

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Perkembangan Material Komposit pada Rompi Antipeluru: Tinjauan Serat Alam, Serat Sintetis, dan Nanomaterial

Development of Composite Materials for Ballistic Vest: A Review of Naturals Fibers,Synthetic Fibers, and Nanomaterials

Ravelina Medhy Khairani[1*], Sovian Aritonang[2], Hotma Renta Siringoringo[3], Radha Aura Putri Maretha[4],Aulia Putri Ariendi[5],Meutya Mahadewi[6]

*[*1,3,4,5,6]Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Indonesia*
[2]Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia

[1]ravelinamdhy21@gmail.com* , [2]sovian.aritonang@idu.ac.id , [3] hotmarentasiringoringo@gmail.com
[4]auraradha@gmail.com ,[5]auliaputriariendi754@gmail.com ,[6]meutyamahadewi27@gmail.com

Abstract

Ballistic vests must stop projectiles while remaining light and comfortable to wear, which makes material selection a central problem. This review compares synthetic fibers, mineral and carbon fibers, natural fibers, shear thickening fluids (STF), and nanomaterials used in ballistic vests. A narrative review was carried out on one main review article and the experimental and simulation studies cited in it. The method of each study is summarized, and 17 fibers are compared using specific strength and the Cunniff parameter c, calculated from reported properties. The ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) fiber Spectra 2000 ranks highest on both measures (3.44 GPa per g/cm³; c* of 836 m/s), and UHMWPE holds the three highest c* values. Para-aramid and S-glass fibers occupy the middle of the range, whereas raw natural fibers reach only 0.23 to 1.20 GPa per g/cm³ and need surface treatment. STF and nanomaterials such as nanoclay and graphene oxide improve their base materials, but the baselines are not the leading fibers, so the gap to UHMWPE is not shown to have closed. UHMWPE is the most justifiable starting point for lightweight vests, while natural fibers and nanomaterials still need tests with uniform methods.*

Keywords **:** *Ballistic Vest, UHMWPE, Natural Fiber, Nanomaterial, Cunniff Parameter*

Abstrak

Rompi antipeluru harus menghentikan proyektil sekaligus tetap ringan dan nyaman dipakai, sehingga pemilihan material menjadi persoalan utama. Artikel review ini membandingkan serat sintetis, serat mineral dan karbon, serat alam, cairan pengental geser (STF), dan nanomaterial pada rompi antipeluru. Metode yang digunakan adalah tinjauan naratif atas satu tinjauan utama beserta studi eksperimen dan simulasi yang dikutip di dalamnya. Metode tiap studi dirangkum, lalu 17 serat dibandingkan memakai kekuatan spesifik dan parameter Cunniff c* yang dihitung dari data sifat yang dilaporkan. Serat polietilena berat molekul sangat tinggi (UHMWPE) Spectra 2000 tertinggi pada kedua ukuran (3,44 GPa per g/cm³; c* 836 m/s), dan UHMWPE memegang tiga nilai c* teratas. Para-aramid dan serat kaca S berada di tengah, sedangkan serat alam mentah hanya mencapai 0,23 sampai 1,20 GPa per g/cm³ dan memerlukan perlakuan permukaan. STF dan nanomaterial seperti nanoclay dan graphene oxide menaikkan kinerja material dasarnya, tetapi pembandingnya bukan serat unggulan sehingga belum terbukti menutup selisih terhadap UHMWPE. UHMWPE menjadi pilihan awal yang paling beralasan untuk rompi ringan, sedangkan serat alam dan nanomaterial masih memerlukan pengujian dengan metode seragam.

Kata Kunci: Rompi Antipeluru, UHMWPE, Serat Alam, Nanomaterial, Parameter Cunniff

Penulis Korespondensi : Ravelina Medhy Khairani

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

I. PENDAHULUAN

Body armor dipakai untuk melindungi orang, terutama dalam operasi militer, kerusuhan, dan serangan teror. Perangkat modern mencakup rompi antipeluru, helm, pelindung kaki atau pangkal paha, dan plat tambahan, dan rompi menjadi bagian terpenting karena konflik dan kekerasan di dunia sedang meningkat (Karhankova et al., 2024). Perlindungan jenis ini punya sejarah panjang. Pada abad pertengahan, Jepang membuat pelindung lunak dari sutra, dan militer Amerika Serikat sempat mempertimbangkan rompi sutra pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20. Rompi itu hanya efektif terhadap proyektil berkecepatan rendah, sekitar 120 m/s, dan tidak melindungi dari amunisi baru yang melaju sekitar 180 m/s (Karhankova et al., 2024). Pada Perang Dunia II dikembangkan *flak jacket* untuk menahan serpihan dan pecahan peluru, bukan tembakan langsung senapan atau senapan mesin. Generasi pertamanya memakai pelat baja mangan, yang kemudian diganti nilon atau pelat fiberglass (Karhankova et al., 2024). Terobosan terjadi pada 1960-an ketika DuPont menemukan serat para-aramid Kevlar, yang kemudian dipakai pada *soft armor* (Karhankova et al., 2024). Kini rompi memakai para-aramid (Kevlar, Technora, Twaron), PBO (Zylon), UHMWPE (Dyneema, Spectra), dan komposit berbasis serat alam (Gambar 1) (Karhankova et al., 2024; Crouch, 2019).



Gambar 1. Perkembangan material rompi antipeluru dari sutra sampai serat berkinerja tinggi.

Secara umum body armor dibagi menjadi *hard armor* dan *soft armor* (Gambar 2). Hard armor melindungi pada level III dan IV menurut National Institute of Justice (NIJ), dan dibuat dari plat logam, keramik, atau komposit serat di antara lapisan kain. Rompi ini menahan proyektil berkecepatan tinggi dan dipakai terutama oleh personel militer pada operasi berisiko tinggi, tetapi berat dan kaku sehingga membatasi gerak pemakai (Karhankova et al., 2024; Mawkhlieng, Majumdar dan Laha, 2020). Soft armor tersusun dari banyak lapis kain berkinerja tinggi, lebih ringan dan lebih lentur, dengan level perlindungan lebih rendah, yaitu II-A, II, dan III-A, dan dipakai terutama oleh polisi, petugas keamanan, dan pasukan pengendali massa. Soft armor pun masih cukup berat untuk membatasi kelincahan pemakai (Karhankova et al., 2024).



