

Perbedaan Kemampuan Balistik Antara Grafit dan Serat Fiber untuk Pembuatan Rompi Antipeluru: Studi Literatur

Isya Rahma Hanifah*, Timbul Siahaan, Edy Sulistyadi

Program Studi Industri Pertahanan, Universitas Pertahanan, Jawa Barat, Indonesia

*Koresponden email: isya.hanifah@tp.idu.ac.id

Diterima: 9 Januari 2026

Disetujui: 04 Februari 2026

Abstract

Bulletproof vests are ballistic protection systems designed to prevent projectile penetration and dissipate impact energy. Their performance is strongly influenced by the mechanical properties of the constituent materials, particularly tensile strength, elastic modulus, fracture strain, and energy absorption capability. This study aims to review and compare the potential of graphite with various fiber materials, including aramid, Kevlar, kenaf, ramie, and pineapple leaf fiber, for bulletproof vest applications. A systematic literature review of relevant international journals was conducted. The results indicate that graphite exhibits superior intrinsic properties, such as extremely high tensile strength, elastic modulus, and specific energy absorption capacity, which suggest its potential to improve ballistic efficiency with reduced weight and thickness. However, the brittle behavior and relatively low fracture strain of graphite limit its direct use as a standalone material. In contrast, fiber materials, particularly aramid and Kevlar, offer a more balanced combination of strength and ductility, making them more reliable for current practical applications. Therefore, the development of graphite–resin or graphite–epoxy hybrid composites is considered the most promising approach to exploit the advantages of graphite while enhancing the toughness and reliability of bulletproof vests.

Keywords: *ballistic performance, bulletproof vest, composite materials, fiber materials, graphite*

Abstrak

Rompi antipeluru merupakan sistem proteksi balistik yang dirancang untuk mencegah penetrasi proyektil dan meredam energi tumbukan. Performa rompi sangat dipengaruhi oleh sifat mekanik material penyusunnya, terutama kekuatan tarik, modulus elastisitas, regangan putus, dan kemampuan penyerapan energi. Kajian ini bertujuan untuk meninjau dan membandingkan potensi material grafit dengan berbagai serat fiber, seperti aramid, Kevlar, kenaf, rami, dan serat daun nanas, dalam konteks aplikasi rompi antipeluru. Metode yang digunakan adalah review literatur sistematis terhadap jurnal internasional yang relevan. Hasil kajian menunjukkan bahwa grafit memiliki keunggulan signifikan dari sisi kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kapasitas penyerapan energi spesifik, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi perlindungan balistik dengan massa dan ketebalan yang lebih rendah. Namun, sifat getas dan regangan putus grafit yang relatif rendah membatasi pemanfaatannya sebagai material tunggal. Sebaliknya, serat fiber, khususnya aramid dan Kevlar, menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan dan keuletan untuk aplikasi praktis. Oleh karena itu, pengembangan komposit hibrida grafit–resin atau grafit–epoksi dinilai sebagai pendekatan paling optimal untuk memanfaatkan keunggulan grafit sekaligus meningkatkan ketangguhan dan keandalan rompi antipeluru.

Kata kunci: *grafit, material komposit, performa balistik, rompi antipeluru, serat fiber*

1. Pendahuluan

Rompi antipeluru merupakan salah satu perangkat proteksi balistik yang berfungsi melindungi tubuh dari penetrasi proyektil serta mengurangi dampak energi tumbukan. Teknologi rompi antipeluru telah berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan perlindungan bagi aparat keamanan, militer, maupun individu sipil tertentu [6]. Pengembangan teknologi ini tidak hanya menuntut efektivitas dalam menahan peluru, tetapi juga mempertimbangkan aspek kenyamanan, bobot, fleksibilitas, dan ketahanan material dalam berbagai kondisi lingkungan.

Dalam proses perancangannya, pemilihan material menjadi faktor utama yang menentukan performa balistik rompi. Setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda sehingga memengaruhi cara material tersebut merespons tumbukan proyektil. Dua kelompok material yang banyak menarik perhatian peneliti adalah grafit dan serat fiber. Grafit merupakan material komposit berstruktur

berlapis yang memiliki kekakuan tinggi dan berat relatif ringan [16], sementara serat fiber seperti Kevlar dan UHMWPE terkenal dengan kekuatan tariknya yang sangat tinggi serta kemampuan menyerap energi yang besar [4].

