

Studi Penggunaan Biokomposit Anyaman Jute dengan *Filler* MWCNT sebagai Material Perisai Interferensi Elektromagnetik

M. Ian Apriansyah^{(1,a)*}, Diah Permata^(1,b), Herman Halomoan Sinaga^(1,c),
Nining Purwasih^(1,d) dan Bambang Sutrisno^(1,e)

⁽¹⁾Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141

Email : ^(a*)ianapriansyah19@gmail.com, ^(b)diah.permata@eng.unila.ac.id,

^(c)herman.h.sinaga@eng.unila.ac.id, ^(d)nining.purwasih@eng.unila.ac.id,

^(e)bambangstr26@gmail.com.

Disubmisi: 3 Maret 2026, Direvisi: 2 Mei 2026, Diterima: 23 Mei 2026

Abstract.

Background: Hybrid bio composites based on jute fiber (JF) woven fabric reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) have attracted attention as electromagnetic wave absorbing materials.

Aims: This study evaluates the performance of hybrid bio composites based on jute fiber (JF) woven fabric reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) as electromagnetic wave absorbing materials.

Methods: The biocomposite was fabricated using the hand lay-up method, with variations in the composition of jute fiber (10%, 20%, 30%) and MWCNT filler (0%, 2%, 5%). Prior to molding, jute fibers were treated with NaOH alkali and in-situ polyaniline coating, while MWCNTs were functionalized via acid oxidation. The electromagnetic shielding effectiveness was evaluated based on a modified IEEE Std. 299 in the frequency range of 1–20 MHz.

Results: The highest shielding effectiveness was recorded at a variation of 10% JF with 5% MWCNT, which produced a Shielding Effectiveness (SE) value of -9.847 dB at a frequency of 14 MHz. The formation of a dense conductive network is supported by the jute woven structure that triggers multiple reflections to enhance ohmic losses. Conversely, increasing the fiber content up to 30% tended to decrease the SE value due to filler dispersion obstruction that induces local agglomeration. Dynamic fluctuations were also observed in the 12–15 MHz range, indicating dielectric resonance and destructive wave interference phenomena

Conclusion: The results of this study provide an eco-friendly alternative for EMI shielding materials with competitive effectiveness for electronic device applications.

Keywords: Biocomposite, EMI Shielding, Jute Fiber, MWCNT.

Abstrak.

Latar Belakang: Biokomposit hibrida berbasis anyaman jute (JF) yang diperkuat dengan Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) dikembangkan sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik.

Tujuan: Penelitian ini mengevaluasi kinerja biokomposit hibrida berbasis anyaman jute (JF) yang diperkuat dengan Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik.

Metode: Fabrikasi biokomposit dilakukan menggunakan metode hand lay-up dengan memvariasikan komposisi serat jute (10%, 20%, 30%) dan filler MWCNT (0%, 2%, 5%). Sebelum pencetakan, serat jute diberi perlakuan alkali NaOH dan pelapisan polyaniline secara *in-situ*, sementara MWCNT difungsionalisasi melalui oksidasi asam. Pengujian efektivitas perisai elektromagnetik dievaluasi berdasarkan modifikasi standar IEEE Std. 299 pada rentang frekuensi 1–20 MHz.

Hasil: Efektivitas perisai tertinggi tercatat pada variasi persentase 10% JF dengan 5% MWCNT, yang menghasilkan nilai *Shielding Effectiveness* (SE) sebesar -9,847 dB pada frekuensi 14 MHz. Pembentukan jaringan konduktif yang rapat didukung oleh struktur anyaman jute yang memicu *multiple reflections* guna meningkatkan rugi-rugi ohmik. Sebaliknya, peningkatan kadar serat hingga 30%

terbukti menurunkan nilai SE akibat hambatan dispersi filler yang memicu aglomerasi lokal. Teramati pula fluktuasi dinamis pada rentang 12–15 MHz yang mengindikasikan adanya fenomena resonansi dielektrik dan interferensi destruktif gelombang.