Gambar 2. Klasifikasi body armor menjadi soft armor dan hard armor.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Batasan bobot dan kekakuan ini menimbulkan dua tantangan. Pertama, bobot rompi harus turun sambil efisiensi menahan tembakan berulang naik. Kedua, kelenturan tetap penting bagi gerak dan kenyamanan (Karhankova et al., 2024; Crouch, 2019). Karena pemakai rompi sering bergerak, peneliti mencari material dengan kekuatan setinggi mungkin pada massa serendah mungkin dan dengan kemampuan menyerap energi yang baik; STF diuji untuk meningkatkan serap energi. Rompi generasi baru juga mulai dilengkapi fitur yang memantau kondisi pemakai, seperti detak jantung dan suhu tubuh (Karhankova et al., 2024). Di sisi lain, serat sintetis unggulan seperti Kevlar dan Spectra mungkin tidak cukup memenuhi tuntutan yang makin tinggi terhadap daya tahan impak relatif terhadap bobot dan volume material. Serat alam yang dimodifikasi karenanya mendapat perhatian lembaga riset perlindungan balistik, dan nanomaterial dipelajari sebagai penguat tambahan (Wu, Sikdar dan Bhat, 2023; Karhankova et al., 2024).

Kinerja rompi dinilai dengan standar yang menetapkan proyektil dan kecepatan uji untuk tiap level. NIJ Standard 0101.06 membagi rompi menjadi lima level, dari II-A sampai IV, dan memberi satu batas yang sama untuk semua level: deformasi bagian belakang (*backface signature*, BFS) tidak boleh melebihi 44 mm agar proyektil yang tertahan tidak melukai pemakai (NIJ, 2008). Level II-A, II, dan III-A diuji dengan peluru pistol dan umumnya dicapai soft armor, sedangkan level III dan IV diuji dengan peluru senapan dan umumnya memerlukan hard armor (Tabel 1) (Karhankova et al., 2024; NIJ, 2008). Makin tinggi level, makin besar energi kinetik yang harus diserap rompi, sehingga makin banyak bobot yang diperlukan bila materialnya sama.

Tabel 1. Level perlindungan NIJ Standard 0101.06 dan proyektil ujinya (NIJ, 2008).

Level	Proyektil uji	Kecepatan (m/s)
II-A	9 mm FMJ RN, 8 g; .40 S&W FMJ, 11,7 g	373; 352
II	9 mm FMJ RN, 8 g; .357 Magnum JSP, 10,2 g	398; 436
III-A	.357 SIG FMJ FN, 8,1 g; .44 Magnum SJHP, 15,6 g	448; 436
III	7,62×51 mm NATO M80, 9,6 g	847
IV	.30-06 M2 armor-piercing, 10,8 g	878

Energi kinetik proyektil dinyatakan oleh Persamaan (1), dengan m massa proyektil (kg) dan v kecepatannya (m/s). Karena v dikuadratkan, kenaikan kecepatan dari peluru pistol (sekitar 400 m/s) ke peluru senapan (sekitar 850 m/s) menaikkan energi per satuan massa proyektil lebih dari empat kali lipat. Rompi menyerap energi ini lewat peregangan, gesekan, dan putusnya serat, sambil menjaga BFS di bawah batas standar (NIJ, 2008). Kecepatan V50, yaitu kecepatan ketika peluang proyektil menembus adalah 50%, dipakai sebagai ukuran kinerja: makin tinggi V50 pada massa rompi yang sama, makin baik materialnya (NIJ, 2008).

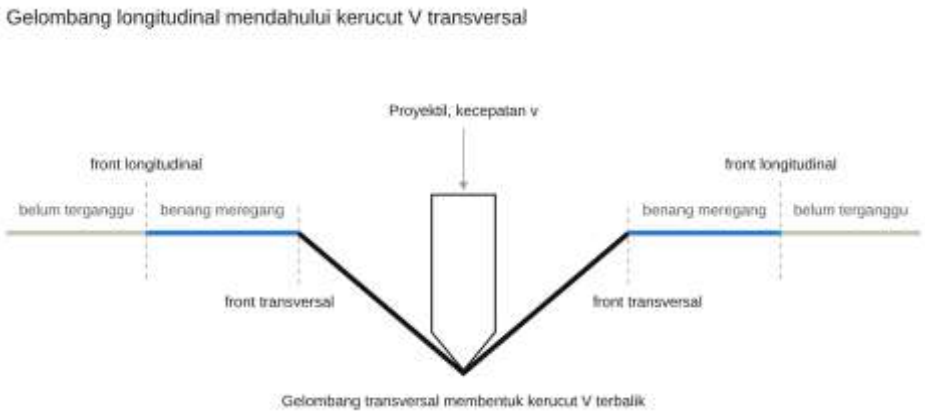
$$KE = \tfrac{1}{2}\, m\, v^2 \tag{1}$$

Saat proyektil mengenai benang, dua gelombang menjalar dari titik impak. Gelombang longitudinal bergerak sangat cepat sepanjang benang dengan kecepatan pada Persamaan (2), dengan E modulus Young (Pa) dan ρ massa jenis (kg/m³). Gelombang transversal jauh lebih lambat dan membentuk kerucut V yang terdorong ke arah proyektil (Gambar 3) (Smith, McCrackin dan Schiefer, 1958; Hudspeth et al., 2017). Makin cepat gelombang longitudinal, makin banyak serat di sekitar titik impak yang ikut menahan beban sebelum benang putus. Itulah sebabnya serat dengan modulus tinggi dan massa jenis rendah menyebarkan energi lebih efisien.

$$c_L = \sqrt{(E/\rho)} \tag{2}$$

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 3. Skema gelombang pada benang yang ditumbuk proyektil (tidak berskala). Garis biru menandai bagian benang yang sudah meregang oleh gelombang longitudinal.