Perbedaan mendasar antara grafit dan serat fiber terletak pada mekanisme deformasi saat menerima beban tumbukan berkecepatan tinggi. Grafit cenderung bersifat getas sehingga ketika terbentur proyektil, material ini bekerja melalui mekanisme pemecahan dan delaminasi struktur komposit yang dapat membantu memperlambat proyektil [11]. Namun, sifat getas tersebut juga membuat grafit rentan mengalami kerusakan signifikan. Sebaliknya, serat fiber mampu menahan energi tumbukan melalui mekanisme peregangan serat, gesekan antar serat, dan distribusi gaya yang merata, sehingga memberikan ketahanan balistik yang lebih baik terutama untuk rompi fleksibel [2].

Seiring meningkatnya minat terhadap teknologi material komposit, para peneliti mulai membandingkan performa kedua material dalam konteks aplikasi balistik untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif. Banyak penelitian eksperimental menunjukkan bahwa serat fiber menawarkan ketangguhan yang lebih tinggi dan kemampuan menyerap energi yang lebih baik dibandingkan grafit, khususnya pada pengujian peluru berkecepatan sedang hingga tinggi. Namun, grafit masih memiliki potensi besar sebagai lapisan keras dalam sistem armor berlapis karena kemampuannya memecah proyektil sebelum energi sisanya diserap oleh lapisan belakang.

Berdasarkan perkembangan tersebut, diperlukan suatu kajian literatur yang secara sistematis membahas perbedaan kemampuan balistik grafit dan serat fiber. Kajian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mekanik dan balistik masing-masing material, meninjau hasil penelitian terdahulu, serta menganalisis potensi penerapannya dalam pembuatan rompi antipeluru baik secara tunggal maupun dalam bentuk komposit hybrid. Dengan memahami kelebihan dan keterbatasan kedua material, penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan rompi antipeluru yang lebih efektif, ringan, dan adaptif terhadap berbagai ancaman balistik.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian tentang perbedaan kemampuan balistik antara grafit dan serat fiber untuk pembuatan rompi anti peluru akan menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis metode kajian pustaka sistematis (*systematic literature review*) guna mengidentifikasi, mengevaluasi, serta menyintesis berbagai hasil studi yang membahas kemampuan balistik untuk pembuatan rompi anti peluru. Metodologi ini dipilih untuk mendapatkan gambaran menyeluruh mengenai kemampuan material grafit dan serat fiber yang memengaruhi kemampuan balistik dalam pembuatan rompi anti peluru.

Proses pencarian sumber dilakukan melalui penelusuran literatur ilmiah terindeks pada basis data terkemuka, seperti Scencedirect, Springer, Scopus, dan Google Scholar, pada rentang tahun terbit 2008-2025. Dengan menggunakan kata kunci seperti *graphite ballistic performance*, *fiber-reinforced armor*, *Kevlar impact resistance*, dan *UHMWPE ballistic behavior*.

Setelah proses seleksi awal, jurnal-jurnal tersebut disaring berdasarkan kriteria inklusi seperti penggunaan standar pengujian balistik yang relevan, penggunaan material grafit atau serat fiber sebagai objek utama penelitian, serta penyajian data kuantitatif mengenai karakteristik mekanik dan performa balistik. Sumber yang tidak memenuhi kriteria atau tidak memuat data empiris yang cukup dikeluarkan dari daftar kajian.

Dari hasil pencarian awal yang menghasilkan lebih dari 70 publikasi, dilakukan penyaringan berdasarkan abstrak dan isi utama, sehingga memperoleh 16 studi utama untuk dianalisis lebih lanjut dalam kajian ini. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dengan cara membandingkan parameter utama seperti batas balistik (V50), energi serap, deformasi belakang (*backface signature*), serta mode kegagalan material. Selain itu, mekanisme respons material terhadap tumbukan proyektil juga dikaji untuk memahami perbedaan fundamental antara grafit dan serat fiber. Hasil-hasil tersebut selanjutnya disintesis menjadi gambaran yang komprehensif mengenai keunggulan, kelemahan, dan potensi aplikasi masing-masing material dalam pembuatan rompi antipeluru.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perbedaan Sifat Mekanik Dasar antara Grafit dan Serat Fiber

