

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 14 Nomor 3 Tahun 2025, hal 389-395

ANALISIS NILAI REFLECTION LOSS DAN SIFAT LISTRIK PADA KOMPOSIT PANI/rGO/Fe₃O₄

¹⁾Laili Arin Ramadhani, ²⁾Nugrahani Primary Putri, ³⁾Fitriana

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: lailiarin.21017@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nugrahaniprimary@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: fitrianafitriana@unesa.ac.id

Abstrak

Komposit berbasis Polianilin (PANI), *reduced Graphene Oxide* (rGO), dan Fe₃O₄ telah berhasil disintesis menggunakan metode polimerisasi *in situ* dengan memanfaatkan sumber bahan alam, yakni pasir besi Gunung Galunggung dan tempurung kelapa. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi komposit tersebut sebagai material penyerap gelombang mikro. Karakterisasi dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit mampu mencapai nilai *reflection loss* sebesar -40,48 dB pada frekuensi 10,1 GHz, nilai tersebut menandakan kemampuan penyerapan energi gelombang mikro hingga lebih dari 99%. Nilai permeabilitas 1,57 dan permittivitas 1,43 yang seimbang menunjukkan bahwa komposit ini memiliki pencocokan impedansi yang baik. Selain itu, nilai konduktivitas listrik yang diperoleh melalui pengujian EIS sebesar $1,19 \times 10^{-3}$ S/cm turut mendukung mekanisme penyerapan gelombang tanpa menimbulkan pantulan berlebih. Temuan ini mengindikasikan bahwa komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ kinerja yang sangat baik sebagai penyerap gelombang mikro, dengan struktur elektromagnetik dan sifat listrik yang saling mendukung untuk mengoptimalkan penyerapan energi gelombang.

Kata Kunci: PANI, rGO, Fe₃O₄, *Reflection loss*, penyerap gelombang mikro

Abstract

Composites based on Polyaniline (PANI), *reduced Graphene Oxide* (rGO), and Fe₃O₄ have been successfully synthesized using the *in situ* polymerization method by utilizing the source of natural materials, namely Galunggung Mountain iron sand and coconut shell. This research aims to assess the potential of the composite as a microwave absorber. Characterization was conducted using Vector Network Analyzer (VNA) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). The test results show that the composite is able to achieve a reflection loss value of -40.48 dB at a frequency of 10.1 GHz, this value indicates the ability to absorb microwave energy to more than 99%. The balanced permeability value of 1.57 and permittivity of 1.43 indicates that this composite has excellent impedance matching. In addition, the electrical conductivity value obtained through EIS testing of 1.19×10^{-3} S/cm also supports the wave absorption mechanism without causing excess reflections. These findings indicate that the PANI/rGO/Fe₃O₄ composite performs very well as a microwave absorber, with mutually supportive electromagnetic and electrical structures to optimize the energy absorption of waves.