Dua ukuran dipakai untuk membandingkan serat. Pertama, kekuatan spesifik σ/ρ (GPa per g/cm³), yaitu kekuatan putus per massa jenis, yang menunjukkan kekuatan per satuan bobot. Kedua, parameter Cunniff (Cunniff, 1999) pada Persamaan (3), dengan σ kekuatan putus (Pa), ε regangan putus (tanpa satuan), E modulus Young (Pa), dan ρ massa jenis (kg/m³).

$$c^* = [\,(\sigma\varepsilon / 2\rho) \cdot \sqrt{(E/\rho)}\,]^{1/3} \quad (3)$$

Suku σε/2ρ adalah energi regangan yang dapat diserap per satuan massa, dan √(E/ρ) adalah kecepatan gelombang longitudinal. Hasilnya berupa kecepatan (m/s); makin besar c*, makin baik serat sebagai penyerap energi balistik. Perlu diingat bahwa c* hanya menggambarkan serat tunggal dan tidak memperhitungkan konstruksi kain, gesekan antar benang, atau matriks (Hudspeth et al., 2017).

Kinerja rompi juga bergantung pada sifat benang, konstruksi kain, jumlah lapis, dan jenis lapis dalam struktur rompi (Karhankova et al., 2024; Mawkhlieng, Majumdar dan Laha, 2020). Pada tingkat sistem, antarmuka di antara puluhan sampai ratusan lapisan ikut menentukan kinerja, sehingga optimasi satu material saja tidak cukup (Crouch, 2021). Karena itu, nilai c* dan kekuatan spesifik dipakai di sini sebagai titik awal perbandingan, bukan peringkat kinerja rompi utuh.

Dari dasar di atas disusun empat proposisi yang diperiksa pada bagian Hasil dan Pembahasan:

P1: UHMWPE memiliki σ/ρ dan c* tertinggi di antara serat sintetis.

P2: serat alam mentah lebih rendah pada sifat spesifik dan memerlukan perlakuan permukaan.

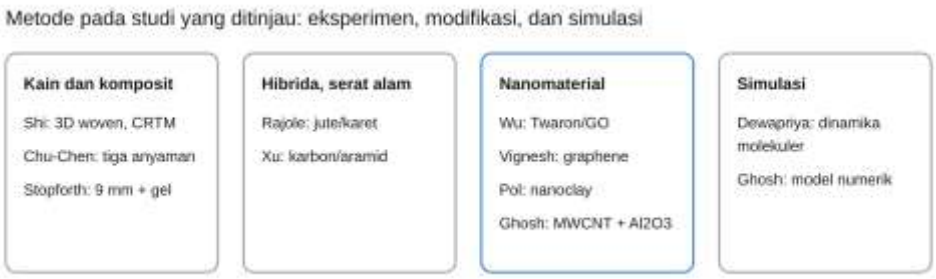
P3: STF atau nanofiller menaikkan serap energi atau batas balistik.

P4: perbandingan antar studi dibatasi oleh perbedaan metode uji

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

II. METODE



Gambar 4. Pengelompokan metode pada studi yang ditinjau.

Shi dkk. (2023) membuat komposit 3D woven para-aramid/poliuretan dengan pola ikat heksagonal pada tiga fraksi volume serat, memakai *compression resin transfer molding*, lalu menguji impak balistiknya dan mengukur luas kerusakan serat dan resin pada permukaan impak terhadap luas proyektil. Chu dan Chen (2010) membandingkan kain Kevlar dengan tiga konstruksi anyaman (*plain*, *twill*, dan *basket*) pada ukuran energi serap, terutama pada impak kecepatan rendah, dan menguji apakah Kevlar yang dipakai mampu menahan proyektil 9 mm Parabellum. Stopforth dan Adali (2019) menembakkan proyektil 9 mm ke Kevlar dengan berat dan jumlah lapis berbeda, memakai *ballistic gel* di belakang kain untuk menentukan jumlah lapis yang diperlukan agar proyektil tertahan.

Rajole dkk. (2020) membuat sandwich goni (jute)/karet dan kaca/epoksi, lalu menguji penyerapan energinya pada impak balistik tegak lurus permukaan. Xu dkk. (2023) menerapkan hibridisasi serat karbon dan aramid pada komposit, lalu membandingkan perilaku impak balistiknya dengan komposit nonhibrida.

Wu dkk. (2023) melaporkan panel Twaron yang dimodifikasi graphene oxide melalui penyaringan dua kali, dibandingkan dengan kain tanpa modifikasi pada penyerapan energi, serta kekuatan geser antarmuka sebelum dan sesudah pencangkokan graphene oxide. Vignesh dkk. (2021) menyisipkan sepuluh lapis nanosheet graphene di antara lapisan Kevlar-29 dan menganalisis dampak balistiknya. Pol dan Liaghat (2016) membandingkan komposit serat kaca/epoksi dengan dan tanpa nanoclay pada batas balistik dan luas kerusakan. Ghosh dan Ramajeyathilagam (2023) menguji laminat CFRP yang mengandung nanofiller hibrida MWCNT-COOH dan Al_2O_3 terhadap tumbukan proyektil, dengan penyelidikan eksperimen dan numerik.

Dewapriya dan Meguid (2019) memakai simulasi dinamika molekuler pada komposit multilapis graphene/polietilena untuk menghitung ketahanan balistiknya sebagai fungsi jumlah lapis graphene. Hasilnya berupa angka simulasi, bukan pengujian fisik, sehingga tidak boleh disetarakan langsung dengan hasil eksperimen.

Tabel 2. Ringkasan metode pada studi yang ditinjau.