Grafit dan serat fiber memiliki perbedaan sifat mekanik yang sangat signifikan sehingga berdampak langsung terhadap performa balistik keduanya. Grafit komposit dikenal sebagai material dengan kekakuan dan kekuatan tekan tinggi, sehingga mampu mempertahankan bentuk dan menahan beban dalam arah tertentu tanpa mengalami deformasi besar [14]. Karakteristik ini menjadikan grafit menarik sebagai

material untuk armor keras, terutama pada sistem pelindung yang membutuhkan kemampuan memecah proyektil. Namun, meskipun grafit memiliki kekakuan yang tinggi, sifat getasnya menyebabkan material ini mudah patah ketika terkena tumbukan berenergi tinggi.

Serat fiber, di sisi lain, memiliki karakteristik mekanik yang berbeda secara drastis. Kevlar, UHMWPE, dan serat karbon merupakan tiga jenis serat fiber yang sering digunakan dalam proteksi balistik karena kekuatannya yang tinggi, densitasnya yang rendah, dan kemampuannya menyebarkan energi melalui deformasi plastis. Kevlar dan UHMWPE, khususnya, mampu menahan gaya tarik sangat besar sebelum akhirnya mengalami kegagalan, sehingga material ini jauh lebih tangguh dibandingkan grafit [4]. Dengan kemampuan deformasi yang tinggi, serat fiber tidak hanya menahan penetrasi proyektil tetapi juga mengurangi cedera tumpul (*blunt trauma*) yang mungkin dialami pengguna. Berikut adalah **Tabel 1** perbandingan antara grafit dengan beberapa serat fiber.

Tabel 1. Perbandingan antara Grafit dengan Serat Fiber lainnya

Bahan serat	Densitas (g/cm ³)	Kekuatan tarik (Mpa)	Modulus elastisitas (Gpa)	Regangan putus (%)
Grafit (grafena)	2,27	130.000 (≈130 Gpa)	~1000*	0,5–1,8
Aramid	1,40	3000–3150	63–67	3,3–3,7
Kevlar	1,44	3000	60	2,5–3,7
Kenaf	1,45	215,4	53	1,6
Rami	1,50	560	24,5	2,5–3,8
Serat daun nanas (PALF)	0,8–1,6	400–627	1,44	14,5

Sumber: [3], [5], [7], [10]

Berdasarkan hasil perbandingan pada **Tabel 1**, terlihat adanya perbedaan yang sangat signifikan dalam kekuatan mekanik antara grafit (grafena) dan berbagai bahan serat (fiber) lainnya. Grafit (monolayer grafena) menunjukkan nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang sangat ekstrem dibandingkan material lain pada tabel. Dengan densitas sekitar 2,27 g/cm³, grafit memiliki kekuatan tarik hingga sekitar 130.000 MPa (≈130 GPa) dan modulus elastisitas mendekati 1000 GPa [3]. Nilai ini beberapa orde lebih tinggi dibandingkan aramid dan Kevlar yang selama ini menjadi standar material balistik. Tingginya kekuatan dan modulus grafit berasal dari ikatan kovalen karbon–karbon yang sangat kuat dalam struktur heksagonalnya, sehingga material ini mampu menahan tegangan yang sangat besar sebelum mengalami kegagalan. Namun demikian, regangan putus grafit relatif kecil, yaitu sekitar 0,5–1,8%, yang menunjukkan bahwa material ini bersifat sangat kaku dan cenderung getas [10]. Artinya, grafit mampu menahan tegangan yang sangat tinggi, tetapi hanya mengalami deformasi kecil sebelum fraktur terjadi. Dalam konteks balistik, hal tersebut menjelaskan mengapa grafit sangat unggul dalam menyerap energi secara elastik pada skala atomik, tetapi masih memerlukan rekayasa struktur atau kombinasi dengan material lain agar tidak gagal secara tiba-tiba pada skala makroskopik.

