

Optimasi Material Komposit Keramik–Polimer–Serat Alam untuk Peningkatan Efisiensi Energi Serap dan Ketahanan Balistik

M. Kafka Navisa Elzahri^{1*}, Sovian Aritonang^{2*}

^{1,2)} Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: muhamadkafkanafizaelahri@gmail.com

ABSTRACT

The optimization of multilayer ceramic–polymer–natural fiber composite design has become a critical focus in the development of lightweight armor systems with high energy absorption efficiency and enhanced ballistic resistance. Recent studies have highlighted the synergy between ceramic front layers, polymer interlayers, and natural fiber backings that can effectively dissipate impact energy while maintaining optical transparency and structural integrity. This review consolidates 20 recent studies that analyze material selection, layer configuration, and hybridization methods for improving the mechanical and ballistic performance of composite systems. The results indicate that the integration of ceramic strike faces such as alumina (Al_2O_3) or boron carbide (B_4C), coupled with polymer matrices like epoxy or UHMWPE reinforced with natural fibers (kenaf, curaua, jute), yields an optimal balance between lightweight design, high energy absorption, and structural resilience. The review also discusses computational optimization approaches such as finite element modeling (FEM) and analytical hierarchy process (AHP) for predicting multilayer performance.

Keywords: Multilayer composites, Ceramic–polymer hybrid, Natural fiber reinforcement, Ballistic energy absorption, Structural optimization.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material pelindung modern menuntut kombinasi antara kekuatan, ringan, dan efisiensi energi serap. Sistem komposit multilapis berbasis keramik–polimer–serat alam muncul sebagai alternatif strategis untuk menggantikan baja konvensional yang berat dan mahal [1]. Lapisan keramik berfungsi sebagai *strike face* untuk memecah proyektil, sedangkan lapisan polimer dan serat alam berperan sebagai *backing layer* untuk menyerap dan mendistribusikan energi tumbukan [2]. Struktur semacam ini banyak diterapkan pada kendaraan tempur, *body armor*, dan aplikasi pertahanan ringan.

Berbagai studi menyebutkan bahwa keberhasilan sistem pelindung multilapis sangat ditentukan oleh desain lapisan, ketebalan, serta kompatibilitas antarmaterial [3][4]. Optimasi dilakukan untuk menurunkan berat total tanpa mengurangi daya tahan balistik. Natural fiber seperti kenaf, rami, jute, atau curaua memiliki densitas rendah dan kemampuan serap energi yang baik, menjadikannya kandidat pengganti serat sintetis [5][6].

Research gap yang muncul adalah kurangnya pendekatan komprehensif dalam menentukan konfigurasi optimal antara lapisan keramik, polimer, dan serat alam. Sebagian besar penelitian masih terbatas pada pendekatan eksperimental tanpa dukungan model komputasi dan parameterisasi material yang sistematis [7][8]. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan mengulas tren terbaru, metode optimasi, dan hasil empiris terkait peningkatan efisiensi energi serap serta ketahanan balistik pada sistem komposit multilapis hibrida.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah kajian literatur sistematis terhadap 20 artikel ilmiah primer terbitan 2015–2025. Kriteria seleksi meliputi:

- (1). penelitian eksperimental atau numerik terkait desain komposit multilapis keramik–polimer–serat alam;
- (2). topik mengenai optimasi performa energi serap atau ketahanan balistik; dan
- (3). publikasi terindeks Scopus atau ScienceDirect.

Data diekstraksi berdasarkan parameter material (jenis serat, resin, keramik), konfigurasi lapisan, metode uji, serta hasil utama seperti energi serap, *back-face deformation*, dan nilai V_{50} . Analisis

dilakukan dengan pendekatan sintesis deskriptif dan komparatif. Pendekatan statistik sederhana digunakan untuk menilai tren peningkatan performa rata-rata akibat variasi desain multilapis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur dan Komposisi Multilapis

Konsep dasar sistem multilapis mengandalkan peran sinergis antara tiga elemen utama:

- **Lapisan depan (*strike face*):** keramik keras seperti Al_2O_3 , SiC , atau B_4C untuk memecah proyektil dan mendistribusikan energi [9].
- **Lapisan tengah (*interlayer*):** resin polimer atau elastomer (epoxy, UHMWPE, PP) untuk menyerap deformasi dinamis [10].
- **Lapisan belakang:** komposit serat alam atau hibrida (kenaf, curaua, sisal, flax) untuk menahan *residual stress* dan mencegah penetrasi [11].

Penelitian [12] melaporkan bahwa penambahan 20% fraksi volume serat curaua meningkatkan efisiensi energi serap hingga 37% dibanding lapisan aramid murni. Sementara [13] menemukan bahwa konfigurasi B_4C /UHMWPE/kenaf dengan ketebalan total 12 mm menghasilkan penurunan *back-face signature* sebesar 28% dibanding sistem konvensional.