Studi	Material	Metode	Ukuran hasil
Shi dkk. (2023)	Aramid/poliuretan 3D woven	Compression RTM, uji impak balistik	Luas kerusakan
Chu dan Chen (2010)	Kevlar, tiga anyaman	Uji impak, uji tembak 9 mm	Energi serap
Stopforth dan Adali (2019)	Kevlar berlapis	Uji tembak 9 mm, ballistic gel	Jumlah lapis penahan
Rajole dkk. (2020)	Goni/karet, kaca/epoksi	Uji impak balistik	Energi serap
Xu dkk. (2023)	Karbon/aramid hibrida	Uji impak balistik	Perilaku impak
Wu dkk. (2023)	Twaron/graphene oxide	Panel tersaring, uji energi serap	Energi serap, kekuatan geser antarmuka
Vignesh dkk. (2021)	Kevlar-29/graphene	Analisis impak balistik	Ketahanan balistik
Pol dan Liaghat (2016)	Kaca/epoksi/nanoclay	Uji impak kecepatan tinggi	Batas balistik, luas kerusakan

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Studi	Material	Metode	Ukuran hasil
Ghosh dan Ramajeyathilagam (2023)	CFRP/MWCNT-COOH/Al_2O_3	Eksperimen dan numerik	Respons impak proyektil
Dewapriya dan Meguid (2019)	Graphene/polietilena	Dinamika molekuler	Ketahanan balistik

E. Analisis pada Artikel Ini

Dari tabel sifat serat pada tinjauan sumber (Karhankova et al., 2024) (Tabel 3 dan 4 di bawah) diambil kekuatan putus, modulus, regangan putus, dan massa jenis tiap serat, lalu dihitung kekuatan spesifik dan parameter Cunniff c* dengan Persamaan (3). Untuk serat yang datanya berupa rentang (nilon 6, karbon standar), dipakai nilai tengah rentang. Serat keramik alumina dan silikon karbida dikeluarkan dari hitungan karena massa jenis pada tabel sumber (250 dan 280 g/cm³) jelas janggal. Hasil studi pada subbab A sampai D dicatat apa adanya dan tidak diperingkat, karena proyektil, kecepatan, dan areal densitas berbeda antar studi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Tabel 3. Sifat serat sintetis dari Karhankova et al. (2024), dengan kekuatan spesifik (σ/ρ) dan parameter Cunniff (c*) hasil hitung.

Serat	Kelompok	ρ (g/cm³)	σ (GPa)	E (GPa)	ε (%)	σ/ρ (GPa per g/cm³)	c* (m/s)
Nilon 6	Nilon	1,14	0,5	3	18–26	0,44	428
Technora	Para-aramid	1,39	3,00	70	4,4	2,16	696
Twaron	Para-aramid	1,45	3,10	121	2,0	2,14	580
Kevlar 29	Para-aramid	1,44	2,97	70	4,2	2,06	671
Kevlar 129	Para-aramid	1,44	3,39	96	3,5	2,35	695
Kevlar 49	Para-aramid	1,44	2,97	113	2,6	2,06	619
Kevlar KM2	Para-aramid	1,44	3,30	70	4,0	2,29	684
Spectra 900	UHMWPE	0,97	2,40	73	2,8	2,47	670
Spectra 1000	UHMWPE	0,97	2,83	103	2,8	2,92	749
Spectra 2000	UHMWPE	0,97	3,34	124	3,0	3,44	836
Dyneema	UHMWPE	0,97	2,60	87	3,5	2,68	763
Vectran	Polimer kristal cair	1,47	3,20	91	3,0	2,18	636

Tabel 3 memuat sifat serat sintetis dari tinjauan sumber bersama kekuatan spesifik dan c* hasil hitung. Tiga pola terlihat. Pertama, kelas dalam satu keluarga bisa berbeda jauh: kekuatan spesifik Spectra naik dari 2,47 (Spectra 900) ke 2,92 (Spectra 1000) dan 3,44 GPa per g/cm³ (Spectra 2000), dan c*-nya dari 670 ke 836 m/s. Kedua, modulus tinggi saja tidak menjamin c* tinggi. Twaron memiliki modulus 121 GPa, tertinggi di antara para-aramid pada tabel, tetapi regangan putusnya hanya 2%, sehingga c*-nya 580 m/s, terendah di antara para-aramid. Kevlar KM2 dan Kevlar 129 dengan modulus lebih rendah (70 dan 96 GPa) tetapi regangan putus lebih besar (4% dan 3,5%) mencapai 684 dan 695 m/s. Ketiga, nilon 6 jauh tertinggal: kekuatannya hanya 0,5 GPa, sehingga kekuatan spesifiknya 0,44 GPa per g/cm³.

Perlu dicatat bahwa Dyneema (2,68) berada di bawah Spectra 2000 dan Spectra 1000 padahal sama-sama UHMWPE. Selisih ini lebih mungkin mencerminkan perbedaan tingkat produk dan data sumber daripada perbedaan material, sehingga perbandingan antar nama dagang sebaiknya memakai lembar data produsen.

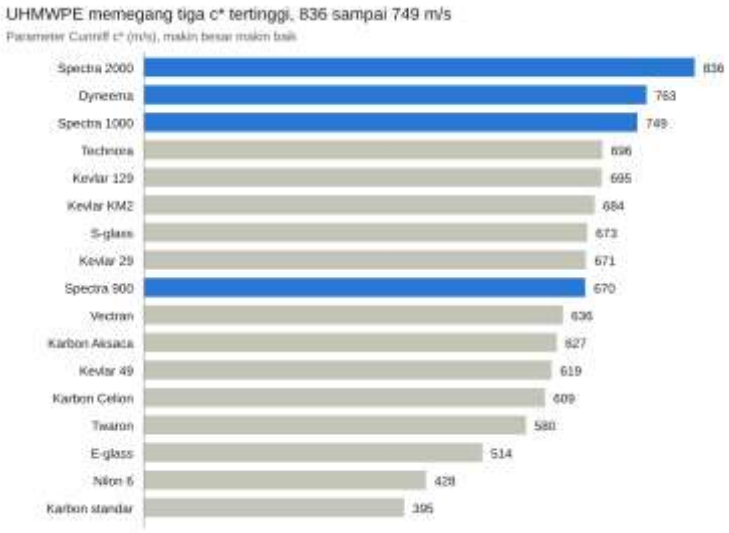
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 4. Sifat serat kaca, keramik, dan karbon dari Karhankova et al. (2024), dengan σ/ρ dan c* hasil hitung.

