

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Analisis Matematis Komparatif Komposit Serat Alam–Graphene Oxide Sebagai Material Pertahanan Balistik: Telaah Ulang Tiga Penelitian Jurnal Polymers

Mathematical Comparative Analysis Of Natural Fiber–Graphene Oxide Composites As Ballistic Defense Materials: A Re-Examination Of Three Polymers Studies

Axcel Damario Farrel Simatupang[*], Sovian Aritonang[2]

[*]*Program Studi Matematika Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*

simatupangaxcel@gmail.com[*] , sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

Graphene oxide (GO) functionalized natural fiber composites are being promoted as an inexpensive replacement for aramid in multilayered armor systems (MAS). However, the three principal Polymers papers on the subject (Costa et al., 2019; Pereira et al., 2020; Costa et al., 2022) present their findings through different test set-ups, units, and benchmarks, which prevents a direct comparison. In this work the published data of those three papers are re-analysed with four mathematical instruments: (1) an energy balance combined with the delta method to propagate the uncertainty of absorbed energy; (2) the Kelly–Tyson relation for interfacial shear strength; (3) two dimensionless indices, the ballistic safety margin SM = 1 − BFS/44 and the cost elasticity of impact gain; and (4) a replication of the ANOVA reported by the authors. The recomputation yields an absorbed energy of 129.0 J for ramie/GO-epoxy against the reported 130.3 J, a standard deviation of 8.1 J against 9.5 J, and reveals that impact velocity accounts for 61% of the variance. For the two MAS studies that share the same test configuration, increasing the fiber content from 30 vol% to 40 vol% reduced the backface signature from 27.4 mm to 24.8 mm (SM rising from 0.377 to 0.436), while a 31.1% gain in Izod energy was obtained for a 2.9–15.9% cost increase, giving a cost elasticity of 2.0–10.9. It is concluded that 40 vol% GO-functionalized curaua/epoxy is the most advantageous of the three formulations, and that a brief mathematical re-analysis is a worthwhile step before published composite data are used for defense material selection.

Keywords : *Ballistic Armor, Graphene Oxide, Natural Fiber Composite, Error Propagation, Dimensionless Index*

Abstrak

Komposit serat alam terfungsionalisasi graphene oxide (GO) kini dipromosikan sebagai pengganti aramid yang murah pada sistem pelindung berlapis (multilayered armor system, MAS). Akan tetapi, tiga artikel utama mengenai topik ini di jurnal Polymers (terbit 2019, 2020, dan 2022) menyajikan hasilnya melalui rancangan uji, satuan, dan pembanding yang tidak sama, sehingga perbandingan langsung tidak dapat dilakukan. Penelitian ini menganalisis kembali data terpublikasi ketiga artikel tersebut dengan empat instrumen matematika: (1) neraca energi yang dipadukan dengan metode delta untuk merambatkan ketidakpastian energi serap; (2) hubungan Kelly–Tyson untuk kekuatan geser antarmuka; (3) dua indeks tak berdimensi, yakni margin keselamatan balistik SM = 1 − BFS/44 dan elastisitas biaya terhadap kenaikan energi impak; serta (4) replikasi ANOVA yang dilaporkan penulis asli. Hasil hitung ulang memberikan energi serap komposit rami/epoksi-GO sebesar 129,0 J terhadap nilai terlapor 130,3 J, simpangan baku 8,1 J terhadap 9,5 J, serta mengungkap bahwa 61% varians bersumber dari kecepatan impak. Pada dua penelitian MAS yang memakai konfigurasi uji serupa, penambahan fraksi serat dari 30 vol% menjadi 40 vol% memperkecil backface signature dari 27,4 mm menjadi 24,8 mm (SM naik dari 0,377 ke 0,436), sementara kenaikan energi Izod 31,1% diperoleh dengan tambahan biaya 2,9–15,9%, sehingga elastisitas biaya berada pada 2,0–10,9. Disimpulkan bahwa komposit curaua/epoksi 40 vol% terfungsionalisasi GO merupakan formulasi paling unggul di antara ketiganya, dan analisis ulang matematis yang ringkas layak dilakukan sebelum data komposit terpublikasi dijadikan dasar pemilihan material pertahanan.