Kesimpulan: Hasil penelitian ini memberikan alternatif material perisai EMI yang ramah lingkungan dengan efektivitas yang kompetitif untuk aplikasi perangkat elektronik.

Kata kunci: Biokomposit, Perisai EMI, Serat Jute, MWCNT.

PENDAHULUAN

Isu lingkungan global dan tingginya jejak karbon dari penggunaan material perisai berbasis logam atau sintetis mendorong pengembangan material alternatif yang berkelanjutan. Biokomposit yang memanfaatkan anyaman serat jute sebagai penguat menjadi salah satu kandidat potensial untuk aplikasi perisai interferensi elektromagnetik (EMI). Selain memiliki ketersediaan yang melimpah dan harga ekonomis, struktur mikrofibril pada jute mendukung daya serap resin yang baik dan memberikan kekuatan mekanik yang tinggi. Material ini juga lebih ringan dan mudah terdegradasi di lingkungan dibandingkan komposit konvensional [1],[2].

Material perisai EMI berfungsi untuk melindungi sistem elektronik dari gangguan ini melalui refleksi atau absorpsi gelombang elektromagnetik, dan biasanya digunakan pada perangkat komunikasi, medis, dan industri [3]. Penggunaan biokomposit sebagai material perisai EMI menghadirkan solusi baru yang ramah lingkungan, dibandingkan material konvensional berbasis logam yang berat dan sulit terurai.

Meskipun menjanjikan, anyaman jute murni bersifat isolator sehingga memerlukan penambahan matriks polimer konduktif seperti *polyaniline* (PANI) dan filler MWCNT [4]. MWCNT dipilih karena memiliki stabilitas termal, kimia, dan mekanik yang sangat baik, yang kemudian difungsionalisasi secara kimia untuk mengatasi kendala aglomerasi saat pencampuran [5]. Meskipun penggunaan material pengisi karbon seperti MWCNT

telah banyak diteliti, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada serat sintetis untuk aplikasi frekuensi tinggi (GHz). Penggunaan serat alam seperti jute dengan penambahan MWCNT terfungsionalisasi untuk perisai EMI pada rentang frekuensi rendah hingga menengah (1-20 MHz) masih sangat jarang dilaporkan. Selain itu, mekanisme fisis interaksi antara struktur anyaman jute dan jaringan konduktif MWCNT pada frekuensi tersebut belum dievaluasi secara mendalam [6].

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mencari perbandingan ideal antara persentase serat terhadap MWCNT guna menghasilkan material ramah lingkungan dengan performa perisai EMI yang optimal.

METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis untuk memastikan ketelitian pada setiap proses, mulai dari persiapan material hingga pengambilan data akhir. Alur kerja yang komprehensif mengenai fabrikasi biokomposit jute-MWCNT dan pengujian efektivitas perisai disajikan dalam diagram alir pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skematik Pengukuran Perisai EMI

Gambar 1 menunjukkan proses penelitian terbagi menjadi tiga fase utama: persiapan dan perlakuan pada bahan, fabrikasi sampel dengan metode *hand lay-up*, serta karakterisasi kinerja perisai elektromagnetik. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan untuk menjamin kualitas sampel yang dihasilkan sebelum dilakukan analisis data secara mendalam.

Pembuatan Kotak Perisai EMI

Serat jute pertama kali direndam menggunakan NaOH. Proses dilanjutkan dengan metode polimerisasi *In Situ* yang mencampurkan serat dengan HCl, $C_6H_5NH_2$, dan $(NH_4)_2S_2O_8$ menggunakan *hot plate magnetic stirrer* (HPMS), kemudian hasilnya dicuci menggunakan akuades [7].

Proses fungsionalisasi MWCNT murni menggunakan metode oksidasi asam, dimana MWCNT dicampur dengan HNO_3 dalam HPMS. Lalu, hasil dicampur menggunakan H_2O_2 dalam HPMS, cuci dengan akuades, saring lalu keringkan dalam oven [8].

