



Gambar 1. Struktur Kristal Fe_3O_4 [7]

Pada gambar 1 menunjukan dimana adanya grup ruang $\text{Fd}3\text{m}$ khas Fe_3O_4 dimana Fe^{3+} berada pada situs oktahedral (hijau) dan Fe^{2+} Sebagian besar berada pada situs tetrahedral (oranye). Fe_3O_4 sendiri memiliki permeabilitas kompleks tinggi karena adanya ion Fe^{3+} dan ion Fe^{2+} yang dapat menyebabkan polarisasi spin dan resonansi ferromagnetic yang berperan penting dalam penyerapan gelombang melalui mekanisme adanya loss magnetic yang cocok sebagai material pendukung RAM.



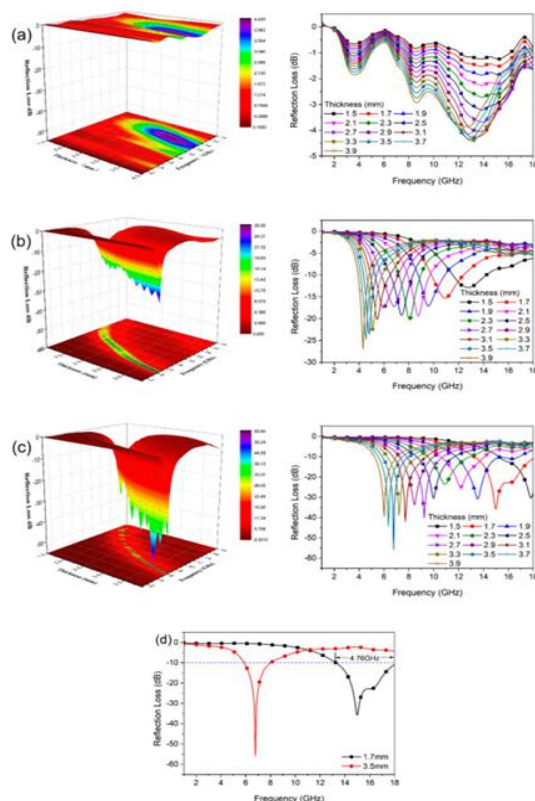
Gambar 2. Hubungan ketebalan dengan penyerapan gelombang dalam busa Fe_3O_4 [7]

Pada penelitian sebelumnya yang terdapat pada gambar dua adanya proses pembakaran otomatis sol-gel pada bahan Fe_3O_4 , namun tetap menunjukan bagaimana bahan dasar dari Fe_3O_4 menunjukan adanya kinerja yang unggul dengan semakin tebalnya bahan maka material komposit berbasis Fe_3O_4 baik dalam penyerapan EMW yang menonjol. Dikarenakan adanya modifikasi terhadap Fe_3O_4 itu sendiri, sebagaimana yang telah disebutkan dengan adanya pencampuran bahan material karbon tambahan, maka material RAM dapat memiliki efektivitas penyerapan gelombang elektromagnetik yang lebih tinggi, demi menjaga adanya kerahasiaan dalam operasi militer.

2. Kinerja Komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$

Lembaran nano Graphene (GN) banyak mendapat perhatian sebagai penyerap gelombang mikro dikarenakan adanya konduktivitas yang sangat baik serta bobotnya yang ringan [8] namun graphene tunggal tanpa adanya penambahan bahan tidak dapat mencapai kinerja penyerapan gelombang mikro yang ideal dikarenakan adanya permitivitas maupun permeabilitasnya yang rendah, yang dapat menyebabkan pencocokan impedansi elektromagnetik yang tidak menguntungkan. Demi mengatasi masalah ini banyak peneliti melakukan gabungan rGO dengan komponen magnetic salah satunya Fe_3O_4 [9].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Yu, Qi, et al (2019) dimana sintesis pembuatan oksida grafena grafena (rGO) menggunakan metode Humbers yang dimodifikasi, rGO dilarutkan dalam dietilen glikol (DEG) dan dicampur dengan FeCl_3 , kemudian dipanaskan pada suhu 220°C dalam atmosfer argon, larutan NaOH kemudian ditambahkan untuk menghasilkan komposit graphene oxide/ Fe_3O_4 rGO/ Fe_3O_4 , yang kemudian dimurnikan dan melalui sentrifugasi, pencucian maupun pengerisan, sebagai pembanding, nanopartikel Fe_3O_4 murni juga disintesis dengan metode serupa, sehingga menghasilkan grafik yang dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. a) nanopartikel Fe_3O_4 murni b) rGO (*reduced graphene oxide*) dan c) komposit gabungan antara rGO/ Fe_3O_4 masing-masing menampilkan variasi ketebalannya, d) grafik efektif penyerapan gelombang 4,76 GHz pada ketebalan 1,7mm dan mencapai nilai maximum RL sebesar -55,71 dB saat ketebalan 3,5mm [10]