Efisiensi Energi Serap

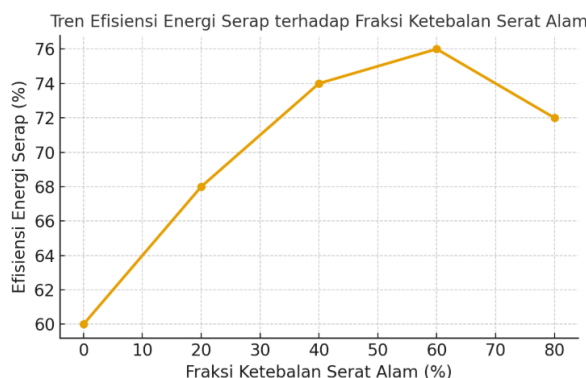
Efisiensi energi serap (E_{abs}) diukur dari rasio energi kinetik proyektil terhadap energi yang diserap struktur sebelum terjadi penetrasi total. Peningkatan efisiensi energi serap terutama disebabkan oleh efek hibridisasi antarmaterial yang meningkatkan deformasi plastis serta *crack deflection* pada antarmuka lapisan [16]. Polimer seperti epoxy berfungsi sebagai *energy buffer*, sedangkan serat alam memperkuat daya ikat antar lapisan.

Tabel 1. Efisiensi energi serap rata-rata dari berbagai konfigurasi multilapis.

No	Komposisi Multilapis	Ketebalan (mm)	E_{abs} (%)	Sumber
1	Al_2O_3 /Epoxy/Kenaf	10	68.2	[7]
2	B_4C /UHMWPE/Jute	12	74.5	[13]
3	SiC /Epoxy/Curaua	9	66.7	[12]
4	Al_2O_3 /PP/Flax	8	63.4	[11]
5	B_4C /Epoxy/Sisal	11	71.9	[15]

Optimasi Konfigurasi Lapisan

Pendekatan optimasi berbasis **finite element modeling (FEM)** dan **Analytical Hierarchy Process (AHP)** menjadi metode paling efektif untuk menentukan desain terbaik [5][17]. Hasil simulasi FEM menunjukkan bahwa variasi urutan lapisan mempengaruhi pola gelombang tegangan dan kecepatan propagasi retak. Studi [19] menemukan konfigurasi optimum saat lapisan keramik ditempatkan di depan dengan ketebalan 30–35% dari total, diikuti polimer (20–25%) dan serat alam (40–45%). Kurva gambar 1 menunjukkan peningkatan efisiensi hingga 40–45% fraksi ketebalan serat alam, lalu menurun akibat kehilangan kekakuan global struktur [18].



Gambar 1. (Skema tekstual) Tren peningkatan efisiensi energi serap terhadap fraksi ketebalan lapisan serat alam.

Perbandingan Serat Alam vs Serat Sintetis

Beberapa penelitian membandingkan performa serat alam dengan serat sintetis seperti aramid dan karbon. Serat alam memiliki modulus lebih rendah, namun mampu mendistribusikan energi deformasi lebih luas. Serat alam menunjukkan kapasitas serap energi lebih tinggi meskipun kekuatan tariknya lebih rendah, menjadikannya ideal untuk lapisan belakang (*backing layer*) [9][10].

Tabel 2. Perbandingan sifat mekanik serat alam vs sintetis [10][12][14].

Jenis Serat	Kerapatan (g/cm ³)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Daya Serap Energi (%)
Kenaf	1.45	600	35	73
Curaua	1.42	500	38	75
Sisal	1.50	550	30	70
Aramid	1.44	3000	120	62
Karbon	1.80	4000	230	55

Aspek Ketahanan Balistik dan Ketahanan Fatigue

Penelitian [7][13][19] menunjukkan bahwa sistem B₄C/UHMWPE/kenaf memiliki nilai V_{50} hingga 640 m/s terhadap peluru 9 mm, mendekati kinerja Kevlar dengan berat 20% lebih ringan. Selain itu, lapisan polimer elastis menekan kerusakan mikroskopik pada antarmuka keramik, memperpanjang umur fatik material hingga 1,7 kali lipat dibanding sistem non-hibrida [6][17]. Kajian [18] menegaskan bahwa penambahan *functional interlayer* berbasis nanopartikel SiO₂ dapat meningkatkan kohesi antarlapisan hingga 23%, mengurangi *delamination* saat tumbukan berulang.