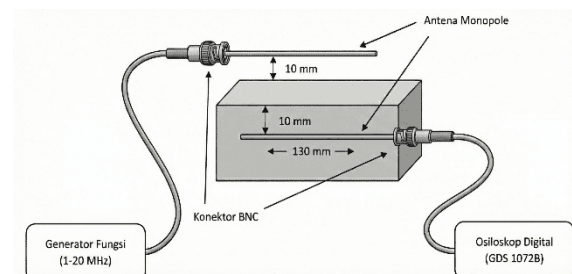
Pencetakan material dilakukan dengan metode *hand lay-up* pada material kaca berukuran 17x17 cm [9]. Lapisan kaca dengan *Polyvinyl Alcohol* (PVA) agar cetakan mudah dilepaskan, kemudian dilanjutkan dengan lapisan gabungan resin *Lycal* 1011 dan pengeras dengan perbandingan 3:1. Lalu, campurkan sejumlah serat dengan MWCNT sesuai pengujian dimana persentase JF 10% - 30% dari berat komposit total sedangkan persentase MWCNT 0% - 5% dari berat polimer matriks epoksi resin. Pemilihan komposisi serat jute (10% - 30%) dan MWCNT (0% - 5%) didasarkan pada pertimbangan untuk mencapai jaringan konduktif yang optimal tanpa memicu aglomerasi, sekaligus menjaga kekuatan mekanik dan viskositas campuran resin agar tetap ideal untuk proses fabrikasi *hand lay-up*. Proses berikutnya adalah tambahkan lapisan gabungan resin dan pengeras

kembali, tambahkan PVA pada lapisan terakhir, kemudian cetakan material di *press* dan diamkan selama 24 jam.

Setelah cetakan terbentuk, potong cetakan lalu gabungkan hingga berbentuk potongan balok berukuran 15x8x5 cm, rekatkan lalu keringkan. Setelah kotak perisai terbentuk, lubangi salah satu sisi 8x5 cm untuk tempat meletakkan port BNC sebagai penopang antenna monopole bagian dalam saat pengujian menggunakan kotak.

Skematik Pengujian Perisai EMI

Evaluasi perisai EMI dilakukan untuk mengadopsi modifikasi standar *IEEE Std. 299* untuk kotak skala kecil [10]. Pada eksperimen ini terdiri dari dua kondisi, dimana kondisi tanpa kotak dan kondisi dengan kotak, kedua antenna monopole (pemancar dan penerima) berjarak 20 mm. Skematik rangkaian menggunakan kotak ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik Pengukuran Perisai EMI

Pembangkitan sinyal dalam pengujian ini menggunakan generator fungsi GW Instek MFG-2120 dengan desain isolasi *ground* untuk meminimalkan gangguan eksternal, yang didukung oleh resolusi 14-bit. Sinyal yang diteruskan melalui sampel kemudian ditangkap dan dianalisis menggunakan osiloskop digital GDS 1072B dengan *bandwidth* 70 MHz. Instrumen ini memiliki panjang rekaman 10 Mpts serta fitur 1 Mpts FFT yang memungkinkan tampilan sinyal domain frekuensi secara presisi. Kombinasi kedua perangkat ini

memastikan stabilitas dan akurasi tinggi dalam karakterisasi efektivitas perisai EMI pada rentang frekuensi target 1-20 MHz. Seluruh rangkaian pengukuran ini dilakukan di dalam ruang non-anechoic dengan prosedur kalibrasi nilai tegangan tanpa kotak sebagai *baseline* untuk memitigasi dampak interferensi elektromagnetik lingkungan.