Serat aramid dan Kevlar berada pada tingkat performa yang lebih rendah dibandingkan grafit, tetapi tetap menunjukkan keseimbangan sifat mekanik yang sangat baik untuk aplikasi balistik. Aramid memiliki densitas sekitar 1,40 g/cm³ dengan kekuatan tarik 3000–3150 MPa dan modulus elastisitas 63–67 GPa, sedangkan Kevlar sebagai salah satu jenis aramid komersial memiliki densitas 1,44 g/cm³, kekuatan tarik sekitar 3000 MPa, dan modulus sekitar 60 GPa. Meskipun nilai kekuatan dan modulus ini jauh di bawah grafit, regangan putus aramid dan Kevlar berada pada kisaran 2,5–3,7%, yang lebih tinggi dibanding grafit [10]. Hal ini menunjukkan bahwa serat aramid dan Kevlar tidak hanya kuat, tetapi juga cukup ulet untuk mengalami deformasi sebelum putus. Kombinasi kekuatan tinggi, densitas rendah, dan regangan sedang inilah yang menjadikan Kevlar sangat efektif dalam rompi antipeluru, karena mampu menyebarkan dan menyerap energi tumbukan peluru melalui mekanisme deformasi tarik, fibrilasi, dan gesekan antar serat, bukan hanya menahan tegangan secara kaku [4].

Serat alam seperti kenaf, rami, dan serat daun nanas (PALF) menunjukkan sifat mekanik yang lebih rendah secara absolut dibandingkan aramid dan grafit, namun tetap menarik dari sudut pandang keberlanjutan dan penyerapan energi. Kenaf memiliki densitas sekitar 1,45 g/cm³ dengan kekuatan tarik 215,4 MPa dan modulus elastisitas 53 GPa. Nilai modulus yang relatif tinggi ini menunjukkan bahwa kenaf cukup kaku, tetapi regangan putusnya hanya sekitar 1,6%, yang menandakan sifat yang cenderung getas dibandingkan serat alam lainnya. Rami memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi, sekitar 560 MPa, dengan modulus elastisitas 24,5 GPa dan regangan putus 2,5–3,8% [10]. Kombinasi ini menunjukkan bahwa rami

lebih ulet dibanding kenaf dan mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum patah, sehingga lebih efektif dalam menyerap energi melalui mekanisme regangan dan kerusakan progresif.

Serat daun nanas (PALF) memiliki karakter yang paling berbeda di antara serat alam dalam tabel. Dengan densitas yang relatif rendah ($0,8-1,6 \text{ g/cm}^3$), kekuatan tarik $400-627 \text{ MPa}$, dan modulus elastisitas yang relatif kecil ($1,44 \text{ GPa}$), PALF menunjukkan regangan putus yang sangat tinggi, yaitu sekitar $14,5\%$ [10]. Nilai regangan ini jauh lebih besar dibandingkan semua material lain pada tabel, termasuk Kevlar dan aramid. Hal ini menunjukkan bahwa PALF bersifat sangat ulet dan mampu mengalami deformasi besar sebelum mengalami kegagalan. Dalam aplikasi balistik, sifat ini mengindikasikan bahwa PALF sangat efektif sebagai material penyerap energi melalui deformasi besar dan mekanisme *pull-out* serat, meskipun kemampuan menahan tegangan awalnya lebih rendah dibandingkan serat sintesis berperforma tinggi.

3.2 Mekanisme Penyerapan Energi Balistik

Pada kejadian balistik, proyektil membawa energi kinetik yang sangat besar dan dilepaskan dalam waktu yang sangat singkat saat terjadi tumbukan. Material pelindung tidak hanya berfungsi untuk menahan gaya mekanik, tetapi yang lebih penting adalah menyerap, menyebarkan, dan meredam energi tersebut agar kecepatan proyektil menurun secara signifikan atau berhenti sepenuhnya. Mekanisme penyerapan energi ini sangat bergantung pada sifat intrinsik material, seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, regangan putus, serta struktur mikro dan makroskopiknya [12]. Berdasarkan tabel perbandingan sifat mekanik, mekanisme penyerapan energi balistik dapat dijelaskan secara berurutan mulai dari grafit hingga serat-serat lainnya.