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

Kata Kunci: Pelindung Balistik, Graphene Oxide, Komposit Serat Alam, Perambatan Galat, Indeks Tak Berdimensi

Penulis Korespondensi : Axcel Damario Farrel Simatupang

I. PENDAHULUAN

Sektor pertahanan membutuhkan material pelindung balistik yang ringan, terjangkau, dan dapat diproduksi di dalam negeri. Dalam dua puluh tahun terakhir, komposit polimer yang diperkuat serat lignoselulosa alam (natural lignocellulosic fibers, NLF) telah terbukti sanggup menggantikan kain aramid (Kevlar™) sebagai lapisan kedua sistem pelindung berlapis (multilayered armor system, MAS) berlapis depan keramik dalam menghadapi amunisi 7,62 mm level III (Monteiro et al., 2018; Costa et al., 2019). Daya tarik NLF terletak pada massa jenisnya yang rendah (serat curaua 0,96 g/cm³ dibandingkan aramid 1,44 g/cm³), harganya yang jauh lebih murah, serta sifatnya yang ramah lingkungan (Pickering, Efendy and Le, 2016).

Kendala terbesar NLF adalah adhesi antarmuka serat–matriks yang buruk akibat sifat hidrofilik hemiselulosa dan lignin; hal ini memicu delaminasi dan membuat pelat kehilangan integritas setelah tembakan pertama (Costa et al., 2019). Salah satu jalan keluar yang banyak diteliti adalah pelapisan atau penambahan graphene oxide (GO), material dua dimensi berisi gugus fungsi oksigen yang dapat berikatan dengan gugus hidroksil serat sekaligus dengan rantai epoksi (Sarker et al., 2018). Tiga artikel di jurnal Polymers menjadi rujukan utama untuk topik ini. Pertama, Costa et al. (2019) melapisi serat curaua dengan GO (GOCF) dan menguji komposit epoksi 30 vol% sebagai lapisan kedua MAS terhadap proyektil 7,62 mm; backface signature (BFS) yang diperoleh 27,4 mm dan pelat tetap utuh. Kedua, Pereira et al. (2020) mencampurkan 0,5 vol% GO ke dalam matriks epoksi berpenguat kain rami 30 vol% dan mengujinya secara stand-alone terhadap proyektil 0,22; energi serapnya 130 J, melampaui Kevlar setebal sama (100 J). Ketiga, Costa et al. (2022) meningkatkan fraksi serat menjadi 40 vol% GOCF serta melengkapinya dengan uji Izod (813 J/m), uji balistik MAS (BFS 24,8 mm), dan analisis biaya.

Walaupun ditulis oleh kelompok riset yang sama, ketiga artikel tersebut menggunakan konfigurasi uji, satuan hasil, dan pembanding yang berlainan: BFS dalam milimeter pada MAS, energi serap dalam joule pada uji stand-alone, dan energi Izod dalam J/m. Pembaca pun tidak dapat segera menjawab dua pertanyaan praktis: formulasi mana yang paling layak dipilih, dan seberapa besar ketidakpastian angka yang dilaporkan? Padahal data mentah yang sudah dipublikasikan (massa proyektil, kecepatan impak dan residu beserta simpangan bakunya, panjang kritis serat, tabel biaya) sesungguhnya memadai untuk ditelaah kembali secara matematis tanpa perlu eksperimen baru (Taylor, 1997).

Tujuan penelitian ini adalah (1) menghitung kembali dan menyelaraskan hasil ketiga artikel melalui neraca energi, perambatan galat dengan metode delta, dan hubungan Kelly–Tyson; (2) merumuskan indeks tak berdimensi agar ketiga formulasi dapat dibandingkan pada skala yang sama; dan (3) mereplikasi uji statistik (ANOVA) yang dilaporkan. Kebaruan yang ditawarkan adalah pendekatan matematis-komparatif terhadap data sekunder material pertahanan, suatu pendekatan yang masih jarang dijumpai dalam literatur komposit balistik, namun penting bagi pengambil keputusan di lingkungan pertahanan yang harus memilih material berdasarkan laporan terpublikasi.