Pada gambar 3 menampilkan adanya RL (*Reflection Loss*) terhadap frekuensi untuk sampel pada ketebalan yang berbeda, pada gambar a) menunjukkan kinerja penyerapan Fe_3O_4 kurang baik sehingga mendapat nilai minimum RL hanya 4,41 dB pada 13,07 GHz dengan ketebalan 3,3mm. untuk rGO kinerja yang dihasilkan lebih baik dari pada Fe_3O_4 murni dengan ketebalan 3,9mm ke frekuensi yang lebih rendah yaitu 4,21 GHz. Pada nanokomposit campuran antara rGO/ Fe_3O_4 menampilkan hasil yang jauh lebih baik dimana nilai serapan RL minimum mencapai -55,71 pada 6,78 GHz dengan ketebalan 3,5mm dan lebar pita penyerapan efektif tertinggi dengan nilai RL lebih rendah dari -10 dB adalah 4,76 GHz antara 13,24 dan 18 GHz pada ketebalan 1,7mm.

Maka dapat dilihat bahwa dengan adanya campuran antara komposit rGO/ Fe_3O_4 menunjukkan hasil perilaku ekstrapolarisasi dan kebingan magnetic yang keduanya meningkatkan sifat penyerapan gelombang elektromagnetik, dan dapat mendukung untuk mengembangkan bahan RAM menggunakan rGO didukung oleh nanokomposit Fe_3O_4 untuk aplikasi penyerapan radar deteksi.

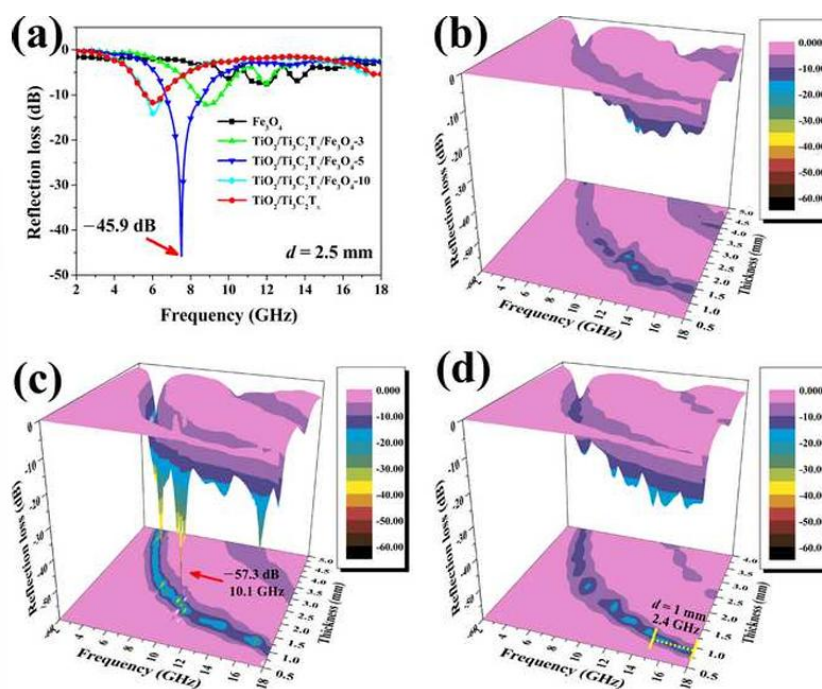
3. Kinerja Komposit Fe_3O_4 /Mxene

Seperti yang telah diketahui penyerapan gelombang yang baik harus sesuai dengan pencocokan impedansi dari kemampuan redaman yang baik, dimana mewakili lebih banyak gelombang mikro

