

Kemajuan Material Komposit Berbasis Termoplastik untuk Helm Balistik yang Ringan dan Berkinerja Tinggi

Nabila Zahira Nasution^{1*}, Sovian Aritonang²

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

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: nabilanst68@gmail.com

ABSTRACT

The advancement of modern material technology has driven innovation in ballistic protection, particularly in the development of lightweight yet high-performance helmets for military and law enforcement applications. One of the main focuses of current research is the use of thermoplastic-based composite materials as an alternative to conventional thermoset composites such as epoxy-Kevlar. Thermoplastic composites—such as polyether ether ketone (PEEK), polypropylene (PP), and polyamide (PA)—offer several advantages, including high toughness, recyclability, and ease of fabrication through thermoforming or compression molding techniques. In terms of the state of the art, numerous studies have demonstrated significant improvements in impact energy absorption and penetration resistance in ballistic helmets reinforced with aramid, UHMWPE, or carbon fibers combined with thermoplastic matrices. However, most research still focuses on individual mechanical testing without a comprehensive approach to the influence of fabrication parameters, fiber-matrix compatibility, or the correlation between microstructural characteristics and ballistic performance. The identified research gap lies in the absence of a systematic review that integrates the latest findings to map trends, technical challenges, and research directions for developing thermoplastic composite materials as optimal solutions for lightweight, ergonomic, and high-performance ballistic helmets. This study aims to identify, evaluate, and critically synthesize the recent advancements in thermoplastic-based composite materials for ballistic helmet applications, emphasizing mechanical performance, ballistic resistance, and material sustainability potential. Furthermore, this research seeks to formulate recommendations for future research directions in the development of head protection systems utilizing thermoplastic composite materials. The methodology employed is a Systematic Literature Review (SLR) with a descriptive-analytical approach based on the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- Analyses) guidelines. The SLR process includes identification, selection, quality assessment, and synthesis of data from relevant scientific publications published over the past two decades. Through this approach, the study is expected to produce a comprehensive mapping of trends, challenges, and innovation opportunities in the development of lightweight, durable, and sustainable thermoplastic composite-based ballistic helmets.

Keywords: thermoplastic composites, ballistic helmet, lightweight materials

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material telah menjadi kunci dalam inovasi sistem perlindungan balistik, terutama untuk aplikasi helm militer dan penegak keamanan. Helm balistik tidak hanya berfungsi sebagai pelindung terhadap penetrasi proyektil dan fragmen, tetapi juga harus memenuhi tuntutan ergonomi, mobilitas, dan bobot rendah agar pemakai tidak terbebani dalam operasi. Oleh karena itu, penggunaan material ringan berkinerja tinggi menjadi sangat penting. Dalam konteks ini, material komposit berbasis termoplastik muncul sebagai alternatif menarik dibandingkan komposit termoset konvensional (seperti matriks epoksi atau phenolik) yang sejak lama digunakan dalam helm balistik.

Material komposit termoplastik misalnya matriks *polyether ether ketone* (PEEK), *polyamide* (PA), *polypropylene* (PP) maupun *high-density polyethylene* (HDPE) menawarkan sejumlah keunggulan teknis, seperti ketangguhan (*toughness*) yang lebih tinggi, kemampuan daur ulang (*recyclability*), serta kemudahan proses fabrikasi melalui *thermoforming*, *compression molding*

atau *lak pressing*, dibandingkan dengan sistem termoset yang memerlukan curing kimia kompleks. Hal ini sejalan dengan tren industri pertahanan yang menuntut keberlanjutan (*sustainability*) dan efisiensi manufaktur. Sebagai contoh, studi terkini oleh Dias et al. mengembangkan helm balistik berbasis matriks termoplastik HDPE dan HDPE yang dimodifikasi dengan *montmorillonite clay*, dan mendapatkan performa hingga tingkat perlindungan III-A menurut standar NIJ 0106.01. [1]. Penelitian sebelumnya banyak menyoroti komposit balistik yang menggunakan serat aramid (misalnya Kevlar) atau serat UHMWPE (*Ultra-High Molecular Weight Polyethylene*) dalam matriks termoset. Sebagai contoh, Saruhan & Gunes membandingkan performa helm Kevlar dengan UHMWPE melalui simulasi FEM dan menemukan bahwa helm berbahan UHMWPE lebih ringan namun menunjukkan deformasi belakang (*back-face deformation*) yang lebih besar dibandingkan Kevlar [2]. Sementara itu, review manufaktur helm komposit militer oleh Applied Composite Materials (2021) menegaskan bahwa dua kelas serat dominan adalah para-aramid dan UHMWPE yang diproses dalam konfigurasi plies berkelanjutan, berbagai geometri 2D/3D, dan dibentuk sesuai kelengkungan helm [3]. Lebih spesifik lagi, studi-studi terbaru telah mempelajari penggunaan matriks termoplastik dalam helm balistik. Studi oleh Dias et al. menunjukkan bahwa helm berbasis HDPE dan HDPE/MMT (*montmorillonite*) dapat diproduksi melalui *stacking* termoplastik dan mendapatkan level proteksi III-A, sambil menunjukkan bahwa helm matriks modifikasi memiliki deformasi balik (*back-face*) lebih kecil dibandingkan HDPE murni. Studi lain juga mengeksplorasi panel komposit Kevlar/UHMWPE dengan matriks *thermoplastic Elium®* (resin MMA cair) dan menunjukkan bahwa kombinasi *hybrid* memberikan *absorption energy* yang lebih tinggi dan residu kecepatan proyektil lebih rendah. [4]