II. METODE

Penelitian ini bersifat kuantitatif deskriptif-komparatif dan bertumpu pada data sekunder. Sumber datanya adalah teks, tabel, dan gambar dari tiga artikel akses terbuka di jurnal Polymers (MDPI): Costa et al. (2019), Pereira et al. (2020), dan Costa et al. (2022). Tidak ada eksperimen tambahan; seluruh angka yang diolah

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

merupakan angka yang dilaporkan penulis asli. Alur penelitian diperlihatkan pada Gambar 1, sedangkan ringkasan konfigurasi uji ketiga artikel dirangkum dalam Tabel 1.

Ekstraksi data tiga artikel → Verifikasi neraca energi & metode delta → Pemeriksaan Kelly–Tyson → Indeks tak berdimensi (SM, R, ε) → Replikasi ANOVA → Sintesis & rekomendasi material

Gambar 1. Tahapan Analisis Matematis Data Sekunder

Tabel 1. Konfigurasi Uji Tiga Artikel yang Dibandingkan

Aspek	Costa et al. (2019)	Pereira et al. (2020)	Costa et al. (2022)
Serat	Curaua, dilapisi GO 0,1% berat	Kain rami, tanpa lapisan	Curaua, dilapisi GO 0,1% berat
Letak GO	Permukaan serat (coating)	Dalam matriks epoksi (0,5 vol%)	Permukaan serat (coating, ~30 nm)
Fraksi serat	30 vol%	30 vol%	40 vol%
Matriks	Epoksi DGEBA/TETA	Epoksi DGEBA/TETA	Epoksi DGEBA/TETA
Konfigurasi uji	MAS (keramik + komposit 10 mm)	Stand-alone, pelat tunggal	MAS (keramik + komposit 10 mm)
Proyektil	7,62 mm, ~850 m/s	0,22 timah, ~283 m/s	7,62 mm, ~850 m/s
Keluaran utama	BFS (mm), ISS (MPa)	Energi serap (J)	BFS (mm), Izod (J/m), biaya (USD)
Pembanding	Kevlar 24 mm	Kevlar 99,74 J	Kevlar 21,3 mm

Pada uji stand-alone (Pereira et al., 2020), energi yang diserap target diperoleh dari selisih energi kinetik proyektil sebelum dan sesudah menembus target, setelah dikurangi energi yang hilang ketika proyektil melaju di udara tanpa target, E_0:

$$Eabs = mp\,(vi^2 - vr^2)/2 - E_0 \quad (1)$$

dengan mp menyatakan massa proyektil, vi kecepatan impak, dan vr kecepatan residu. Mengingat tiap besaran dilaporkan sebagai rerata ± simpangan baku, ketidakpastian Eabs dirambatkan memakai metode delta (ekspansi Taylor orde pertama) dengan anggapan variabel-variabel saling bebas (Taylor, 1997):

$$\sigma E^2 \approx (mp\,vi)^2\,\sigma vi^2 + (mp\,vr)^2\,\sigma vr^2 + [(vi^2 - vr^2)/2]^2\,\sigma mp^2 + \sigma E0^2 \quad (2)$$

Sumbangan relatif masing-masing suku terhadap σ^2E dijadikan ukuran sensitivitas. Fraksi energi yang terserap didefinisikan sebagai $\eta = Eabs / (\tfrac{1}{2}\, mp\, vi^2)$.

Model Kelly–Tyson (Kelly and Tyson, 1965) mengaitkan kekuatan geser antarmuka (interfacial shear strength, ISS) τ dengan panjang kritis serat lc, diameter serat d, dan kuat tarik serat σf:

$$\tau = \sigma f\, d / (2\, lc) \quad (3)$$

Persamaan (3) digunakan untuk menguji keselarasan antara nilai lc, σf, d, dan τ yang dilaporkan Costa et al. (2019) bagi serat curaua tanpa lapisan (CF) maupun berlapis GO (GOCF).