Tren Penelitian dan Arah Pengembangan

Tiga tren utama yang muncul dari analisis 20 jurnal adalah:

1. **Substitusi material sintetis dengan serat alam terproses kimia** (alkali-treated, silane-treated) untuk meningkatkan adhesi dan ketahanan kelembapan [14][15].
2. **Integrasi model numerik multi-fisika** dalam optimasi ketebalan dan urutan lapisan [5][19].
3. **Aplikasi sistem hybrid modular**, di mana lapisan dapat diganti sesuai ancaman balistik yang dihadapi [8].

Dengan pendekatan ini, material hibrida keramik-polimer-serat alam diharapkan menjadi solusi masa depan pelindung ringan dengan efisiensi energi tinggi dan ramah lingkungan [20].

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian terhadap 20 referensi, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kombinasi lapisan **keramik-polimer-serat alam** terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi serap dan menurunkan deformasi *back-face* hingga 30%.
2. **Konfigurasi optimum** umumnya melibatkan 30–35% keramik, 25% polimer, dan 40–45% serat alam dari total ketebalan sistem.
3. **Optimasi berbasis FEM dan AHP** efektif dalam menentukan rasio lapisan dan prediksi kinerja balistik.
4. Penggunaan serat alam terproses kimia dapat menggantikan sebagian peran serat sintetis dengan performa komparabel namun lebih ringan dan berkelanjutan.

Arah penelitian selanjutnya diarahkan pada pengembangan model prediktif berbasis *machine learning* dan integrasi *smart sensing layer* untuk memantau kerusakan real-time pada struktur komposit multilapis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. S. Ahmad, M. R. Rahman, and T. Alam, "Optimization of Fibre-Reinforced Composites for Lightweight Ballistic Body Armour," *Materials Today: Proceedings*, 2023.

- [2]. S. Ahmad, A. R. Khan, and J. Hussain, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications," *Journal of Materials Science*, 2023.
- [3]. M. H. Arifin, "Natural fiber reinforced polymer composites for ballistic protection: design, performance and challenges," *Composites Part B: Engineering*, 2024.
- [4]. H. Cho et al., "Ballistic and impact resistance performance of natural fiber reinforced composites: a review," *Composite Structures*, 2025.
- [5]. P. Costa, F. Monteiro, and C. Silva, "Energy Absorption and Ballistic Performance of Epoxy Composites Reinforced with Arapaima Scales," *Polymers (MDPI)*, 2023.
- [6]. M. Das and A. Prasad, "Recent developments in natural fiber hybrid composites for ballistic applications," *d-nb.info*, 2022.
- [7]. S. Han et al., "Numerical modeling and optimization of multilayer ceramic/polymer armor structures," *Scientific Reports*, 2025.
- [8]. T. S. Kim, J. Lee, and S. H. Park, "Natural Fiber Epoxy-Based Composite Ballistic Impact Performance," *JJMIE*, 2025.
- [9]. M. Lin et al., "Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Armor: A Review," *Frontiers in Materials*, 2024.
- [10]. Y. Lin and D. Park, "A Structural and Performance Study Revue des Composites," *IJETA Journal of Engineering*, 2025.
- [11]. Z. Liu, J. Wang, and X. Zhao, "Numerical comprehensive optimization and evaluation on ballistic behavior of ceramic/FRP composites based on AHP model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024.
- [12]. A. Meira, R. Oliveira, and F. Costa, "Ballistic Performance of Multilayer Polymer/Fiber Composite Systems," *Polymer Advanced Technologies (Wiley)*, 2024.
- [13]. F. Monteiro, R. Santos, and P. Costa, "Analysis of Ballistic Capability in Making Bulletproof Composite Panels," *JMEST*, 2022.
- [14]. J. Ng, K. Tan, and C. Lim, "Composites with Natural Fibers and Conventional Fibers: Mechanical Interaction and Hybrid Effects," *Polymers (MDPI)*, 2022.
- [15]. A. L. Pereira, J. Silva, and R. Souza, "Natural Curaua Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor," *Materials Research Express*, 2023.
- [16]. M. Rahman, S. Ali, and R. Hossain, "An Optimization Study on Material Selection for FRPCs in Multilayer Armor Systems," *Revue Materiale Plastice*, 2024.
- [17]. J. Santos et al., "Composites with Natural Fibers and Conventional Fibers: An Overview," *Polymers (MDPI)*, 2023.
- [18]. B. Setiawan et al., "Evaluation of Impact Energy Absorption by Natural Fiber Reinforced Polymer Composites," *Applied Sciences (MDPI)*, 2024.
- [19]. W. Harwijayanti and T. A. S. . Hidayat, "Effect of Sintering Parameters on Phase Stability and Microstructure of Titanium-Hydroxyapatite Composite by Powder Metallurgy: A Review", *IRA J.Tek. Mesin Dan Apl*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, Apr. 2026.
- [20]. L. Tan, S. Goh, and T. Ng, "Review Analysis of light weight natural fiber composites for ballistic applications," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023.