Pada grafit, khususnya dalam bentuk grafena atau struktur berlapis, mekanisme penyerapan energi balistik terjadi terutama pada skala atomik. Ketika proyektil menghantam grafena, energi kinetik awal diserap melalui peregangan ikatan kovalen karbon-karbon (C-C) yang sangat kuat dalam kisi heksagonal. Ikatan ini memiliki kekakuan yang sangat tinggi, yang tercermin dari modulus elastisitas grafit yang mendekati 1000 GPa [8]. Akibatnya, tegangan yang timbul dapat mencapai nilai sangat besar sebelum terjadi fraktur. Selain itu, grafit memiliki kecepatan rambat gelombang tarik yang sangat tinggi, sehingga energi benturan dapat disebarkan secara radial ke area yang luas dalam waktu yang sangat singkat. Mekanisme ini menyebabkan energi balistik tidak terfokus hanya pada titik tumbukan, melainkan terdistribusi ke seluruh lembaran grafitik. Namun, karena regangan putus grafit relatif rendah (sekitar $0,5-1,8\%$), kegagalan material terjadi secara tiba-tiba setelah batas regangan tercapai [10]. Dengan demikian, grafit sangat efisien dalam menyerap energi elastik, tetapi cenderung bersifat getas dan memerlukan rekayasa lanjutan, seperti struktur multilayer atau kombinasi dengan matriks polimer, agar tidak mengalami fraktur prematur pada skala makroskopik.

Berbeda dengan grafit, serat aramid dan Kevlar menyerap energi balistik melalui mekanisme yang dominan pada skala serat dan tekstil. Ketika proyektil mengenai lapisan aramid atau Kevlar, energi kinetik diserap melalui peregangan serat sepanjang arah tarik, pembentukan gelombang tegangan yang merambat sepanjang benang, serta interaksi antar benang dalam struktur kain. Modulus elastisitas aramid dan Kevlar yang berada pada kisaran $60-67 \text{ GPa}$ cukup tinggi untuk menyebarkan tegangan dengan cepat, sementara regangan putus yang relatif lebih besar (sekitar $2,5-3,7\%$) memungkinkan serat mengalami deformasi sebelum putus [10]. Selain itu, mekanisme seperti fibrilasi serat, gesekan antar benang, dan delaminasi antar lapisan kain berkontribusi signifikan terhadap penyerapan energi. Kombinasi mekanisme elastik dan inelastik ini membuat Kevlar sangat efektif dalam mengurangi energi sisa proyektil, sekaligus menurunkan deformasi belakang (*back-face deformation*) yang berbahaya bagi pengguna rompi antipeluru [4].

Pada serat kenaf, mekanisme penyerapan energi balistik mulai bergeser ke kombinasi antara kekakuan sedang dan deformasi terbatas. Kenaf memiliki modulus elastisitas yang cukup tinggi (sekitar 53 GPa), yang memungkinkan terjadinya penyebaran tegangan relatif cepat pada skala serat. Namun, kekuatan tarik yang lebih rendah (sekitar 215 MPa) dan regangan putus yang kecil (sekitar $1,6\%$) membuat serat ini lebih rentan mengalami fraktur ketika tegangan melebihi batasnya. Dalam komposit, energi balistik pada kenaf diserap melalui fraktur serat, retak matriks, serta delaminasi antar lapisan [17]. Mekanisme ini efektif untuk menyerap sebagian energi, tetapi kapasitas totalnya lebih rendah dibandingkan aramid. Oleh karena itu, kenaf lebih cocok digunakan sebagai lapisan pendukung atau lapisan belakang dalam sistem balistik berlapis, di mana perannya lebih pada membantu penyebaran energi dan meningkatkan ketebalan efektif panel.

Serat rami menunjukkan mekanisme penyerapan energi yang lebih seimbang dibandingkan kenaf. Dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi (sekitar 560 MPa) dan regangan putus hingga $3,8\%$, rami mampu menyerap energi tidak hanya melalui fraktur serat, tetapi juga melalui deformasi tarik yang lebih besar

sebelum kegagalan. Modulus elastisitas rami yang berada pada kisaran menengah (sekitar 24,5 GPa) membuatnya lebih lentur dibandingkan aramid dan kenaf, sehingga energi balistik dapat diredam melalui mekanisme deformasi progresif dan *fiber pull-out* [12]. Dalam sistem komposit, mekanisme ini membantu mengurangi konsentrasi tegangan lokal dan memperpanjang waktu interaksi antara proyektil dan material, yang berkontribusi pada penurunan energi sisa proyektil.