Serat	ρ (g/cm³)	σ (GPa)	E (GPa)	ε (%)	σ/ρ (GPa per g/cm³)	c* (m/s)
S-glass	2,48	4,40	90	5,7	1,77	673
E-glass	2,63	3,50	68,5	4,0	1,33	514
Alumina	250 (janggal)	1,72	152	2,0	tidak dihitung	tidak dihitung
Silikon karbida	280 (janggal)	4,00	420	0,6	tidak dihitung	tidak dihitung
Karbon standar	1,75–2,0	3,65	33,5	1,5	1,95	395
Karbon Celion	1,80	4,00	230	1,8	2,22	609
Karbon Aksaca	1,78	4,20	240	1,8	2,36	627

Tabel 4 memuat sifat serat ini. Serat kaca S (c* 673 m/s) setara Kevlar 29 (671 m/s), sedangkan serat kaca E hanya 514 m/s karena kekuatan dan regangan putusnya lebih rendah. Serat karbon standar paling lemah di kelompoknya (395 m/s) karena modulusnya hanya 33,5 GPa dan regangan putusnya 1,5%, sedangkan karbon bermodulus tinggi (Celion 609 m/s, Aksaca 627 m/s) berada di kisaran para-aramid. Alumina dan silikon karbida tidak dihitung karena massa jenis pada tabel sumber (250 dan 280 g/cm³) janggal.



Gambar 5. Parameter Cunniff c* untuk 17 serat sintetis, kaca, dan karbon (dihitung dari Tabel 3 dan 4; ε nilon 6 dan ρ karbon standar memakai nilai tengah rentang).

Gambar 5 mengurutkan 17 serat menurut c*. UHMWPE memegang tiga nilai tertinggi (Spectra 2000 836, Dyneema 763, dan Spectra 1000 749 m/s), disusul para-aramid Technora (696) dan Kevlar 129 (695). Serat kaca S (673) berada di tengah, dan Twaron, karbon standar, serta nilon 6 berada di ujung bawah. Selisih antara puncak dan kelompok tengah cukup besar: Spectra 2000 unggul 141 m/s atas Kevlar 129.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 6. Hubungan kekuatan spesifik dan parameter Cunniff (UHMWPE berwarna biru).

Gambar 6 memperlihatkan kaitan antara dua ukuran. Secara umum serat dengan kekuatan spesifik lebih tinggi juga memiliki c* lebih tinggi, tetapi hubungannya tidak mutlak. Karbon standar bermassa jenis rendah dan kekuatan cukup tinggi (1,95 GPa per g/cm³), tetapi c*-nya hanya 395 m/s karena modulusnya rendah dan regangan putusnya kecil. Twaron berada pada kekuatan spesifik yang sama dengan para-aramid lain (2,14) tetapi c*-nya lebih rendah karena regangan putusnya hanya 2%. Sebaliknya serat kaca S, dengan kekuatan spesifik 1,77, mencapai c* 673 m/s karena regangan putusnya 5,7%. Artinya ukuran tunggal dapat menyesatkan, dan kedua ukuran perlu dibaca bersama.

Tabel 5. Ringkasan posisi kelompok material
(kelebihan dan kelemahan disarikan dari Karhankova et al., 2024).

Kelompok	σ/ρ (GPa per g/cm³)	c* (m/s)	Kelebihan utama	Kelemahan utama
UHMWPE	2,47–3,44	670–836	Paling ringan dan c* tertinggi	Titik leleh rendah, merayap, kain tenun bergesekan rendah
Para-aramid	2,06–2,35	580–696	Mudah ditenun, tahan panas dan kimia	Iritasi kulit, sulit terurai
Polimer kristal cair (Vectran)	2,18	636	Kekuatan tinggi, dapat dilebur dan dipintal	Data terbatas pada satu serat
Kaca	1,33–1,77	514–673	Murah, tersedia luas	Peka kelembapan, getas
Karbon	1,95–2,36	395–627	Kuat dan tahan lama	Mahal, getas
Nilon	0,44	428	Murah	Kekuatan rendah
Serat alam mentah (sisal, flax, ramie)	0,23–1,20	tidak dihitung	Murah, dapat terurai	Menyerap air, kekuatan rendah

Tabel 5 merangkum posisi tiap kelompok material. Serat alam mentah tidak masuk ke dalam hitungan c* karena tabel sumber tidak memuat data yang lengkap untuk semuanya, tetapi kekuatan spesifiknya yang hanya 0,23 sampai 1,20 GPa per g/cm³ sudah menunjukkan jarak yang jauh dari serat sintetis.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 6. Penilaian proposisi P1 sampai P4.