memasuki bahan tersebut dan penyerapan gelombang yang efektif didalam bahan masing-masing [11]. Dimana kemampuan penyerapan dapat dinyatakan oleh *Reflection Loss* (RL), lebar pita penyerapan efektif (EAB) yang mengacu pada bandwith dimana RL kurang dari -10dB. Diantaranya ringan, kuat, kemampuan penyerapan, ketebalan tipis, serta EAB yang luas adalah empat factor yang paling penting dalam pemilihan bahan penyerapan gelombang [12].

Mxene merupakan seri baru logam transisi 2D seperti Graphene karbida/nitride ditemukan pada tahun 2011, diperoleh dengan etsa selektif atom lapisan A dari dari Ti_3AlC_2 , fase MAX klasik dari lapisan terner struktur [13]. Mxene memiliki morfologi 2D yang unik, konduktifitas, sifat mekanik yang baik, telah menunjukkan janji besar dalam penyimpanan energi, penyerapan gelombang elektromagnetik maupun perisai elektromagnetik [14]. Berbeda dengan rGO, Mxene memiliki lebih sedikit gugus fungsi permukaan sehingga membuatnya melemah dalam kemampuan gelas sendiri dan membatasi konstruksi makrostruktur 3D yang kuat dan berpori [15].

Pada percobaan yang dilakukan oleh Liu, et al (2018) sebanyak 10 g bubuk Mxene didispersikan dalam larutan HF pekat 50% dan diaduk selama 48 jam pada 60°C , kemudian disentrifugasi dan dicuci hingga pH 6. Setelah melalui proses karakterisasi komposit tersebut divariasikan dengan rasio berat Mxene/ Fe_3O_4 3, 5, dan 10 sebagai pembanding Mxene murni tanpa penambahan Fe_3O_4 [16].



Gambar 4. kurva *Reflection Loss* (RL) Hasil karakterisasi material Mxene/ Fe_3O_4

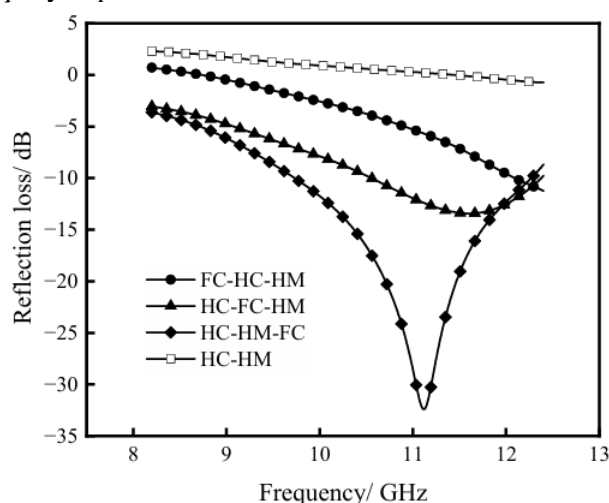
Ketebalan absorber memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap penyerapan maksimum dan nilai RL, oleh karena itu pada gambar 4 terdapat visual tentang pengaruh ketebalan terhadap kinerja penyerapan gelombang elektromagnetik. Dapat dilihat pada gambar 4a dimana material Mxene/ Fe_3O_4 -5 memiliki RL dengan nilai tertinggi pada ketebalan 2,5mm.

begitupun pada gambar 4c meskipun ketebalan semakin tipis ternyata material Mxene/ Fe_3O_4 -5 menunjukkan kinerja penyerapan paling unggul dengan nilai RL maksimum mencapai -57,3 dB pada 10,1 GHz telah dicapai pada ketebalan 1,9mm dan nilai bandwith efektifnya sekitar 2 GHz. Meskipun Mxene/ Fe_3O_4 pada tipe lain selain Mxene/ Fe_3O_4 -5 belum mencapai puncak maksimal, tetapi nilai yang didapatkan baik terhadap bandwith maupun RL telah mencukupi sebagai material penyerap gelombang, hal ini menunjukkan bahwa material ini dapat disesuaikan dan efektif dalam penyerapan gelombang untuk diaplikasikan terhadap pertahanan militer.