Pengukuran dilakukan dengan membandingkan tegangan sinyal yang diterima tanpa kotak (V_{tanpa}) terhadap dengan menggunakan kotak (V_{dengan}). Pengujian menggunakan kotak, dilakukan pada 9 variasi persentase komposisi JF-

MWCNT. Selanjutnya, nilai SE dihitung menggunakan persamaan (1).

$$SE = 20 \times \log \left(\frac{V_{tanpa}}{V_{dengan}} \right) \quad (1)$$

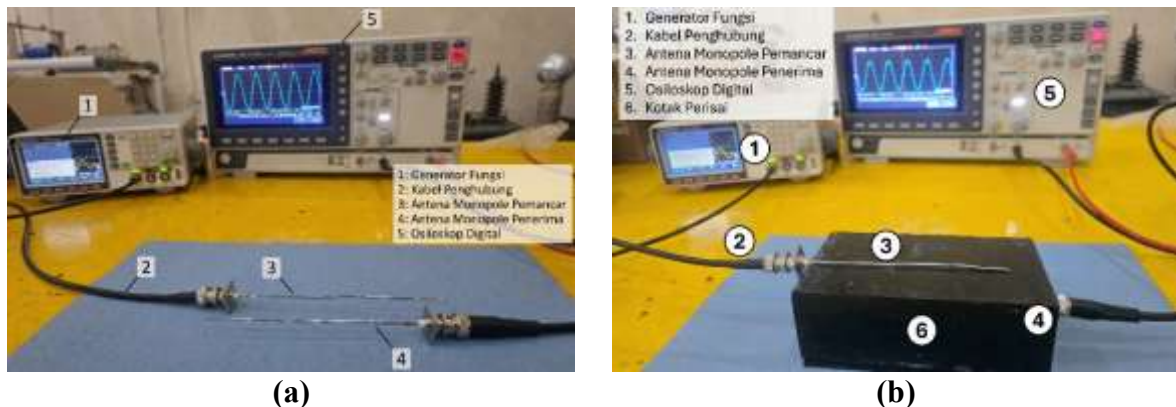
Pada **persamaan 1**, baik V_{tanpa} atau V_{dengan} , yang kemudian menjadi nilai perisai EMI dalam satuan dB [11].

Hasil perisai EMI kemudian ditinjau perubahan nilai nya akibat adanya pengaruh perubahan persentase serat jute dan persentase MWCNT.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Perisai EMI

Pengujian dilakukan pada 2 kondisi, yakni tanpa kotak dan dengan kotak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Pengujian Perisai EMI (a) Kondisi Tanpa Kotak (b) Kondisi Dengan Kotak

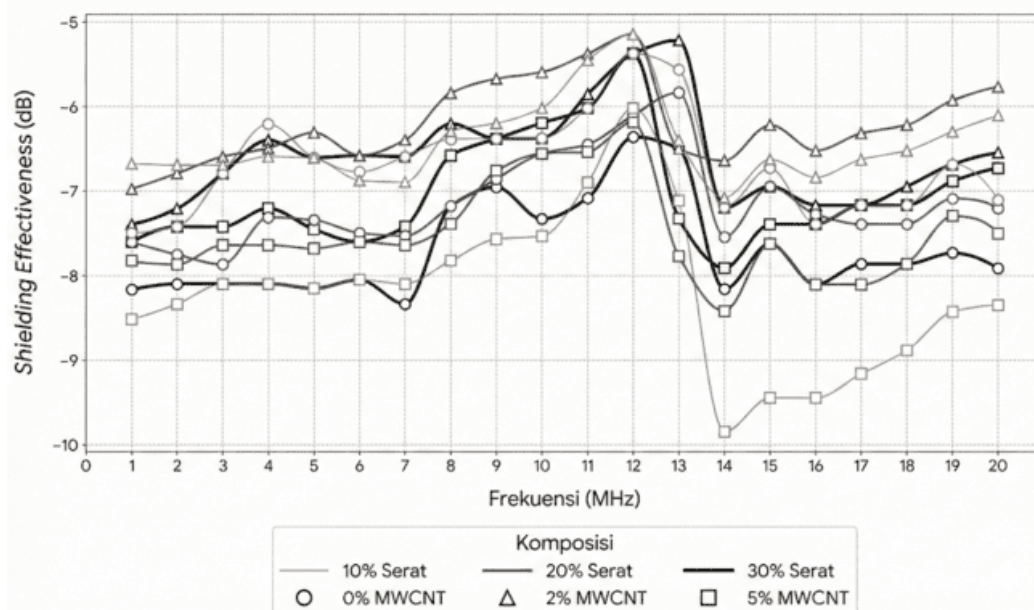
Pengukuran pada gambar 3(a) menghasilkan nilai tegangan tanpa kotak (V_{tanpa}), sedangkan gambar 3(b) menghasilkan nilai tegangan dengan kotak (V_{dengan}). Hasil yang didapat dihitung dengan **persamaan 1**, hasil ditunjukkan pada tabel 1 :