Proposisi	Penilaian	Dasar
P1: UHMWPE tertinggi pada σ/ρ dan c*	Didukung, dengan catatan	Spectra 2000 tertinggi pada keduanya; UHMWPE memegang tiga c* teratas; nilai Dyneema lebih rendah dan bergantung pada data sumber
P2: serat alam mentah lebih rendah, perlu perlakuan	Didukung sebagian	0,23–1,20 GPa per g/cm³; perlakuan permukaan memperbaiki ikatan; nettle dan sutra laba-laba perlu verifikasi
P3: STF atau nanofiller menaikkan kinerja	Didukung	Nanoclay 42%, graphene oxide 50%, STF menaikkan serap energi; sebagian hasil dari simulasi
P4: perbandingan dibatasi metode uji	Didukung	Proyektil, kecepatan, dan areal densitas berbeda antar studi; hanya sedikit hasil punya angka dengan pembanding jelas

2. Pembahasan

Rompi ringan dibuat terutama dari Kevlar, Twaron, UHMWPE, atau nilon karena serat-serat ini memiliki modulus elastis dan kekuatan impak tinggi (Karhankova et al., 2024). Keunggulan serat sintetis dibanding serat alam adalah ketahanannya terhadap air, noda, panas, dan kerusakan kimia, serta tidak diurai bakteri dan jamur. Kelemahannya sama pentingnya: serat ini sulit terurai sehingga menjadi beban lingkungan, dapat mengiritasi atau memicu alergi pada kulit, dan sebagian, seperti poliester dan nilon, kurang baik menyerap keringat sehingga sering dipadukan dengan serat alam (Karhankova et al., 2024). Sifat serat sintetis terbentuk pada proses pemintalan: serat ditarik beberapa kali panjang awalnya setelah ekstrusi agar molekulnya searah, dan metode yang umum adalah pemintalan lebur, kering, dan basah (Karhankova et al., 2024).

Tiga kelompok serat polimer berkinerja tinggi mendominasi. Para-aramid (Kevlar, Twaron, Technora) ringan, kuat, bermodulus tinggi, tahan aus, bahan kimia, dan panas, serta mudah ditenun pada alat tenun tekstil, yang membedakannya dari keramik, karbon, dan kaca (Karhankova et al., 2024). UHMWPE (Spectra, Dyneema) yang dibuat dengan teknologi *gel-spun* lebih ringan dari air dan dilaporkan sepuluh kali lebih kuat dari baja, tetapi titik lelehnya rendah dan cenderung merayap (*creep*) di bawah beban tinggi. Kain tenun UHMWPE juga berkinerja balistik lebih rendah daripada komposit karena koefisien geseknya rendah (Karhankova et al., 2024). Serat polimer kristal cair (Vectran) dibuat dengan melebur dan memintal polimer kristal pada suhu tinggi (Karhankova et al., 2024).

Material mineral mencakup keramik dan serat kaca. Keramik dibagi menjadi keramik oksida (alumina dengan kadar Al_2O_3 beragam) dan nonoksida (nitrida, karbida, borida, atau kombinasinya). Alumina paling banyak dipakai karena murah dan mudah diproduksi, sedangkan SiC, B_4C, silikon nitrida, dan TiB_2 lebih mahal. Keramik ringan dan dapat memberi perlindungan yang sebanding dengan baja keras, dengan kekuatan dan modulus tinggi, tetapi getas dan peka terhadap retak akibat perubahan suhu cepat, sehingga banyak dipakai pada hard armor. Biayanya tinggi dibanding material yang kinerjanya setara atau lebih baik tetapi lebih murah, lebih ringan, lebih lentur, dan mampu menyerap keringat (Karhankova et al., 2024).

Serat kaca punya rasio kekuatan terhadap berat yang menonjol, lentur, tahan impak, dan murah, tetapi peka terhadap kelembapan dan zat kimia tertentu, lebih getas, dan kekuatannya terbatas dibanding aramid atau UHMWPE. Serat karbon memberi perlindungan baik pada bobot ringan dan sangat tahan lama, tetapi mahal dan, seperti kaca, getas terhadap impak berkecepatan tinggi serta peka terhadap bahan kimia tertentu (Karhankova et al., 2024).

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Serat alam menjadi alternatif yang ramah lingkungan dan hemat biaya. Sumbernya beragam: tumbuhan (batang daun seperti rami dan abaka, buah seperti kapas dan sabut kelapa, serat kulit batang seperti flax, rami, kenaf, dan goni, rumput, jerami, atau pulp kayu) dan hewan (bulu, rambut, wol) (Karhankova et al., 2024). Yang kini dipakai pada aplikasi balistik terutama sisal, curaua, mallow, sabut kelapa, ramie, goni, bambu raksasa, wol, dan ampas tebu (Karhankova et al., 2024). Keunggulannya meliputi biaya rendah, bobot ringan, bahaya kesehatan minim saat diproses, dapat terurai, kekuatan dan modulus spesifik yang cukup baik, serta sifat isolasi panas dan akustik (Karhankova et al., 2024; Nurazzi et al., 2021).

Kelemahan utamanya muncul pada keadaan mentah: serat menyerap air dan uap air dalam jumlah besar, serta dapat mengandung sel mati, lilin, dan minyak. Penyerapan air menurunkan sifat mekanik, sehingga permukaan serat perlu dimodifikasi dengan zat penggandeng (*coupling agent*), perlakuan kimia, perlakuan enzim, atau perlakuan korona dan plasma. Modifikasi ini memperbaiki ikatan antara matriks polimer dan serat sehingga kekuatan komposit naik (Karhankova et al., 2024; Odesanya et al., 2021).

Dari data sifat, sisal, flax, dan ramie mentah hanya mencapai kekuatan spesifik 0,23 sampai 1,20 GPa per g/cm³, jauh di bawah serat berkinerja tinggi pada Tabel 3 (selain nilon), yang berkisar 2,06 sampai 3,44 (Karhankova et al., 2024). Dua pengecualian tampak setara pada tabel sifat: sutra laba-laba (1,54) dan nettle (2,21). Namun sutra laba-laba berasal dari hewan dan belum tersedia dalam jumlah industri, sedangkan nilai nettle bergantung pada massa jenis 0,72 g/cm³ yang meragukan, sehingga keduanya belum bisa dijadikan bukti. Pada tingkat komposit, Rajole dkk. (2020) melaporkan sandwich goni/karet dan kaca/epoksi sebagai pelindung berbiaya rendah berdasarkan uji penyerapan energi, tetapi tidak ada angka perlindungan yang sebanding langsung dengan serat sintetis di sumber yang dikaji.