Serat daun nanas (PALF) menyerap energi balistik melalui mekanisme yang paling didominasi oleh deformasi besar dan keuletan tinggi. Regangan putus yang mencapai sekitar 14,5% menunjukkan bahwa PALF mampu mengalami pemanjangan yang sangat signifikan sebelum mengalami kegagalan. Meskipun modulus elastisitasnya relatif rendah (sekitar 1,44 GPa), sifat ulet ini memungkinkan PALF menyerap energi melalui deformasi plastis, *fiber pull-out*, serta gesekan antar serat dan matriks dalam komposit [9]. Pada kejadian balistik, PALF berperan sebagai material peredam yang efektif, memperpanjang durasi penyerapan energi dan mengurangi puncak tegangan yang diteruskan ke lapisan berikutnya. Namun, karena kekuatan tarik awalnya lebih rendah dibandingkan aramid dan grafit, PALF umumnya tidak digunakan sebagai lapisan utama penahan proyektil, melainkan sebagai lapisan belakang atau lapisan tambahan dalam sistem balistik hibrida.

3.3 Potensi dan Tantangan Pemanfaatan Grafit untuk Rompi Antipeluru

Grafit, khususnya dalam bentuk grafena maupun struktur berlapis, dipandang sebagai salah satu kandidat material paling menjanjikan untuk pengembangan rompi antipeluru generasi berikutnya. Hal ini terutama disebabkan oleh sifat mekanik intrinsiknya yang sangat unggul, seperti kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang jauh melampaui serat balistik konvensional. Dengan kemampuan menyerap energi elastik yang sangat besar per satuan massa, grafit berpotensi menghasilkan sistem pelindung balistik yang lebih tipis dan ringan dibandingkan rompi berbasis aramid atau Kevlar, tanpa mengurangi tingkat perlindungan. Keunggulan ini sangat relevan dalam konteks peningkatan mobilitas dan kenyamanan pengguna rompi antipeluru [8].

Selain kekuatan dan kekakuannya yang ekstrem, grafit juga memiliki kemampuan unik dalam menyebarkan gelombang tegangan dengan kecepatan yang sangat tinggi. Ketika proyektil menghantam struktur grafitik, energi kinetik awal dapat dengan cepat didistribusikan secara radial melalui jaringan ikatan karbon-karbon yang kaku [8]. Mekanisme ini membantu mengurangi konsentrasi tegangan lokal di sekitar titik tumbukan dan meningkatkan efisiensi penyerapan energi balistik. Dalam berbagai studi eksperimental dan simulasi, karakteristik ini dikaitkan dengan nilai batas balistik dan *strain energy density* grafit yang sangat tinggi dibandingkan serat fiber lainnya.

Potensi pemanfaatan grafit dalam rompi antipeluru semakin besar ketika dikombinasikan dengan pendekatan komposit dan struktur multilayer. Grafit dapat digunakan sebagai lapisan tipis berperforma tinggi, pelapis permukaan serat aramid, atau sebagai penguat nano dalam matriks polimer [15]. Dalam konfigurasi ini, grafit berfungsi meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas penyerapan energi sistem, sementara serat aramid atau serat alam menyediakan fleksibilitas dan ketangguhan makroskopik yang dibutuhkan untuk aplikasi rompi. Pendekatan hibrida semacam ini memungkinkan pemanfaatan keunggulan grafit tanpa harus mengandalkannya sebagai material utama tunggal.

Meskipun demikian, pemanfaatan grafit dalam rompi antipeluru masih menghadapi tantangan besar terkait sifat mekaniknya dalam kondisi nyata. Grafit, terutama grafena monolayer, memiliki regangan putus yang relatif rendah dan cenderung bersifat getas, khususnya ketika mengandung cacat mikrostruktur seperti batas butir atau retakan. Kegagalan yang terjadi secara tiba-tiba ini dapat membatasi ketahanan terhadap tumbukan berulang (*multi-hit*) dan menurunkan keandalan sistem balistik secara keseluruhan. Oleh karena itu, tanpa rekayasa struktur yang tepat, grafit murni sulit memenuhi kebutuhan ketangguhan dan keamanan jangka panjang pada rompi antipeluru.