Tabel 1. Hasil Perhitungan Perisai EMI

Frekuensi (MHz)	Shielding Effectiveness (dB) (% Serat Jute - % MWCNT)								
	10 - 0	10 - 2	10 - 5	20 - 0	20 - 2	20 - 5	30 - 0	30 - 2	30 - 5
1	-7.496	-6.678	-8.519	-7.604	-6.976	-7.824	-8.165	-7.390	-7.604
2	-7.421	-6.693	-8.337	-7.753	-6.793	-7.867	-8.099	-7.207	-7.421
3	-6.793	-6.693	-8.099	-7.867	-6.594	-7.641	-8.099	-6.793	-7.421
4	-6.207	-6.594	-8.099	-7.313	-6.495	-7.641	-8.099	-6.398	-7.207
5	-6.606	-6.606	-8.150	-7.344	-6.309	-7.680	-8.150	-6.606	-7.454

6	-6.776	-6.876	-8.050	-7.496	-6.581	-7.604	-8.050	-6.581	-7.604
7	-6.594	-6.895	-8.099	-7.531	-6.398	-7.641	-8.337	-6.594	-7.421
8	-6.390	-6.296	-7.824	-7.180	-5.842	-7.390	-7.180	-6.203	-6.581
9	-6.383	-6.200	-7.569	-6.857	-5.673	-6.760	-6.955	-6.383	-6.383
10	-6.375	-6.021	-7.535	-6.558	-5.597	-6.558	-7.331	-6.375	-6.196
11	-6.021	-5.455	-6.899	-6.449	-5.377	-6.537	-7.086	-5.855	-6.021
12	-5.377	-5.147	-6.021	-6.105	-5.147	-6.189	-6.361	-5.377	-5.377
13	-5.566	-6.402	-7.114	-5.836	-6.501	-7.774	-6.501	-5.218	-7.328
Frekuensi (MHz)	Shielding Effectiveness (dB) (% Serat Jute - % MWCNT)								
	10 - 0	10 - 2	10 - 5	20 - 0	20 - 2	20 - 5	30 - 0	30 - 2	30 - 5
14	-7.195	-7.081	-9.847	-7.545	-6.641	-8.420	-8.161	-7.195	-7.909
15	-6.732	-6.627	-9.445	-6.947	-6.218	-7.624	-7.624	-6.947	-7.392
16	-7.392	-6.839	-9.445	-7.279	-6.523	-8.106	-8.106	-7.167	-7.392
17	-7.167	-6.627	-9.161	-7.392	-6.318	-8.106	-7.862	-7.167	-7.167
18	-7.167	-6.523	-8.885	-7.392	-6.218	-7.862	-7.862	-6.947	-7.167
19	-6.685	-6.299	-8.428	-7.089	-5.930	-7.299	-7.733	-6.685	-6.885
20	-7.108	-6.106	-8.351	-7.205	-5.769	-7.503	-7.916	-6.547	-6.730

Dari tabel 1, di dapatkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4:



Gambar 4. Pengukuran SE Komposit Serat Jute

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi MWCNT berbanding lurus dengan peningkatan efektivitas perisai elektromagnetik pada seluruh variasi persentase serat jute. Peningkatan performa ini secara fisis berkaitan dengan pembentukan jaringan

konduktif yang lebih rapat di dalam matriks polimer. Pembentukan jaringan ini sangat krusial mengingat karakteristik *skin depth* gelombang berfrekuensi rendah yang umumnya sangat besar, sehingga gelombang cenderung mudah menembus material tipis [12]. Kinerja optimal tercatat pada sampel

dengan komposisi 10% JF dan 5% MWCNT, yang menghasilkan nilai SE sebesar -9,847 dB pada frekuensi 14 MHz. MWCNT yang terfungsionalisasi bertindak sebagai jembatan elektron dan jalur perkolasi bagi pembawa muatan bebas, yang secara efektif berinteraksi dengan komponen elektrik gelombang datang [13].