Komposit terdiri dari material dengan sifat kimia atau fisik berbeda yang dipilih sesuai kebutuhan, dan dibagi menjadi komposit logam, keramik, polimer, komposit serat alam, atau kombinasinya. Komposit polimer diminati karena ringan, kuat, tahan kimia dan korosi, serta bebas dirancang, sedangkan komposit aramid, karbon, dan kaca banyak dipakai pada rompi karena bobot rendah, ketangguhan, dan modulus tarik tinggi (Karhankova et al., 2024). Komposit serat alam umumnya dibuat dengan metode manufaktur termoplastik dan komposit polimer berpenguat serat, yaitu *compression molding*, *injection molding*, ekstrusi, *resin transfer molding*, infus vakum, *hand lay-up*, dan *filament winding*. Teknologi manufaktur dapat mengubah ketahanan beban mekanik komposit secara berarti, dan pelapisan dapat menaikkan ketahanan impak karena menyerap energi tinggi pada lapisan yang sangat tipis (Karhankova et al., 2024).

Hasil studi eksperimen pada bagian Metode menunjukkan bahwa konstruksi sama pentingnya dengan serat. Pada komposit aramid/poliuretan 3D woven, luas kerusakan serat dan resin pada permukaan impak sekitar 1,5 sampai 3 kali luas proyektil, dan studi itu menyimpulkan komposit ini layak untuk aplikasi balistik (Shi et al., 2023). Pada kain Kevlar, anyaman *plain* menyerap energi paling besar dibanding *twill* dan *basket*, terutama pada impak kecepatan rendah, tetapi Kevlar yang diuji tidak cukup kuat menahan proyektil 9 mm Parabellum (Chu dan Chen, 2010). Stopforth dan Adali (2019) menentukan berat dan jumlah lapis Kevlar serta *ballistic gel* yang diperlukan untuk menahan proyektil 9 mm. Hibridisasi karbon/aramid memberi kekuatan mekanik lebih baik daripada komposit nonhibrida (Xu et al., 2023).

STF adalah fluida atau gel yang tersusun dari partikel kecil berkonsentrasi tinggi, seperti silika atau kalsium karbonat, yang terdispersi dalam polimer cair higroskopis seperti polietilen glikol atau etanol. STF tidak beracun dan stabil terhadap panas, dan viskositasnya berubah cepat terhadap laju atau tegangan geser. Pemberian STF pada serat seperti Kevlar atau UHMWPE menaikkan kemampuan menyerap energi dibanding serat tanpa STF; gesekan antar benang yang terbentuk setelah impregnasi membatasi tegangan pada benang saat impak. Penambahan sedikit silikon karbida sebagai fase terdispersi pada STF juga menaikkan ketahanan tusuk kain aramid berimpregnasi STF (Karhankova et al., 2024). Gürgen dkk. (2017) menegaskan bahwa manfaat STF pada kain terutama berasal dari naiknya gesekan antar benang. Bahan lain yang dijajaki untuk

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

menaikkan kinerja kain tenun adalah lateks alam, grafit oksida, dan paduan memori bentuk (Karhankova et al., 2024).

Nanomaterial jarang dipakai sebagai serat penyusun rompi, tetapi dapat digabung dengan komposit menjadi nanokomposit yang dipelajari sebagai material tahan peluru (Wu, Sikdar dan Bhat, 2023; Karhankova et al., 2024). Ukuran satuannya sekitar 1 sampai 100 nm, dan dikelompokkan menurut dimensi: 0D seperti fullerene, 1D seperti *carbon nanotube* (CNT), 2D seperti *graphene nanoplatelet*, dan 3D seperti nanografit (Karhankova et al., 2024). CNT dilaporkan memiliki kekuatan tarik hingga 200 GPa dan modulus di atas 1 TPa, sedangkan graphene, satu lapis atom karbon setebal sekitar 0,335 nm, memiliki kekuatan tarik 130 GPa dan modulus 1 TPa (Karhankova et al., 2024). Sifat-sifat inilah yang membuat keduanya menarik sebagai penguat nanokomposit balistik. Nanoclay, lapisan silikat mineral setebal sekitar 1 nm dengan rasio aspek tinggi, murah dan sering ditanam ke komposit polimer berpenguat serat (Karhankova et al., 2024). Tungsten disulfida dan molibdenum disulfida, yang berlapis 2D, memiliki kestabilan kimia, gesekan sangat rendah, dan kemampuan meredam kejut yang baik, sehingga dipelajari sebagai pengisi pelindung balistik (Karhankova et al., 2024).

Hasil studi bervariasi menurut material dan metode. Nanofiller hibrida MWCNT-COOH dan Al_2O_3 pada laminat CFRP menaikkan ketahanan impak (Ghosh dan Ramajeyathilagam, 2023). Penyisipan sepuluh lapis nanosheet graphene di antara lapisan Kevlar-29 dilaporkan menaikkan ketahanan balistik secara signifikan (Vignesh et al., 2021). Panel Twaron/graphene oxide menyerap energi 50% lebih banyak daripada kain tanpa modifikasi, dan pencangkokan graphene oxide menaikkan kekuatan geser antarmuka sebesar 210% (Wu, Sikdar dan Bhat, 2023). Komposit kaca/epoksi/nanoclay mencapai batas balistik 42% lebih tinggi daripada komposit tanpa nanoclay dengan luas kerusakan lebih kecil (Pol dan Liaghat, 2016). Hasil terbesar datang dari simulasi: ketahanan impak polietilena yang dilapisi satu membran graphene naik lebih dari delapan kali, dan nanokomposit graphene/polietilena berlapis jamak berpotensi melindungi lebih baik terhadap impak hipervelositas (Dewapriya dan Meguid, 2019). Nanomaterial juga dipakai pada komposit kaca-poliester: modifikasi dengan nanofiber alumina yang difungsionalisasi silan dilaporkan menaikkan batas balistik (Karhankova et al., 2024).