Keywords: PANI, rGO, Fe₃O₄, *Reflection loss*, microwave absorber

I. PENDAHULUAN

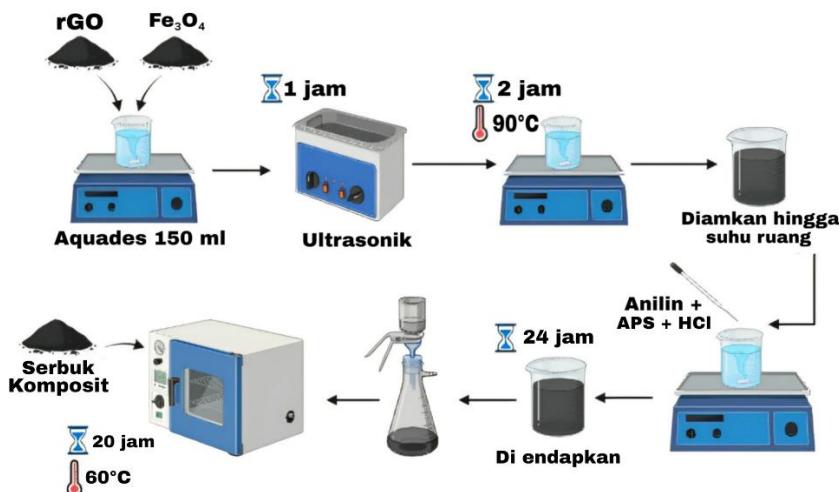
Indonesia dikenal sebagai negara yang kaya akan sumber daya alam dan memiliki wilayah laut dan udara yang sangat luas di kawasan Asia Tenggara. Negara ini memiliki kepulauan terbesar di dunia, dengan panjang garis pantai mencapai sekitar 81.000 km dan terdiri dari sekitar 17.000 pulau. Wilayah lautnya mencakup sekitar 5,8 juta km² atau sekitar 70% dari keseluruhan luas wilayah Indonesia. Letaknya yang strategis di antara dua benua menjadikan Indonesia sebagai jalur lintas penting antar wilayah. Kondisi geografis ini menimbulkan berbagai potensi ancaman, khususnya melalui jalur laut dan udara. Oleh karena itu, pemerintah telah menetapkan titik-titik strategis untuk menjaga keamanan dan pertahanan negara, di mana teknologi radar memegang peranan penting dalam memantau, mengawasi, dan mengendalikan wilayah udara Indonesia [1]. Salah satu teknologi militer yang memiliki nilai strategis karena selalu berkembang adalah radar. Di sisi lain, dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan teknologi anti-radar sebagai bagian dari sistem pertahanan negara terus mengalami peningkatan. Teknologi ini dikenal dengan sebutan teknologi siluman (*stealth technology*). Umumnya, teknologi ini diterapkan pada kapal perang dan pesawat tempur agar tidak terdeteksi oleh radar musuh [2]. Teknologi siluman pada kapal bertujuan agar kapal tidak terdeteksi oleh sistem radar. Teknologi ini sangat bergantung pada banyaknya gelombang elektromagnetik yang dipantulkan kembali ke perangkat penerima oleh objek sasaran [3].

Beragam jenis material telah dikembangkan sebagai penyerap gelombang radar, termasuk material berbasis karbon, ferit, dan berbagai jenis komposit. Material berbasis karbon seperti graphene, carbon nanotube, dan carbon fiber dikenal memiliki struktur yang ringan, luas permukaan besar, serta kemampuan penyerapan gelombang radar yang sangat efektif. Selain itu, penggunaan polimer konduktif dalam bentuk komposit juga banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan performa penyerapan gelombang mikro secara lebih optimal [4]. Material ferit seperti Fe₃O₄ turut menunjukkan sifat magnetik yang sangat baik dan mendukung mekanisme penyerapan berbasis loss magnetik. Namun, Fe₃O₄ memiliki kelemahan berupa nilai konduktivitas listrik yang relatif rendah, sehingga diperlukan penambahan material lain untuk meningkatkan kinerja konduktifnya. Material konduktif seperti polianilin (PANI) dan reduced graphene oxide (rGO) menjadi kandidat yang sesuai karena masing-masing memiliki karakteristik unggul, antara lain konduktivitas listrik yang tinggi, sifat optik yang khas, serta kestabilan kimia yang baik, sehingga sangat potensial untuk dikombinasikan dengan Fe₃O₄ dalam menghasilkan material penyerap gelombang radar yang lebih efisien dan stabil [5].