Nilai SE sebesar -9,847 dB ini menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan literatur sejenis pada rentang frekuensi rendah. Sebagai perbandingan, penelitian sebelumnya yang menggunakan komposit serat kelapa dengan penambahan 0,5% MWCNT hanya mencapai nilai SE tertinggi sekitar -7,69 dB [7]. Lebih lanjut, karakterisasi efektivitas perisai komposit polimer pada frekuensi 1–20 MHz menggunakan antenna monopole umumnya memang mencatatkan nilai serapan yang konservatif (nilai SE tidak sampai -8 dB). Namun, struktur anyaman jute pada penelitian ini memberikan keunggulan komparatif berupa luas permukaan internal yang memicu terjadinya *multiple reflections*, yang memperpanjang lintasan gelombang dan meningkatkan rugi-rugi ohmik secara signifikan [14].

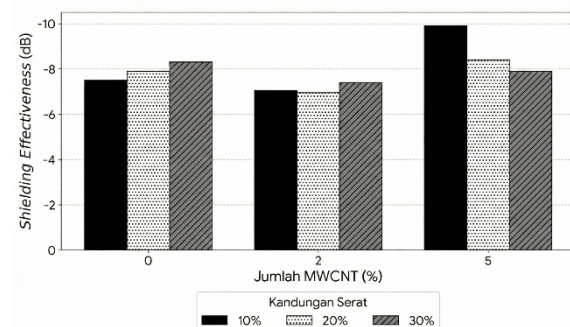
Menariknya, peningkatan persentase serat jute hingga 30% justru cenderung menurunkan nilai SE dibandingkan pada kadar serat yang lebih rendah. Fenomena ini mengindikasikan bahwa volume serat yang terlalu dominan dapat menghambat distribusi dispersi *filler* MWCNT, sehingga memutus kontinuitas jaringan konduktif yang diperlukan untuk membuang energi elektromagnetik [13].

Teramati pula adanya fluktuasi nilai SE yang sangat dinamis pada rentang frekuensi 12–15 MHz. Secara ilmiah, hal ini dapat dijelaskan melalui konsep resonansi dielektrik. Pada rentang frekuensi tersebut, interaksi antara panjang gelombang elektromagnetik dengan jarak celah antar-anyaman jute memicu terjadinya resonansi yang mengubah fase gelombang. Fluktuasi

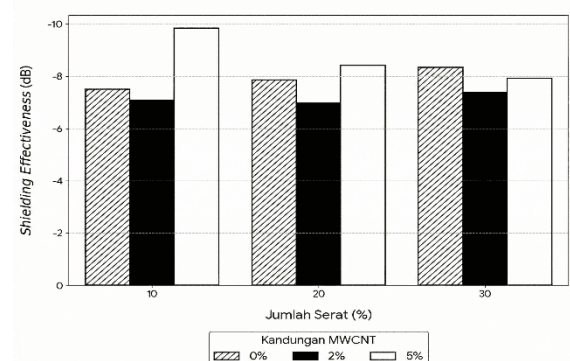
ini juga menandakan adanya interferensi destruktif antara gelombang yang dipantulkan dari permukaan depan sampel dengan gelombang dari permukaan belakang, yang secara fisis membatalkan energi gelombang transmisi yang mengarah ke antenna penerima [12].