Agar perbandingan berada pada skala yang seragam, tiga indeks dirumuskan. Indeks pertama adalah margin keselamatan balistik yang mengacu pada batas trauma 44 mm dalam standar NIJ 0101.04 (National Institute of Justice, 2000): SM = 1 − BFS/44; SM = 0 berarti tepat pada ambang kegagalan, dan nilai yang lebih besar menandakan lebih aman. Indeks kedua adalah rasio perubahan relatif suatu sifat akibat GO, R = (XGO − X0)/X0, yang diterapkan pada modulus Young, kuat tarik, ISS, dan energi Izod. Indeks ketiga adalah elastisitas

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

biaya terhadap kenaikan kinerja, ε = (ΔIzod/Izod0)/(ΔC/C0), yaitu persentase kenaikan energi Izod untuk setiap persen kenaikan biaya MAS, yang dihitung dari Tabel 3 Costa et al. (2022).

Nilai F hitung dan F kritis ANOVA untuk uji Izod yang dilaporkan Costa et al. (2022) (F = 8,29 vs. Fkrit = 5,32) dicocokkan dengan tabel distribusi F pada α = 0,05 guna memperkirakan derajat kebebasan (jumlah spesimen) yang digunakan penulis serta menghitung nilai p. Semua perhitungan dijalankan dengan Python 3 dan dibulatkan hingga tiga angka penting.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Memasukkan mp = 3,36 g, vi = 283,23 m/s, vr = 42,67 m/s, dan E0 = 2,69 J dari Tabel 1 Pereira et al. (2020) ke Persamaan (1) memberikan Eabs = 129,0 J. Angka yang dilaporkan penulis, 130,34 J, hanya berbeda 1,0%; selisih ini dapat ditimbulkan oleh pembulatan dan perhitungan per tembakan sebelum dirata-ratakan. Energi kinetik datang ½ mp vi² = 134,8 J, sehingga fraksi energi terserap η = 0,957, artinya komposit menyerap hampir seluruh energi proyektil 0,22. Penerapan metode delta (Persamaan 2) dengan σvi = 6,63 m/s, σvr = 32,10 m/s, σmp = 0,03 g, dan σE0 = 1,71 J menghasilkan σE = 8,1 J, berdekatan dengan nilai empiris 9,51 J yang dilaporkan. Rincian dekomposisi varians ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dekomposisi Varians Energi Serap (Pereira et al., 2020)

No	Sumber ketidakpastian	Turunan parsial	Simpangan baku masukan	Kontribusi terhadap σ²E (%)
1	Kecepatan impak vi	0,952 J/(m/s)	6,63 m/s	61,0
2	Kecepatan residu vr	−0,143 J/(m/s)	32,10 m/s	32,4
3	Energi udara E0	1	1,71 J	4,5
4	Massa proyektil mp	39,2 J/g	0,03 g	2,1

Sifat tarik serat dan parameter antarmuka yang dilaporkan Costa et al. (2019), lengkap dengan rasio perubahan relatif R, dirangkum pada Tabel 3. Lapisan GO meningkatkan modulus Young serat sebesar 47,9%, tetapi menurunkan kuat tarik 41,8% dan regangan 34,6%; diameter serat nyaris tidak berubah (−5,7%, masih dalam rentang simpangan baku), selaras dengan tebal lapisan GO yang hanya sekitar 10 nm. Jika nilai σf, d, dan lc dimasukkan ke Persamaan (3), diperoleh τ = 42,7 MPa (CF) dan 46,9 MPa (GOCF), kira-kira dua kali lipat nilai yang dilaporkan (18,2 dan 27,5 MPa).