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini terdapat 3 tahapan penelitian yaitu sintesis Fe₃O₄, sintesis rGO dan juga komposit. Proses sintesis rGO dan Fe₃O₄ telah berhasil dilakukan, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan komposit. Pada penelitian ini menggunakan metode polimerisasi *in situ*. Dimana material Fe₃O₄ yang digunakan sebagai bahan dasar berasal dari bahan alam, yaitu pasir besi dari gunung Galunggung, Jawa Barat. Sintesis rGO juga berbahan dasar bahan alam yakni arang tempurung kelapa komersil, yang kemudian dihaluskan menggunakan alat bernama ball mill. Komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ dibuat dengan mereduksi *Graphene Oxide* (GO) dengan aniline diikuti oleh polimerisasi monomer aniline pada permukaan Fe₃O₄ yang dimuat oleh rGO. Komposit diawali dengan melarutkan *Reduced Graphene Oxide* (rGO) 0,2 g kedalam 150 ml aquades. Kemudian Fe₃O₄ 0,5 g ditambahkan ke dalam larutan rGO dan distirrer hingga homogen dan dilanjutkan pengadukan dengan ultrasonik selama 1 jam, setelah itu kembali distirrer selama 2 jam dengan suhu 90°C. Kemudian larutan dibiarkan pada suhu ruang hingga dingin. Setelah itu, aniline 4,5 ml ditambahkan kedalam larutan bersama dengan larutan 50 ml aquades dan 5,71 g *Ammonium Persulfate* (APS) dengan HCl 1 M dan diendapkan selama 24 jam dengan suhu 0-5°C. Terakhir, komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ dicuci dengan etanol dan aquades lalu dikeringkan selama 20 jam menggunakan oven pada suhu 60°C.

Gambar 1. Ilustrasi sintesis komposit PANI/rGO/Fe₃O₄

B. Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

Serbuk komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ yang sudah di sintesis kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) bertujuan untuk mengetahui kemampuan penyerapan dari material. Hasil VNA berupa nilai *reflection loss*, koefisien transmisi, koefisien serapan, permeabilitas relative, permitivitas relative dan kemampuan penyerapan gelombang. Nilai koefisien refleksi dari material tersebut dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Gamma = 10^{(RL/20)} \quad (1)$$

Setelah nilai koefisien refleksi didapatkan, maka dapat dicari nilai koefisien transmisi (T) sebagai berikut:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2)$$

Untuk menentukan koefisien serapan dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$A = \sqrt{-\left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left[\frac{1}{T}\right]^2\right)} \quad (3)$$

Permeabilitas relative (μ_r) dan permitivitas relative (ϵ_r) suatu material dapat dihitung dengan persamaan:

$$\mu_r = \frac{1+\Gamma}{A(1-\Gamma) \sqrt{\frac{1^2 + 1^2}{\lambda_0 + \lambda_c}}} \quad (4)$$

$$\epsilon_r = \mu_r \frac{(1-\Gamma)^2}{(1+\Gamma)^2} \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}\right) + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \frac{1}{\mu_r} \quad (5)$$

Kemampuan penyerapan gelombang elektromagnetik dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\% \text{ Penyerapan} = (1 - \Gamma) \times 100\% \quad (6)$$

Dengan RL merupakan nilai *reflection loss* (dB), Γ merupakan koefisien refleksi material, T merupakan koefisien transmisi material, S_{11} merupakan parameter reflektansi, S_{11}' dan S_{11}'' merupakan bilangan rill, S_{21} merupakan parameter transmisi, S_{21}' dan S_{21}'' merupakan bilangan rill, A merupakan koefisien serapan, L merupakan ketebalan material, μ_r merupakan permeabilitas relative, ϵ_r merupakan permitivitas relative, λ_0 merupakan panjang gelombang udara, λ_c merupakan panjang gelombang cutoff.

Selanjutnya karakterisasi menggunakan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) digunakan untuk mengetahui konduktivitas listrik. Pada pengujian menggunakan EIS diperlukan nilai R_{ct} untuk menghitung resistivitas sehingga mendapatkan nilai konduktivitas listrik. Kemudian juga diperlukan nilai Re dan R_3 digunakan untuk mencari nilai R_{ct} . Nilai R_{ct} tersebut dapat dicari dengan persamaan:

$$R_{ct} = R_3 - R_e \quad (7)$$

Untuk mengetahui konduktivitas listrik maka dapat emnggunakan persamaan berikut :

$$\rho = \frac{R_{ct} \cdot A}{l} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

Dengan R_{ct} merupakan resistansi transfer muatan (Ω), R_3 merupakan resistansi pada indeks tertentu (Ω), R_e merupakan resistansi elektrolit (Ω), σ merupakan konduktivitas listrik (S/cm), ρ merupakan resistivitas ($\Omega \cdot \text{cm}$), l merupakan ketebalan sampel (cm), A merupakan luas permukaan sampel (cm^2).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Sintesis Komposit PANI/rGO/Fe₃O₄