Pengaruh Komposisi Matriks dan Filler terhadap Efektivitas Perisai EMI

Untuk menganalisis lebih detail interaksi antara serat alam dan *nanofiller*, secara umum, kedua variabel ini tidak menunjukkan tren peningkatan atenuasi yang selalu linier, melainkan mengindikasikan adanya persaingan mekanisme fisis antara pembentukan jalur konduktif dan disrupsi struktural. nilai SE diekstraksi berdasarkan variasi penambahan serat (Gambar 5) dan penambahan MWCNT (Gambar 6).



Gambar 5. Pengaruh Penambahan Serat Jute Terhadap Nilai SE



Gambar 6. Pengaruh Penambahan MWCNT Terhadap Nilai SE

Pada konsentrasi *filler* konduktif yang rendah (MWCNT 2%), sistem komposit masih berada di bawah ambang batas perkolasi [15]. Interaksi matriks dan serat pada fase ini memicu tingginya viskositas lokal yang menciptakan cacat mikrostruktural seperti rongga udara (*voids*), sebuah kondisi yang seringkali menurunkan efektivitas perisai elektromagnetik material berbasis polimer akibat terperangkapnya udara bebas di dalam struktur [16],[15]. Akibatnya, nilai SE pada variasi 2% MWCNT (di berbagai variasi serat) sempat mengalami penurunan dibandingkan komposit tanpa MWCNT, karena gelombang elektromagnetik lebih mudah bertransmisi melalui rongga tersebut sebelum jalur kelistrikan terhubung dengan sempurna.

Peningkatan kinerja secara drastis baru terjadi ketika konsentrasi MWCNT dinaikkan mencapai 5%. Pada titik ini, elektron dapat bergerak bebas melalui jejaring MWCNT yang saling terhubung, sehingga redaman gelombang didominasi oleh rugi-rugi ohmik [15]. Peran ini paling maksimal terlihat pada persentase serat terendah (JF 10%), di mana ruang bebas di dalam matriks masih cukup luas sehingga partikel MWCNT dapat terdispersi secara merata dan berfungsi sebagai jembatan penghubung celah antar-serat [17].

Akan tetapi, seiring dengan peningkatan persentase serat menjadi 20% dan 30%, terjadi transisi efektivitas hingga memicu fenomena *Blocking* [18],[19]. Penambahan serat dalam volume besar secara masif mempersempit ruang gerak di dalam matriks, yang memaksa partikel MWCNT untuk menggumpal secara lokal [19]. Gumpalan MWCNT dan dominasi serat yang bersifat isolator ini bertindak sebagai "pengotor" fisik [20],[21]. Kondisi ini secara efektif memutus kontinuitas jalur konduktif yang sebelumnya telah terbentuk, dan pada

akhirnya menurunkan magnitudo SE komposit secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil pengukuran menunjukkan bahwa penambahan MWCNT secara signifikan meningkatkan nilai SE. Kinerja perisai optimum dicapai pada komposisi 10% JF dan 5% MWCNT, dengan nilai SE tertinggi sebesar -9,847 dB pada frekuensi 14 MHz. Analisis mekanisme menunjukkan adanya *trade-off* antara pembebanan serat dan *filler*. Pada pembebanan serat rendah (10%), MWCNT berfungsi efektif mengisi celah antar-serat. Namun, peningkatan kadar serat hingga 30% terbukti kontraproduktif karena memicu fenomena aglomerasi, fenomena ini menurunkan efektivitas perisai. Secara keseluruhan, studi ini mengonfirmasi bahwa optimasi rasio antara matriks serat alam dan *nanofiller* konduktif sangat krusial untuk menghasilkan material perisai EMI yang efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Baysal, P. Yayla, and H. S. Türkmen, "A review on engineering biocomposites and natural fiber-reinforced materials," *J. Sustain. Constr. Mater. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 231–249, 2022.
- [2] M. J. John and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, pp. 343–364, 2008.
- [3] D. D. L. Chung, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials," *Carbon N. Y.*, vol. 39, no. 2, pp. 279–285, 2001.
- [4] L. Omana *et al.*, "Recent Advances in Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Interference