4. Kinerja komposit CNT/Fe₃O₄

Bahan karbon dianggap menjanjikan untuk penyerapan gelombang mikro yang efisien karena mekanisme kehilangan sinergisnya serta desainnya yang dapat disesuaikan [17]. Karbon nanotube (CNT) adalah nanomaterial karbon dengan sifat listrik dan mekaniknya yang dianggap luar biasa, xiaojun chen et al, mengungkapkan bahwa CNT memiliki konstanta yang dielektriknya tinggi, stabilitas termodinamika yang baik, dan kepadatannya yang rendah serta menunjukkan kinerja penyerapan gelombang yang menjanjikan ketika dipadukan dengan bahan matriks [18]. Beberapa bahan matriks yang memungkinkan yaitu co, Ni, Ag, maupun Fe [19].

Pada penelitian yang dilakukan oleh wenyan Gu et al [20] dimana ia menggunakan CNT dan bubuk Fe₃O₄ modifikasi kain nonwoven. Terdapat 3 jenis metode yaitu penggulangan panas, pencelupan, dan fabrikasi film, namun yang akan diambil ialah data fabrikasi film dimana metode ini sebagai perancang struktur multilayer yang optimal. Keberadaan film pada posisi yang tepat dapat meningkatkan kinerja penyerapan.



Gambar 5. Perbandingan rugi-refleksi film FC pada posisi berbeda dalam struktur penyerap tiga lapisan.

Pada grafik ini HC-HM-FC merupakan lapisan yang secara berurut dimana HC merupakan bahan pengisi filler berdasarkan CNT, HM merupakan campuran CNT dengan serbuk Fe₃O₄ dengan perbandingan 1:1, dan FC dengan bahan pengisi CNT. Pada grafik ini kurva HC-HM-FC mencapai nilai RL minimum sampai -33dB pada frekuensi 11GHz dengan ketebalan 2,3mm, merupakan nilai terdalam pada seluruh percobaan penelitian yang dilakukan. Maka dari itu struktur penyerapan multi lapis HC-HM-FC memiliki kinerja penyerapan paling baik, dikarenakan mendapatkan rentang frekuensi penyerapan efektif maksimum

5. Stabilitas Oksidasi Material

Penelitian yang dilakukan oleh saharudin et al [21] menyatakan bahwa Mxene mudah teroksidasi menjadi TiO₂ saat penyimpanan/termal/kelembapan sehingga menyebabkan kehilangan konduktivitas dan berubahnya sifat dielektrik, dengan adanya penetrasi melalui oksigen dan air dapat mempercepat degradasi. Oksidasi inilah yang dapat menurunkan performa RAM, sehingga perlu adanya passivation (pelapisan polimer), maupun modifikasi permukaan/hidrofobisasi.

Berbeda dengan rGO Hua, k, et al [22] menyatakan rGO relative lebih stabil terhadap oksidasi dibandingkan dengan Mxene, ditambah dengan adanya Fe₃O₄ yang terdistribusi pada permukaan RGO dapat melindungi Sebagian tetapi juga dapat mengkatalisasi oksidasi local tergantung pada fungsi permukaan. Dengan adanya stabilitas yang baik maka dapat membantu mempertahankan konduktivitas/dielestic loss sehingga performa RAM dapat dijaga dan konsisten pada waktu yang jangka Panjang.