Pada penelitian ini terdapat 3 tahapan penelitian yaitu sintesis Fe₃O₄, sintesis rGO dan juga komposit. Dimana material Fe₃O₄ yang digunakan sebagai bahan dasar berasal dari bahan alam, yaitu pasir besi magnetik dari gunung Galunggung, Jawa Barat. Sintesis Fe₃O₄ dimulai dengan melarutkan pasir besi dengan HCl hingga homogen dan berwarna kuning kencur. Kemudian larutan disaring dengan *double layer* kertas saring pada corong *buchner* untuk diambil filtratnya. Ketika disaring, bagian atas kertas saring ditutup dengan alumunium foil dan tutup keramik dengan tujuan agar tidak teroksidasi. Filtrat yang berwarna kuning jernih menandakan bahwa Fe₃O₄ tidak mengalami oksidasi. Kemudian, larutan NaOH ditambahkan ke dalam filtrat pasir besi dengan cara diteteskan perlahan hingga warnanya berubah menjadi hitam pekat. Larutan tersebut kemudian dicuci dengan aquades hingga mencapai pH netral (pH 7) untuk menghilangkan reagen sisa. Hasil sintesis pasir besi magnetik berupa serbuk Fe₃O₄berwarna hitam.

Sintesis rGO juga berbahan dasar bahan alam yakni arang tempurung kelapa komersil, yang kemudian dihaluskan menggunakan alat bernama *ball mill*. Arang tempurung kelapa setelah dihaluskan, di saring terlebih dahulu menggunakan saringan yang berukuran 200 mesh dan dilanjutkan aktivasi selama 24 jam dengan direndam menggunakan larutan NaOH. Sintesis sampel rGO dilakukan dengan menggunakan pengembangan dari metode Hummer's yang merupakan gabungan antara metode *Chemical Exfoliation* dan metode reduksi kimia. Sintesis GO dilakukan dengan menggunakan *ice bath*, pada tahap ini arang tempurung kelapa yang sudah melalui tahap aktivasi ditambahkan dengan *Sulfuric acid* (H₂SO₄) dan *Potassium permanganate* VII (KMnO₄). Sintesis rGO dilakukan dengan mereduksi GO dengan agen pereduksi yang digunakan, yakni *Hydrazine Hidrate* (H₂N₄).

Setelah didapatkan Fe₃O₄ dari pasir besi dan rGO dari arang tempurung kelapa, selanjutnya pembuatan komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ yang dilakukan dengan melarutkan rGO kedalam aquades lalu ditambah dengan Fe₃O₄ hingga berwarna hitam pekat. Setelah itu, dilanjutkan pengadukan ultrasonik untuk melarutkan rGO sehingga homogen dengan Fe₃O₄. Larutan distirer hingga warna berubah menjadi hitam abu-abu kemudian diangkat, dibiarkan pada suhu ruang hingga dingin. Setelah itu, aniline ditambahkan kedalam larutan bersama dengan *Ammonium Persulfate* (APS) dan HCl dan distirer. Larutan kemudian diendapkan dan disaring untuk didapatkan residunya kemudian dikeringkan dengan menggunakan oven. Hasil komposit yaitu berupa serbuk berwarna hitam kehijauan.

B. Vector Network Analyzer (VNA)

Nilai *reflection loss* diperlukan untuk mengetahui kemampuan penyerapan dari komposit PANI/rGO/Fe₃O₄. Pengukuran *reflection loss* (RL) dilakukan pada rentang frekuensi X-band, yaitu antara 8-12 GHz. Berikut merupakan hasil VNA dari komposit PANI/rGO/Fe₃O₄.