Tabel 3. Sifat Serat Curaua Tanpa dan Dengan Lapisan GO (Costa et al., 2019)

No	Sifat	CF (tanpa GO)	GOCF (dengan GO)	R = ΔX/X0
1	Kuat tarik σf (MPa)	3153 ± 970	1834 ± 673	−0,418
2	Regangan total ε (%)	13,48 ± 5,45	8,82 ± 3,10	−0,346
3	Modulus Young E (GPa)	25,7 ± 11,3	38,0 ± 10,0	+0,479
4	Diameter d (µm)	54,2 ± 14,3	51,1 ± 12,0	−0,057
5	Panjang kritis lc (mm)	2	1	−0,500
6	ISS τ dilaporkan (MPa)	18,2	27,5	+0,511

Perbandingan langsung hanya dimungkinkan antara Costa et al. (2019) dan Costa et al. (2022), karena keduanya memakai MAS, pelat 10 mm, dan proyektil 7,62 mm yang identik. Margin keselamatan SM untuk lima konfigurasi yang relevan disajikan pada Tabel 4. Semua komposit curaua berada pada SM 0,38–0,44,

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

jauh di atas ambang nol dan hanya sedikit di bawah Kevlar (0,45–0,52). Sebagai perbandingan, pelat Dyneema™ 25 mm yang menggantikan seluruh MAS hanya mencapai SM = 0,06 (Costa et al., 2022).

Tabel 4. Margin Keselamatan Balistik Lapisan Kedua MAS terhadap Proyektil 7,62 mm

No	Lapisan kedua MAS	BFS (mm)	SM = 1 − BFS/44	Integritas pasca-uji	Sumber
1	30 vol% CF/epoksi	25,6 ± 0,2	0,418	Pecah dua	Costa et al. (2019)
2	30 vol% GOCF/epoksi	27,4 ± 0,3	0,377	Utuh	Costa et al. (2019)
3	40 vol% CF/epoksi	24,8	0,436	Utuh	Costa et al. (2022)
4	40 vol% GOCF/epoksi	24,8	0,436	Utuh	Costa et al. (2022)
5	Kevlar™ 10 mm	21,3–24	0,455–0,516	Utuh	Costa et al. (2019, 2022)

Berdasarkan Tabel 3 Costa et al. (2022), biaya MAS berukuran 150 × 150 mm meningkat dari USD 20,95 (40CF/EM) menjadi USD 21,55–24,27 (40GOCF/EM), yakni $\Delta C/C0$ = 2,86–15,85% bergantung pada harga GO komersial, tanpa perubahan berat. Kenaikan energi Izod dari 620 ke 813 J/m setara $\Delta Izod/Izod0$ = 31,1%, sehingga elastisitas biaya ε = 1,96 untuk skenario GO mahal dan ε = 10,9 untuk skenario GO murah. Dalam replikasi ANOVA, nilai Fkrit = 5,32 identik dengan F(1, 8; α = 0,05) = 5,318, yang menyiratkan dua kelompok dengan lima spesimen per kelompok sebagaimana ASTM D256 (ASTM International, 2018); dengan F hitung 8,29 diperoleh p = 0,021 < 0,05. Untuk BFS, F hitung 1,57 berada di bawah F(1, ν_2) pada α = 0,05 untuk semua ν_2 (nilai terkecil 3,84).

2. Pembahasan

Tabel 2 memperlihatkan bahwa kecepatan impak menyumbang 61% varians energi serap, meskipun simpangan baku kecepatan residu lima kali lebih besar. Penyebabnya adalah turunan parsial $\partial E/\partial vi$ = mp vi (0,95 J per m/s) yang jauh melampaui $\partial E/\partial vr$ = mp vr (0,14 J per m/s). Dengan demikian, untuk memperkecil ketidakpastian hasil uji balistik stand-alone, pengendalian kecepatan tembak lebih menentukan daripada ketelitian pengukuran kecepatan residu. Temuan ini sesuai dengan prinsip dasar analisis galat bahwa besaran dengan turunan parsial terbesar, bukan yang simpangan bakunya terbesar, yang mendominasi ketidakpastian keluaran (Taylor, 1997).

Selisih antara τ dari Persamaan (3) dan τ yang dilaporkan Costa et al. (2019) dapat dimaklumi, sebab penulis asli menurunkan τ dari beban cabut (pullout) hasil pengukuran, bukan dari kuat tarik serat tunggal; kuat tarik serat tunggal yang simpangan bakunya mencapai 30% (±970 MPa) memang bukan masukan yang ideal bagi model Kelly–Tyson. Meski begitu, rasio $\tau GOCF/\tau CF$ = 1,51 yang dilaporkan sejalan dengan rasio lc yang turun dari 2 mm ke 1 mm dikalikan rasio σf yang turun ke 0,58, sehingga arah dan orde besar perbaikan antarmuka oleh GO tetap terverifikasi. Secara fisis, GO menjadikan serat lebih kaku sekaligus lebih getas (modulus naik, kuat tarik dan regangan turun), tetapi memperkuat ikatan serat–matriks, sebagaimana dilaporkan Sarker et al. (2018) untuk komposit serat alam berbasis graphene.