Material terakhir yaitu CNT menurut Yu, Q, Wang, Y et al [23] material inilah yang paling tahan terhadap oksidasi diantara keduanya, dengan adanya tambahan Fe₃O₄ pada material CNT maka kemungkinan yang terjadi tidak mudah teroksidasi kecuali berada pada suhu yang benar-

benar tinggi, namun kelembapan dan lingkungan kimia tetap bisa mempengaruhi. Pilihan material CNT yang berkualitas tinggi merupakan pilihan paling tepat untuk digunakan sebagai material penyerapan gelombang.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa ketiga material komposit campuran yaitu Mxene/ Fe_3O_4 , rGO/ Fe_3O_4 , CNT/ Fe_3O_4 , menunjukkan kemampuan yang baik dan menjanjikan sebagai Radar Absorbing Material (RAM). Material Mxene/ Fe_3O_4 dinyatakan sebagai material yang memiliki nilai Reflection Loss (RL) terbaik yaitu mencapai -57,3 dB, dengan bandwidth efektifnya sekitar 2 GHz, menyatakan bahwa material Mxene/ Fe_3O_4 merupakan pilihan material terbaik sebagai penyerapan gelombang elektromagnetik dari radar dibandingkan material rGO/ Fe_3O_4 , maupun CNT/ Fe_3O_4 . Meskipun material rGO dan CNT tetap memiliki nilai penyerapan yang baik. Namun jika dilihat dari sisi stabilitas oksidasi maka CNT/ Fe_3O_4 memiliki ketahanan oksidasi tertinggi diantara ketiganya, dengan demikian material RAM tidak hanya bergantung pada sisi penyerapan gelombangnya saja namun juga melihat dari sisi ketahanan material terhadap lingkungan dan medan yang akan dihadapi, terlebih material ini akan digunakan pada kondisi operasional militer untuk menjaga kerahasiaannya secara beragam.

SARAN

Berdasarkan kajian ini maka disarankan untuk penelitian kedepannya dimana melakukan penelitian lebih lanjut untuk memvalidasi hasil kajian literatur ini dalam menguji ketahanan oksidasi maupun kinerja RAM dalam kondisi berbagai lingkungan secara nyata. Serta mengembangkan desain struktur multilayer yang dapat mengoptimalkan penyerapan serta ketebalan material, dan dapat mempertimbangkan aspek biaya produksi untuk aplikasi dalam industri pertahanan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Wen, M.S. Cao, M.M. Lu, W.Q. Cao, H.L. Shi et al., *Reduced graphene oxides: light-weight and high-efficiency electromagnetic interference shielding at elevated temperatures*. Adv. Mater. 26(21), 3484–3489 (2014). <https://doi.org/10.1002/adma.201400108>
- [2] R. Gautam, N. Marriwala, R. Devi, *A Review: Study of MXene and Graphene Together*, Measurement: Sensors, 25, 100592 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100592>
- [3] K. Hu, H. Wang, X. Zhang, H. Huang, T. Qiu, Y. Wang, C. Zhang, L. Pan, J. Yang, *Ultralight $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Foam with Superior Microwave Absorbing Performance*, Chemical Engineering Journal, 408, 127283 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127283>
- [4] P. He, M.-S. Cao, W.-Q. Cao, J. Yuan, *Developing MXenes from Wireless Communication to Electromagnetic Attenuation*, Nano-Micro Letters, 13, 115 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40820>
- [5] Wang, X., Geng, Q., Shi, G., Xu, G., Yu, J., Guan, Y., Zhang, Y., and Li, D. (2019). One-pot solvothermal synthesis of Fe/ Fe_3O_4 composites with broadband microwave absorption. J. Alloys Compd. 803, 818–825.
- [6] X. Jia., J. Wang., Zhu, X., Wang, T., Yang, F., Dong, W., Wang, G., Yang, H., and Wei, F. (2017). Synthesis of lightweight and flexible composite aerogel of mesoporous iron oxide threaded by carbon nanotubes for microwave absorption. J. Alloy. Compd. 697, 138–146
- [7] Chang, Q., Liang, H., Shi, B., & Wu, H. (2022). *Microstructure induced dielectric loss in lightweight Fe_3O_4 foam for electromagnetic wave absorption*. iScience, 25, 103925. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103925>
- [8] B. Wen., M. Cao., S.; Lu, M.; Cao, W.; Shi, H.; Liu, J.; Wang, X.; Jin, H.; Fang, X.; Wang, W.; et al. Reduced Graphene Oxides: Light-Weight and High-Efficiency Electromagnetic Interference Shielding at Elevated Temperatures. Adv. Mater. 2014, 26, 3484–3489.
- [9] H. R. Chu., Q. Zeng., P. Chen., Yu, Q.; Xu, D.-W.; Xiong, X.-H.; Wang, Q. Synthesis and