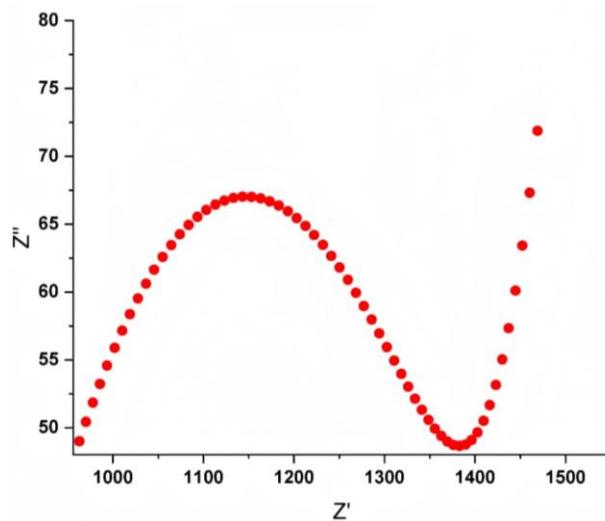
Tabel 1. Parameter hasil uji Vector Network Analyzer (VNA)

Reflection loss (dB)	Frekuensi (GHz)	Koefisien Transmisi (T)	Koefisien Refleksi (T)	Kemampuan Penyerapan (%)	Permeabilitas relative μ_r (H/m)	Permitivitas relative ϵ_r (F/m)
-40,48	10,1	0,0475	0,0094	99,06	1,57	1,43

Berdasarkan **Tabel 1**, hasil uji menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) terhadap komposit PANI/rGO/Fe₃O₄, diperoleh nilai *reflection loss* (RL) sebesar -40,48 dB pada frekuensi 10,1 GHz. Nilai ini tergolong sangat baik karena semakin negatif nilai *reflection loss* maka semakin besar daya serap gelombang elektromagnetik oleh material tersebut. Nilai *reflection loss* tersebut menunjukkan bahwa lebih dari 99% energi gelombang mikro berhasil diserap, dan hanya sebagian sangat kecil yang dipantulkan atau diteruskan. Hal ini juga didukung oleh data koefisien transmisi sebesar 0,0475 dan koefisien refleksi sebesar 0,0094 yang artinya hanya 0,94% dari gelombang mikro yang dipantulkan, sementara 99,06% sisanya berhasil diserap. Kemampuan penyerapan mencapai 99,06%, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar gelombang yang tidak ditransmisikan telah diserap secara efektif oleh struktur dalam material tersebut, bukan dipantulkan kembali ke udara. Nilai permeabilitas relatif (μ_r) sebesar 1,57 H/m dan permitivitas relatif (ϵ_r) sebesar 1,43 F/m menunjukkan keseimbangan yang sangat baik antara respon material terhadap medan magnet dan medan listrik. Keseimbangan ini menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan terjadinya *impedance matching* yakni kondisi ketika karakteristik impedansi material serupa dengan impedansi udara, sehingga gelombang elektromagnetik dapat masuk ke dalam material tanpa dipantulkan. Selain menilai kinerja komposit dari hasil pengujian internal, penting pula melihat bagaimana performanya jika dibandingkan dengan penelitian lain yang menggunakan material sama. Nilai RL minimum sebesar -40,48 dB pada frekuensi 10,1 GHz yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ memiliki kemampuan penyerapan gelombang yang lebih unggul. Sebagai pembanding, penelitian mengenai nanokomposit Fe₃O₄/PANI hanya mampu mencapai RL sekitar -32 dB pada frekuensi mendekati 11 GHz [3]. Bahkan penelitian yang mengembangkan komposit berstruktur annular Fe₃O₄/rGO@PANI secara teoritis lebih kompleks dan berpotensi meningkatkan mekanisme *multiple reflection*, memperoleh RL sekitar -30 dB [6]. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa komposit yang dihasilkan dalam penelitian ini mampu menyerap gelombang mikro lebih kuat dan lebih efektif dibandingkan studi-studi sebelumnya.

C. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Selain dilakukan karakterisasi menggunakan VNA, karakterisasi lain dilakukan dengan EIS. Pengujian EIS digunakan untuk mengetahui konduktivitas dari komposit PANI/rGO/Fe₃O₄. Hasil pengujian EIS berupa nilai impedansi riil (Z') yang memuat resistivitas elektrolit (Re) yang diambil dari nilai Z' pada indeks 1 dan R_3 yang diambil dari nilai Z' pada indeks tertentu disebelah kanan sebelum membentuk ekor panjang, dan impedansi imajiner (Z''). Berikut hasil pengujian EIS komposit PANI/rGO/Fe₃O₄.