Tabel 4 memunculkan dua pola. Pertama, pada 30 vol% lapisan GO malah menambah BFS sebesar 1,8 mm (SM berkurang 0,041), namun mengubah mode kegagalan dari pecah menjadi utuh; GO mengorbankan sedikit kemampuan disipasi energi (karena delaminasi dan pullout berkurang) demi integritas, yang merupakan syarat mutlak rompi anti peluru untuk tembakan berulang. Kedua, kenaikan fraksi serat dari 30 ke 40 vol% menurunkan BFS GOCF dari 27,4 ke 24,8 mm, setara gradien −0,26 mm per vol%; karena hanya bertumpu pada dua titik, gradien ini tidak boleh diekstrapolasi ke luar rentang 30–40 vol%. Pada 40 vol%, pengaruh GO terhadap BFS lenyap (keduanya 24,8 mm) sebagaimana dikonfirmasi ANOVA, sementara pengaruhnya terhadap energi Izod tetap bermakna (+31,1%, p = 0,021).

Energi serap dari Pereira et al. (2020) tidak dapat dimasukkan ke Tabel 4 karena konfigurasi ujinya berlainan (stand-alone, proyektil 0,22 dengan energi datang 135 J, bukan 7,62 mm dengan energi datang

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

sekitar 3,4 kJ). Perbandingan yang sahih untuk artikel ini hanya terhadap pembanding internalnya: R terhadap Kevlar setebal sama = (130,34 − 99,74)/99,74 = +0,307 dan terhadap komposit sisal/epoksi = +0,346. Oleh karena itu ketiga artikel menunjuk ke arah yang sama: GO, baik di permukaan serat maupun di dalam matriks, mendongkrak kinerja impak komposit NLF hingga 0,3–0,5 kali lebih baik daripada komposit tanpa GO pada metrik energi, sedangkan pada metrik BFS dalam MAS pengaruhnya netral sampai sedikit negatif.

Dengan $\varepsilon > 1$ pada kedua skenario harga GO, setiap tambahan biaya 1% mendatangkan tambahan ketahanan impak lebih dari 1%, sehingga fungsionalisasi GO dapat dibenarkan secara ekonomi. Di sisi lain, mengganti 30CF/EM dengan 40CF/EM memangkas biaya 1,24% dan berat 0,81% sekaligus menurunkan BFS, sehingga tergolong perbaikan Pareto tanpa kompromi. Jika Tabel 4, elastisitas biaya, dan replikasi statistik dipadukan, komposit 40 vol% GOCF/epoksi tampil sebagai pilihan paling menguntungkan: SM tertinggi di antara komposit curaua (0,436), energi Izod tertinggi yang pernah dilaporkan untuk NLF (813 J/m), pelat tetap utuh pasca-uji, berat 0,8% lebih ringan dan biaya 1,2% lebih rendah daripada formulasi 30 vol%, dengan premi GO yang terbayar oleh $\varepsilon > 1$. Pendekatan rami/GO-matriks (Pereira et al., 2020) menjanjikan pada metrik energi, tetapi belum diuji dalam MAS terhadap ancaman level III sehingga belum dapat disejajarkan. Keterbatasan analisis ini meliputi ketergantungan pada data yang dilaporkan (jumlah spesimen BFS tidak selalu disebutkan), gradien BFS–fraksi serat yang hanya didukung dua titik, dan asumsi kebebasan antarvariabel pada metode delta.