Tantangan lain yang signifikan adalah aspek fabrikasi dan skalabilitas grafit. Produksi grafena berkualitas tinggi umumnya menghasilkan lembaran tipis dengan ukuran terbatas dan biaya yang relatif tinggi. Untuk aplikasi rompi antipeluru, dibutuhkan material dalam skala luas yang homogen, fleksibel, dan mudah diintegrasikan ke dalam sistem tekstil atau komposit [1]. Selain itu, proses integrasi grafit dengan matriks polimer atau serat lain sering menghadapi kendala pada ikatan antarmuka dan distribusi material yang tidak merata, yang dapat mengurangi efektivitas grafit dalam menyerap energi balistik.

Di samping aspek teknis, faktor ergonomi dan ekonomi juga menjadi tantangan penting dalam pemanfaatan grafit untuk rompi antipeluru. Penggunaan grafit dalam jumlah besar dapat mengurangi fleksibilitas rompi, sehingga memengaruhi kenyamanan dan mobilitas pengguna. Sementara itu, biaya produksi grafit yang masih tinggi dibandingkan serat aramid konvensional membuat penerapannya kurang

realistis untuk produksi massal saat ini [13]. Oleh karena itu, meskipun grafit menawarkan potensi yang sangat besar untuk meningkatkan performa balistik, pemanfaatannya saat ini lebih realistis sebagai penguat tambahan dalam komposit hibrida. Seiring berkembangnya teknologi produksi dan rekayasa material, grafit diharapkan dapat memainkan peran yang semakin signifikan dalam pengembangan rompi antipeluru di masa depan.

4. Kesimpulan dan Saran

Grafit memiliki potensi yang sangat besar untuk diaplikasikan dalam sistem rompi antipeluru karena sifat mekanik intrinsiknya yang unggul, terutama kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kapasitas penyerapan energi spesifik yang sangat tinggi. Keunggulan ini menjadikan grafit secara teoritis mampu menghasilkan sistem pelindung balistik yang lebih ringan dan tipis dibandingkan material serat fiber konvensional. Namun demikian, pemanfaatan grafit secara langsung sebagai material tunggal dalam rompi antipeluru masih dibatasi oleh sifat getas dan regangan putus yang relatif rendah, serta tantangan fabrikasi dan skalabilitas. Serat fiber seperti aramid dan Kevlar menunjukkan performa balistik yang lebih stabil dan andal secara praktis karena keseimbangan antara kekuatan dan keuletan, sementara serat alam seperti kenaf, rami, dan serat daun nanas memiliki potensi sebagai material pendukung yang ramah lingkungan dalam sistem balistik berlapis. Oleh karena itu, pendekatan yang paling optimal dan realistis untuk meningkatkan performa rompi antipeluru adalah melalui pengembangan komposit hibrida grafit–resin atau grafit–epoksi, yang mampu mengombinasikan kekakuan dan kekuatan tinggi grafit dengan sifat ulet dan kemampuan peredaman energi dari matriks polimer. Pendekatan ini memungkinkan pemanfaatan keunggulan grafit secara lebih efektif sekaligus mengatasi keterbatasan mekanik grafit dalam aplikasi balistik.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memfokuskan pengembangan komposit hibrida grafit–resin atau grafit–epoksi melalui optimasi fraksi grafit, metode dispersi, dan kualitas ikatan antarmuka guna meningkatkan ketangguhan dan ketahanan terhadap tumbukan berulang. Selain itu, diperlukan pengujian eksperimental yang lebih komprehensif, termasuk uji balistik sesuai standar NIJ, untuk memvalidasi performa material secara nyata. Kajian lanjutan juga perlu mempertimbangkan aspek ergonomi, fleksibilitas, dan biaya produksi agar komposit yang dikembangkan tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga layak diaplikasikan secara praktis pada rompi antipeluru generasi berikutnya.