Gambar 2. Hasil Nyquist plot komposit PANI/rGO/Fe₃O₄.

Pada **Gambar 2**, hasil uji *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) yang ditampilkan melalui Nyquist plot pada komposit PANI/rGO/Fe₃O₄, terlihat bahwa material ini memiliki nilai resistansi transfer muatan (R_{ct}) sebesar 419,67 Ω . Nilai ini menunjukkan tingkat hambatan aliran muatan dalam material saat terjadi

proses pertukaran elektron di antarmuka, dalam konteks penyerap gelombang mikro dapat dikaitkan dengan kemampuan konduksi internal material terhadap medan listrik dari gelombang elektromagnetik. Selain itu, nilai resistivitas (ρ) tercatat sebesar 839,34 $\Omega\text{.cm}$, yang menandakan bahwa material memiliki hambatan listrik yang relatif tinggi. Konsekuensinya, konduktivitas (σ) yang dihasilkan cukup rendah yaitu hanya sekitar $1,19 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$. Meskipun nilai konduktivitas ini masih dalam kisaran semikonduktor, namun cukup untuk memungkinkan terjadinya polarisasi ruang muatan dan perpindahan muatan terbatas di dalam komposit. Namun kondisi ini justru menguntungkan dalam penyerap gelombang mikro, karena konduktivitas yang terlalu tinggi justru dapat menyebabkan refleksi, bukan penyerapan. Dari sisi sifat listrik, nilai konduktivitas komposit sebesar $1,19 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ memang lebih rendah dibandingkan beberapa penelitian berbasis PANI-graphene yang biasanya mencapai kisaran 10^{-2} S/cm . Namun, nilai konduktivitas yang tidak terlalu tinggi justru menguntungkan untuk material penyerap gelombang mikro. Konduktivitas yang terlalu besar dapat menimbulkan arus eddy yang memicu peningkatan refleksi, sehingga sebagian gelombang tidak terserap dengan baik. Hal ini seperti pada penelitian sebelumnya, dimana konduktivitas komposit PANI/Fe₃O₄-RGO yang lebih tinggi menghasilkan nilai RL sekitar -28 dB [8]. Hal ini mengindikasikan bahwa konduktivitas pada tingkat moderat dikombinasikan dengan keseimbangan antara permitivitas dan permeabilitas, justru menghasilkan kondisi *impedance matching* yang lebih ideal. Dengan demikian, komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ dalam penelitian ini mampu menunjukkan performa serapan yang lebih optimal tanpa memerlukan rekayasa struktur yang rumit.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini berhasil mensintesis komposit PANI/rGO/Fe₃O₄ dari bahan alam yaitu pasir besi gunung Galunggung, Jawa Barat dan rGO berasal dari arang tempurung kelapa menggunakan metode polimerisasi *in situ*. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa komposit memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap gelombang mikro. Nilai *reflection loss* mencapai -40,48 dB pada frekuensi 10,1 GHz. Hal tersebut berarti bahwa lebih dari 99% gelombang elektromagnetik berhasil diserap oleh material. Hal ini didukung oleh nilai koefisien transmisi sebesar 0,0475 dan koefisien refleksi sebesar 0,0094 serta nilai permeabilitas relatif 1,57 H/m dan permitivitas relatif 1,43 F/m yang menunjukkan adanya *impedance matching* yang baik. Dari sisi sifat listrik, hasil karakterisasi menggunakan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) menunjukkan bahwa komposit memiliki konduktivitas listrik sebesar $1,19 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ dengan resistivitas sebesar 839,34 $\Omega\text{.cm}$. Nilai konduktivitas ini termasuk dalam kategori semikonduktor, yang cukup untuk mendukung polarisasi ruang muatan tanpa menyebabkan peningkatan refleksi gelombang. Hal ini sesuai dengan fungsi utama material sebagai penyerap gelombang mikro, karena konduktivitas yang terlalu tinggi justru dapat meningkatkan pantulan gelombang elektromagnetik.

B. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan disarankan untuk melakukan studi lanjutan dengan variasi rasio komposisi PANI, rGO, dan Fe₃O₄ untuk mencari keseimbangan optimal antara kemampuan penyerapan gelombang dan konduktivitas listrik. Karena sifat listrik komposit sangat mempengaruhi fenomena polarisasi muatan dan absorpsi, penyesuaian komposisi bahan konduktif seperti PANI dan rGO sangatlah penting.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wulandari, F. P., Nur, A. A., Gafira, C. E., & Aritonang, S. (2024). Nanokomposit sebagai penyerap gelombang elektromagnetik untuk radar absorbent material. *Research Material and Mechanical Engineering (RMME)*, 7(1), 151–159. <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i1>.
- [2] Ristiani, D., Zainuri, M., 2016. Desain Double Layer Radar Absorbing Materials dengan Metode Dallenbach Layer Berbasis Bahan Magnetik Alam Tanah Laut dan Polianilin. *J. Sains Dan Seni ITS* 5.
- [3] Yulfriska, N. et al. (2020) 'Microwave absorption properties of Fe₃O₄/PANI nanocomposites synthesized by sol-gel methods', *Journal of Physics: Conference Series*, 1481(1). doi:10.1088/1742-6596/1481/1/012006.

- [4] Peymanfar, R., Dogari, H., Selseleh-Zakerin, E., Hedayatzadeh, M. H., Daneshvar, S., Amiri-Ramsheh, N., Ghafuri, H., Mirkhan, A., Ji, G., & Aslbeiki, B. (2023). Recent advances in microwave-absorbing materials fabricated using organic conductive polymers. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1133287>
- [5] Dayu, M., & Munasir. (2018). Sintesis dan karakterisasi material rGO@SiO₂ core shell dengan metode sol gel. Dalam Seminar Nasional Fisika (SNF) 2018: Membumikan Fisika dan Pembelajaran Fisika dalam Membangun Kearifan Global (hal. 233–236). Jurusan Fisika FMIPA UNESA. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/>
- [6] Fan, F., Hu, Z., Ye, Y., & Liu, X. (2023). Preparation and Microwave Absorption Properties of Annular Fe3O4/rGO@PANI. *JOM*, 75(6), 1853–1863. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05808-4>
- [7] Hefdea, A., & Rohmawati, L. (2020). Sintesis Fe3O4 dari Pasir Mineral Tulungagung Menggunakan Metode Kopresipitasi. *Inovasi Fisika Indonesia*, 9(2), 1–4. <https://doi.org/10.26740/ifi.v9n2.p1-4>
- [8] Mathew, J. et al. (2018) 'Polyaniline/Fe3O4-RGO Nanocomposites for Microwave Absorption', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 310(1). doi:10.1088/1757-899X/310/1/012138.
- [9] Payami, E., & Teimuri-Mofrad, R. (2021). A novel ternary Fe3O4@Fc-GO/PANI nanocomposite for outstanding supercapacitor performance. *Electrochimica Acta*, 383, 138296. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138296>
- [10] Sharma, N., Sharma, V., Jain, Y., Kumari, M., Gupta, R., Sharma, S. K., & Sachdev, K. (2017). Synthesis and characterization of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (RGO) for gas sensing application. *Macromolecular Symposia*, 376(1). <https://doi.org/10.1002/masy.201700006>
- [11] Taryana, Y. et al. (2019) 'Material Penyerap Gelombang Elektromagnetik Jangkauan Frekuensi Radar Electromagnetic Wave Absorbing Materials on Radar Frequency Range', *Jurnal Keramik dan Gelas Indonesia*, 28(1), pp. 1–28.
- [12] Wardiyati, S., Ari Adi, W., Didin Sahidin Winatapura Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju, dan, Puspiptek, K., & selatan, T. (2018). Sintesis dan Karakterisasi Microwave Absorbing Material (Mathew et al., 2018) Berbasis Ni-SiO₂ dengan Metode Sol-Gel. In *Jurnal Fisika* (Vol. 8, Issue 2).
- [13] Wulandari, R. F., & Putri, N. P. (2021). Sintesis Soluble Polianilin dengan Variasi Jenis dan Konsentrasi Dopan. In *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* (Vol. 09, Issue 02).