IV. KESIMPULAN

Di antara data yang dikaji, UHMWPE adalah serat paling unggul untuk rompi antipeluru ringan. Spectra 2000 memiliki kekuatan spesifik 3,44 GPa per g/cm³ dan c* 836 m/s, keduanya tertinggi di antara 17 serat, dan UHMWPE memegang tiga c* teratas berkat massa jenis rendah dan gelombang longitudinal yang cepat. Para-aramid dan serat kaca S berada di tengah, dengan c* 580 sampai 696 m/s dan 673 m/s. Modulus tinggi saja tidak menjamin c* tinggi: Twaron dan karbon standar tertinggal karena regangan putusnya kecil. Serat alam mentah baru mencapai 0,23 sampai 1,20 GPa per g/cm³ dan belum memiliki data perlindungan yang sebanding langsung dengan serat sintetis. Nanoclay, graphene oxide, dan STF menaikkan kinerja material dasarnya, tetapi pembandingnya bukan serat unggulan, sehingga belum terbukti menutup selisih terhadap UHMWPE. Perbandingan antar studi masih terbatas oleh perbedaan metode uji dan sebagian data sumber yang janggal. Artikel ini karenanya memetakan posisi tiap kelompok material pada satu kerangka perbandingan, bukan menetapkan peringkat kinerja rompi utuh.

DAFTAR PUSTAKA

Chu, C.-K. and Chen, Y.-L. (2010) 'Ballistic-proof effects of various woven constructions', *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 83, pp. 63–67.

Crouch, I. G. (2019) 'Body armour – New materials, new systems', *Defence Technology*, 15(3), pp. 241–253. doi: 10.1016/j.dt.2019.02.002.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Crouch, I. G. (2021) 'Critical interfaces in body armour systems', *Defence Technology*, 17(6), pp. 1887–1894. doi: 10.1016/j.dt.2020.11.006.

Cunniff, P. (1999) 'Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems', in *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*. San Antonio, TX, USA, vol. 2, pp. 1303–1310.

Dewapriya, M. A. N. and Meguid, S. A. (2019) 'Comprehensive molecular dynamics studies of the ballistic resistance of multilayer graphene-polymer composite', *Computational Materials Science*, 170, p. 109171.

Ghosh, P. and Ramajeyathilagam, K. (2023) 'Experimental and numerical investigations on the effect of MWCNT-COOH and Al_2O_3 hybrid nanofillers dispersed CFRP laminates subjected to projectile impact', *Processes*, 11, p. 1435.

Gürgen, S., Kuşhan, M. C. and Li, W. (2017) 'Shear thickening fluids in protective applications: A review', *Progress in Polymer Science*, 75, pp. 48–72. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.07.003.

Hudspeth, M., Jewell, E., Horner, S., Zheng, J. and Chen, W. (2017) 'Exploration of wave development during yarn transverse impact', *Fibers*, 5(2), p. 17. doi: 10.3390/fib5020017.

Karhankova, M., Adamek, M., Krstulović-Opara, L., Mach, V., Bagavac, P., Stoklasek, P. and Mizera, A. (2024) 'Composites in ballistic applications focused on ballistic vests—A review', *Journal of Composites Science*, 8(10), p. 415. doi: 10.3390/jcs8100415.

Mawkhlieng, U., Majumdar, A. and Laha, A. (2020) 'A review of fibrous materials for soft body armour applications', *RSC Advances*, 10, pp. 1066–1086. doi: 10.1039/C9RA06447H.

National Institute of Justice (NIJ) (2008) *Ballistic resistance of body armor: NIJ Standard-0101.06*. U.S. Department of Justice.

Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H. A., Rafiqah, S. A., Sabaruddin, F. A., Kamarudin, S. H., Norrrahim, M. N. F., Ilyas, R. A. and Sapuan, S. M. (2021) 'A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications', *Polymers*, 13(4), p. 646. doi: 10.3390/polym13040646.

Odesanya, K. O., Ahmad, R., Jawaid, M., Bingol, S., Adebayo, G. O. and Wong, Y. H. (2021) 'Natural fibre-reinforced composite for ballistic applications: A review', *Journal of Polymers and the Environment*, 29(12), pp. 3795–3812. doi: 10.1007/s10924-021-02169-4.

Pol, M. H. and Liaghat, G. (2016) 'Investigation of the high velocity impact behavior of nanocomposites', *Polymer Composites*, 37, pp. 1173–1179.

Rajole, S., Ravishankar, K. S. and Kulkarni, S. M. (2020) 'Performance study of jute-epoxy composites/sandwiches under normal ballistic impact', *Defence Technology*, 16, pp. 947–955.

Shi, X., Sun, Y., Xu, J., Chen, L., Zhang, C. and Zhang, G. (2023) 'Effect of fiber fraction on ballistic impact behavior of 3D woven composites', *Polymers*, 15, p. 1170.

Smith, J. C., McCrackin, F. L. and Schiefer, H. F. (1958) 'Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part V: Wave propagation in long textile yarns impacted transversely', *Textile Research Journal*, 28(4), pp. 288–302. doi: 10.1177/004051755802800402.

Stopforth, R. and Adali, S. (2019) 'Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles', *Defence Technology*, 15, pp. 186–192.

Vignesh, S., Surendran, R., Sekar, T. and Rajeswari, B. (2021) 'Ballistic impact analysis of graphene nanosheets reinforced Kevlar-29', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 788–793.

Wu, S., Sikdar, P. and Bhat, G. S. (2023) 'Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches', *Defence Technology*, 21, pp. 33–61. doi: 10.1016/j.dt.2022.06.007.

Xu, J., Tang, L., Liu, Y., Zhou, L., Chen, J., Jiang, Z., Liu, Z. and Yang, B. (2023) 'Hybridization effects on ballistic impact behavior of carbon/aramid fiber reinforced hybrid composite', *International Journal of Impact Engineering*, 181, p. 104750.