- Shielding : A Review,” *ACS Omega*, vol. 7, pp. 25921–25947, 2022.
- [5] Y. Yim, D. C. Chung, and S. Park, “EMI shielding effectiveness and mechanical properties of MWCNTs-reinforced biodegradable epoxy matrix composites,” *Carbon Lett.*, vol. 22, pp. 36–41, 2017.
- [6] R. H. M. Reis *et al.*, “Ballistic and Electromagnetic Shielding Properties of Epoxy Resin Reinforced with Carbon Black and Jute Fabric,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 3, p. 336, 2025.
- [7] D. Permata, Widyawati, H. H. Sinaga, N. Purwasih, and S. Widiarto, “Study of electrical volume-conductivity, tensile strength, and electromagnetic shielding effectiveness of coconut fiber composite,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 73, pp. 73–80, 2023.
- [8] T. D. Kristian, “Studi penambahan CNT untuk meningkatkan konduktivitas CFRP sebagai material badan pesawat Unmanned Aerial Vehicle (UAV),” Universitas Lampung, 2020.
- [9] R. F. L. Noval Fitra Yudha, and Sri Hastuti, “Pengaruh lama curing material komposit serat karbon terhadap kekuatan mekanik dengan metode pembuatan kombinasi hand lay-up dan vacuum bagging,” *AutoMech J. Tek. Mesin*, vol. 05, no. 01, pp. 1–5, 2025.
- [10] M. Jung, Y. Lee, and S. Hong, “Effect of Incident Area Size on Estimation of EMI Shielding Effectiveness for Ultra-High Performance Concrete with Carbon Nanotubes,” *IEEE Access*, 2019.
- [11] C. Morari and I. Bălan, “Methods for determining shielding effectiveness of materials,” *Electroteh. Electron. Autom.*, vol. 63, no. 2, pp. 127–136, 2015.
- [12] M. Peng and F. Qin, “Clarification of Basic Concepts for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness,” *J. Appl. Phys.*, vol. 130, no. 22, pp. 1–25.
- [13] G. Loganathan and M. Senthilpandian, “Trash to treasure: A review on integrating nanomaterial and industrial waste for sustainable electromagnetic interference shielding composites,” *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 65–90, 2025.
- [14] S. Sert, D. D. Kaya, and A. Körlü, “Development of Activated Carbon Textiles Produced from Jute and Cotton Wastes for Electromagnetic Shielding Applications,” *Fibers*, vol. 11, no. 12, p. 110, 2023.
- [15] B. V. B. Rao, N. Kale, B. S. Kothavale, and S. N. Kale, “Fabrication and evaluation of thin layer PVDF composites using MWCNT reinforcement: Mechanical, electrical and enhanced electromagnetic interference shielding properties,” *AIP Adv.*, vol. 6, p. 065107, 2016.
- [16] M. Subramanian and S. T. Pisharam, “Advances in foam-based materials for electromagnetic interference shielding : synthesis , properties , and

- performance,” *Discov. Nano*, vol. 21, pp. 28–38, 2026.
- [17] B. Wu *et al.*, “Effect of different proportions of CNTs/Fe₃O₄ hybrid filler on the morphological, electrical and electromagnetic interference shielding properties of poly(lactic acid) nanocomposites,” *e-Polymers*, vol. 23, p. 6, 2023.
- [18] D. Wanasinghe, F. Aslani, and G. Ma, “Effect of carbon fibres on electromagnetic-interference-shielding properties of geopolymer composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 18, p. 3750, 2022.
- [19] J. Kruželák, A. Kvasničáková, M. Džuganová, R. Dosoudil, I. Hudec, and H. Krump, “The Electrical Conductivity , EMI Absorption Shielding Performance , Curing Process , and Mechanical Properties of Rubber Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 566, 2024.
- [20] A. Kausar and I. Ahmad, “Conducting Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding — Radical Developments,” *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 6, p. 240, 2023.
- [21] D. Y. Thimmegowda, J. Hindi, G. B. Markunti, and M. Kakunje, “Enhancement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites Using Different Approaches — A Review,” *J. Compos. Sci.*, vol. 9, no. 5, p. 220, 2025.