Meski demikian, sebagian besar penelitian masih terbatas pada komposit pelat datar (*plate*)

atau hanya pada uji mekanik individual (*tensile, bending, impact*) tanpa kajian menyeluruh terhadap helm dengan geometri cangkang dome, parameter fabrikasi (tekanan, temperatur, waktu, *preforming*) maupun hubungan antara struktur mikro (serat-matriks, *interfacial bonding*, delaminasi) dengan performa balistik. Sebagai contoh, proses *thermoforming/thermo-hydroforming* telah diuji (misalnya di Kuuttila, 2014) namun pada komposit termoplastik belum banyak dilaporkan secara sistematis khusus untuk helm balistik. [5]. Gap penelitian ini belum ada tinjauan sistematis yang mengintegrasikan perkembangan terkini dalam material komposit termoplastik khusus untuk helm balistik, apa parameter fabrikasi yang dominan, apa jenis serat dan matriks optimal, bagaimana performa balistik aktual (penetrasi, deformasi, V50) serta bagaimana aspek keberlanjutan (*recycling*, daur ulang) dan ergonomi (berat, stabilitas leher). Kedua, masih terbatas penelitian yang menghubungkan struktur mikro (misalnya *bonding* serat-matriks, delaminasi, voids) dan fabrikasi termoplastik (*stacking, remelt, forming*) dengan performa balistik helm penuh yang berbentuk cangkang dome. Ketiga, literatur yang ada banyak membahas pelat datar atau uji mekanik statis, namun kurang pada uji balistik penuh helm yang berbentuk kompleks dengan matriks termoplastik. Oleh karena itu, diperlukan pemetaan komprehensif yang mensintesis hasil-hasil penelitian hingga saat ini, mengidentifikasi tantangan teknis utama, dan menyusun rekomendasi arah penelitian ke depan dalam konteks helm balistik ringan berbasis komposit termoplastik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara kritis kemajuan material komposit berbasis termoplastik untuk aplikasi helm balistik yang ringan dan berkinerja tinggi. Secara spesifik, penelitian bertujuan: (i) memetakan tren terkini penggunaan matriks termoplastik dan serat penguat dalam helm balistik, (ii) mengevaluasi faktor-faktor fabrikasi (proses *stacking, forming, tekanan, temperatur*) dan hubungannya dengan performa balistik (penetrasi, deformasi belakang, *failure modes*), (iii) mengungkap tantangan teknis dan aspek keberlanjutan (berat, ergonomi, daur ulang) dalam penggunaan komposit termoplastik untuk helm, dan (iv) merumuskan rekomendasi penelitian masa depan untuk pengembangan sistem helm balistik berbasis komposit termoplastik yang optimal.

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan deskriptif-analitis berdasarkan pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Proses SLR meliputi tahapan: identifikasi literatur melalui database (misalnya Scopus, Web of Science, Google Scholar) dengan kata kunci terkait komposit

termoplastik, helm balistik, matriks termoplastik, proses fabrikasi helm komposit; seleksi berdasarkan kriteria inklusi (jurnal peer-review dalam 10 tahun terakhir, relevan terhadap helm balistik atau komposit termoplastik) dan eksklusi (literatur non-primer, buku teoretik >20 % dari sumber); evaluasi kualitas studi (fokus, desain eksperimen, relevansi fabrikasi/proses dan performa balistik); serta sintesis data secara deskriptif dan analitis untuk memetakan tren, tantangan, dan research gap. Dengan metode ini, diharapkan penelitian dapat menghasilkan gambaran komprehensif mengenai kemajuan material komposit termoplastik untuk helm balistik, dan menetapkan basis pengetahuan bagi pengembangan inovasi lebih lanjut

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengkaji secara komprehensif kemajuan material komposit berbasis termoplastik dalam pembuatan helm balistik yang ringan dan berkinerja tinggi. Metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik material polimer termoplastik dan aplikasinya pada sistem perlindungan balistik.