IV. KESIMPULAN

Telaah matematis atas tiga artikel Polymers mengenai komposit serat alam–graphene oxide memperlihatkan bahwa neraca energi dan metode delta berhasil mereproduksi energi serap komposit rami/GO-epoksi (129,0 J vs. 130,3 J) beserta simpangan bakunya (8,1 J vs. 9,5 J), dengan 61% varians berasal dari kecepatan impak; indeks margin keselamatan SM menempatkan semua komposit curaua pada 0,38–0,44, sedikit di bawah Kevlar (0,45–0,52) dan jauh di atas Dyneema 25 mm (0,06), sementara kenaikan fraksi serat 30 → 40 vol% mengangkat SM dari 0,377 ke 0,436; replikasi ANOVA memastikan bahwa GO meningkatkan energi Izod secara bermakna ($p = 0,021$) tanpa mengubah BFS; elastisitas biaya fungsionalisasi GO berada pada 2,0–10,9 (> 1) sehingga premi GO terbayar oleh kenaikan ketahanan impak 31,1%; dan komposit 40 vol% curaua terfungsionalisasi GO/epoksi merupakan formulasi paling layak di antara ketiga artikel untuk lapisan kedua MAS. Dari sisi metode, perangkat matematika dasar (perambatan galat, model Kelly–Tyson, indeks tak berdimensi, dan pemeriksaan tabel F) terbukti memadai untuk memverifikasi dan menyatukan hasil eksperimen material pertahanan yang dilaporkan dalam satuan berbeda; penelitian berikutnya disarankan mengukur BFS pada lebih dari dua fraksi serat agar gradiennya dapat dimodelkan dengan regresi, serta menguji komposit rami/GO-matriks dalam konfigurasi MAS level III supaya ketiga pendekatan dapat dibandingkan pada metrik yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Matematika Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia atas dukungan dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM International (2018) ASTM D256-10: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Costa, U. O., Nascimento, L. F. C., Garcia, J. M., Monteiro, S. N., da Luz, F. S., Pinheiro, W. A. and Garcia Filho, F. C. (2019) 'Effect of Graphene Oxide Coating on Natural Fiber Composite for Multilayered Ballistic Armor', Polymers, 11(8), p. 1356. doi: 10.3390/polym11081356.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Costa, U. O., Nascimento, L. F. C., Bezerra, W. B. A., Neves, P. P., Huaman, N. R. C., Monteiro, S. N. and Pinheiro, W. A. (2022) 'Dynamic and Ballistic Performance of Graphene Oxide Functionalized Curaua Fiber-Reinforced Epoxy Nanocomposites', Polymers, 14(9), p. 1859. doi: 10.3390/polym14091859.

Kelly, A. and Tyson, W. R. (1965) 'Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum', Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 13(6), pp. 329–350. doi: 10.1016/0022-5096(65)90035-9.

Monteiro, S. N., Pereira, A. C., Ferreira, C. L., Pereira Júnior, É., Weber, R. P. and Assis, F. S. (2018) 'Performance of Plain Woven Jute Fabric-Reinforced Polyester Matrix Composite in Multilayered Ballistic System', Polymers, 10(3), p. 230. doi: 10.3390/polym10030230.

National Institute of Justice (2000) NIJ Standard-0101.04: Ballistic Resistance of Personal Body Armor. Washington, DC: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs.

Pereira, A. C., Lima, A. M., Demosthenes, L. C. C., Oliveira, M. S., Costa, U. O., Bezerra, W. B. A., Monteiro, S. N., Rodriguez, R. J. S., de Deus, J. F. and Pinheiro, W. A. (2020) 'Ballistic Performance of Ramie Fabric Reinforcing Graphene Oxide-Incorporated Epoxy Matrix Composite', Polymers, 12(11), p. 2711. doi: 10.3390/polym12112711.

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A. and Le, T. M. (2016) 'A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance', Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 83, pp. 98–112. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.

Sarker, F., Karim, N., Afroj, S., Koncherry, V., Novoselov, K. S. and Potluri, P. (2018) 'High-Performance Graphene-Based Natural Fiber Composites', ACS Applied Materials & Interfaces, 10(40), pp. 34502–34512. doi: 10.1021/acsami.8b13018.

Taylor, J. R. (1997) An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. 2nd edn. Sausalito, CA: University Science Books.