- electromagnetic wave absorption properties of matrimony vine-like iron oxide/reduced graphene oxide prepared by a facile method. *J. Alloy Compd.* 2017, 719, 296–307.
- [10] Q, Yu., Y, Wang., Chen, P., Nie, W., Chen, H., & Zhou, J. (2019). Reduced Graphene Oxide-Wrapped Super Dense Fe₃O₄ Nanoparticles with Enhanced Electromagnetic Wave Absorption Properties. *Nanomaterials*, 9*(6), 845. <https://doi.org/10.3390/nano9060845>
- [11] M. Naguib, V.N. Mochalin, M.W. Barsoum, Y. Gogotsi, 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials, *Adv. Mater.* 26 (2014) 992-1005.
- [12] H.B. Yang, J.J. Dai, X. Liu, Y. Lin, J.J. Wang, L. Wang, F. Wang, Layered PVB/Ba₃Co₂Fe₂₄O₄₁/Ti₃C₂ MXene composite: Enhanced electromagnetic wave absorption properties with high impedance match in a wide frequency range, *Mater. Chem. Phys.* 200 (2017) 179-186.
- [13] M. Naguib, M. Kurtoglu, V. Presser, J. Lu, J.J. Niu, M. Heon, L. Hultman, Y. Gogotsi, M.W. Barsoum, Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti₃AlC₂, *Adv. Mater.* 23 (2011) 4248-4253.
- [14] S. Srivatsa, P. Belthangadi, S. Ekambaram, M. Pai, P. Sen, T. Uhl, S. Kumar, K. Grabowski, M.M. Nayak, Dynamic response study of Ti₃C₂-MXene films to shockwave and impact forces, *RSC Adv.* 10 (2020) 29147-29155.
- [15] Y. Tong, M. He, Y.M. Zhou, X. Zhong, L.D. Fan, T.Y. Huang, Q. Liao, Y.J. Wang, Electromagnetic wave absorption properties in the centimetre-band of Ti₃C₂T_x MXenes with diverse etching time, *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* 29 (2018) 8078-8088.
- [16] P, iu ., Z, Yao., Ng, V. M. H., Zhou, J., Kong, L. B., & Yue, K. (2018). *Facile synthesis of ultrasmall Fe₃O₄ nanoparticles on MXenes for high microwave absorption performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 115, 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.10.014>
- [17] C, Kuila., A, Maji., Murmu, N.C.; Kuila, T.; Srivastava, S.K. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. *Carbon* 2023, 210, 118075.
- [18] X, Chen., H, Liu., D, Hu., Liu, H.; Ma, W. Recent advances in carbon nanotubes-based microwave absorbing composites. *Ceram. Int.* 2021, 47, 23749–23761.
- [19] Che, R.C.; Peng, L.M.; Duan, X.F.; Chen, Q.; Liang, X.L. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes. *Adv. Mater.* 2004, 16, 401–405.
- [20] R, Zhan, J, Zhang, Q, Gao., Jia, Q., Zhang, Zhang, G., & Gu, W. (2021). Microwave absorption performance of single-layer and multi-layer structures prepared by CNTs/Fe₃O₄ nonwoven materials. *Crystals*, 11(8), 1000. <https://doi.org/10.3390/cryst11081000>
- [21] M, Saharudin S., S, Hasbi., E, S, Ahmad., Sagar, S., Daoush, W. M., & Inam, F. (2024). *Comparative analysis of mechanical response in epoxy nanocomposites reinforced with MXene and other carbon-based nano-fillers: An experimental and numerical study.* *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, 26(1), 54–65. <https://doi.org/10.37934/armne.26.1.5465>
- [22] K, Hua., H, Wang., X, Zhang., H, Huang., Qiu, T., Wang, Y., Zhang, C., Pan, L., & Yang, J. (2024). *Ultralight Ti₃C₂T_x MXene foam with superior microwave absorption performance.* *Journal of Materials Science and Engineering*, Jiangsu Collaborative