5. Referensi

- [1] Ahmed, M. R., Maio, L., & Potluri, P. (2025). Graphene-enhanced epoxy composites: A comprehensive review of dispersion mechanisms, processing strategies, property optimization, characterization and sustainable innovations. *Progress in Aerospace Sciences*, 158, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2025.101142>
- [2] Aldo, J., Sunardi, Pinem, M. P., & Aldo, J. (2025). Pengaruh Fraksi Volume dan Arah Serat Terhadap Ketangguhan Impak Dan Kekuatan Bending Pada Material Komposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(2), 242–250. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v10i2.747>
- [3] Anton Paar. (2021). *Graphene Characterization*. Retrieved on 24 Desember 2025. www.anton-paar.com
- [4] Garjati, V. N., Rizkia, V., Anggraeni, N. A., & Muslimin. (2023). Studi Pengaruh Penambahan 5wt.% dan 10wt.% Serat Pelepah Salak pada Manufaktur Komposit Epoxy berpenguat Serat Kevlar dan Serat Karbon dengan Metode Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) untuk Aplikasi Rompi Tahan Peluru. *Journal of Applied Mechanical Technology*, 2(2), 1–11. <https://doi.org/10.31884/jamet.v2i2.32>
- [5] Gaur, P., Sharma, P., Gupta, K., Khan, T., & Aloufi, M. (2024). A Comprehensive Review of Graphene-Based Nanomaterials for Ballistic and Impact Resistance in Defence Applications. *Social Science Research Network*, 1–53. <https://ssrn.com/abstract=4681898>
- [6] Haziza, E. P., Aritonang, S., & Imastuti. (2024). Studi Komparasi Karakteristik Mekanik Serat Alam sebagai Bahan Anti Peluru: Jurnal Review. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 7(1), 168–175. <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i1.17326>
- [7] Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 321(5887), 382–385. <https://doi.org/10.1126/science.1156211>

- [8] Naveen, J., Jawaid, M., Goh, K. L., Reddy, D. M., Muthukumar, C., Loganathan, T. M., & Reshwanth, K. N. G. L. (2021). Advancement in graphene-based materials and their nacre inspired composites for armour applications, A review. *Nanomaterials*, *11*(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/nano11051239>
- [9] Neves, P. P., Costa, U. O., Bezerra, W. B. A., Figueiredo, A. B. H. da S., Monteiro, S. N., & Nascimento, L. F. C. (2022). Dynamic and Ballistic Performance of Uni- and Bidirectional Pineapple Leaf Fibers (PALF)-Reinforced Epoxy Composites Functionalized with Graphene Oxide. *Polymers*, *14*(16), 1. <https://doi.org/10.3390/polym14163249>
- [10] Nurazzi, N. Mohd, et al. "A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications." *Polymers* *13.13* (2021): 2170.
- [11] Nurrohmah, S. I., Rusiyanto, Widodo, R. D., & Sumbodo, W. (2020). Pengaruh Thermal Shock dan Komposisi Grafit, Kaolin (Clay) terhadap Struktur Makro dan Ketahanan Impact Kowi Berbahan Dasar Limbah Evaporation Boats. *Rekayasa Mesin*, *15*, 287–295.
- [12] Odesanya, K. O., Ahmad, R., Jawaid, M., Bingol, S., Adebayo, G. O., & Wong, Y. H. (2021). Natural Fibre-Reinforced Composite for Ballistic Applications: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, *29*(12), 3795–3812. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02169-4>
- [13] Singh, H., Budiarto, H. A., Singh, B., Kumar, K., Gupta, R., Bhowmik, A., & Santhosh, A. J. (2025). Graphene for next-generation technologies: Advances in properties, applications, and industrial integration. *Results in Engineering*, *27*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106865>
- [14] Solfiti, E., & Berto, F. (2020). Mechanical Properties of Flexible Graphite: Review. *Procedia Structural Integrity*, *25*, 420–429. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.047>
- [15] Vignesh, S., Surendran, R., Sekar, T., & Rajeswari, B. (2021). Ballistic impact analysis of graphene nanosheets reinforced kevlar-29. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 788–793. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.808>
- [16] Wen, B., Wang, X. X., Cao, W. Q., Shi, H. L., Lu, M. M., Wang, G., Jin, H. B., Wang, W. Z., Yuan, J., & Cao, M. S. (2014). Reduced graphene oxides: The thinnest and most lightweight materials with highly efficient microwave attenuation performances of the carbon world. *Nanoscale*, *6*(11), 5754–5761. <https://doi.org/10.1039/c3nr06717c>
- [17] Yahaya, R., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Leman, Z., & Zainudin, E. S. (2016). Investigating ballistic impact properties of woven kenaf-aramid hybrid composites. *Fibers and Polymers*, *17*(2), 275–281. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-5678-6>