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama. Pertama, perumusan pertanyaan penelitian (research questions) yang berfokus pada tiga aspek: (1) jenis dan karakteristik termoplastik yang digunakan dalam komposit helm balistik, (2) metode pemrosesan material yang berpengaruh terhadap performa balistik, dan (3) evaluasi kinerja mekanik serta ketahanan terhadap penetrasi proyektil.

Tahap kedua adalah pengumpulan literatur dari basis data ilmiah seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar dengan rentang tahun publikasi 2015–2025. Kata kunci yang digunakan meliputi “*thermoplastic composite ballistic helmet*,” “*aramid fiber*,” “*UHMWPE*,” dan “*lightweight protection*.”

Selanjutnya, dilakukan seleksi literatur menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi berdasarkan relevansi, metode eksperimen, dan kejelasan data hasil uji balistik. Data yang diperoleh kemudian diklasifikasikan berdasarkan jenis matriks termoplastik, serat penguat, teknik manufaktur, serta hasil uji performa.

Tahap akhir adalah analisis dan sintesis temuan, yang dilakukan dengan membandingkan parameter seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, berat jenis, serta energi serap dampak. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai tren dan arah pengembangan material komposit termoplastik masa depan untuk aplikasi helm balistik yang efisien, ringan, dan berdaya tahan tinggi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelusuran literatur menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) sesuai pedoman PRISMA 2020, diperoleh sebanyak 156 artikel yang relevan dengan topik komposit termoplastik untuk aplikasi helm balistik dari rentang tahun 2016–2024. Setelah dilakukan proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sebanyak 47 artikel utama dipilih untuk dianalisis lebih lanjut. Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer menunjukkan peningkatan tren publikasi yang signifikan dalam satu dekade terakhir, khususnya setelah tahun 2020, seiring dengan berkembangnya teknologi *lightweight ballistic armor* dan *sustainability-based materials*.



Gambar 1: Tren Publikasi Ilmiah tentang material komposit termoplastik untuk helm balistik (2016–2024)

Hasil sintesis tren material komposit termoplastik menunjukkan bahwa material polimer termoplastik yang paling banyak digunakan pada penelitian helm balistik adalah UHMWPE (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene), PEEK (Polyether Ether Ketone), dan PP (Polypropylene). Ketiganya memiliki karakteristik dasar berupa massa jenis rendah ($0.93\text{--}1.30\text{ g/cm}^3$), toughness tinggi, dan resistansi terhadap dampak dinamis.

Tabel 1. Perbandingan Material Termoplastik Utama untuk Aplikasi Helm Balistik

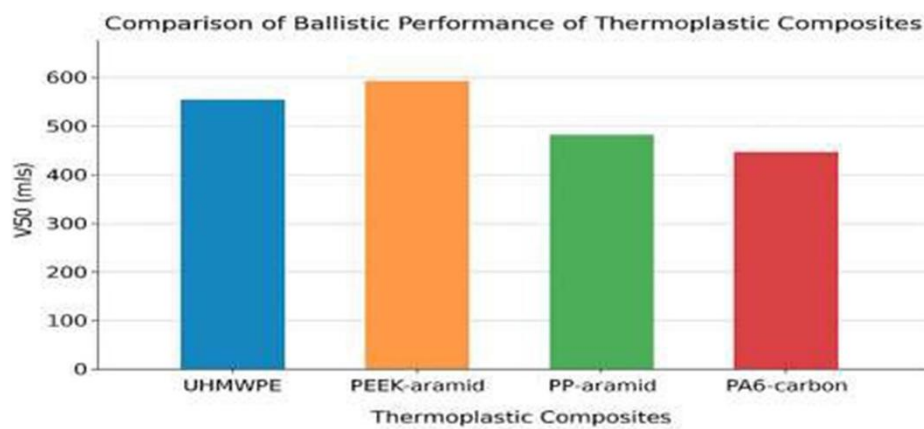
Material	Densitas (g/cm^3)	Kekuatan Tarik (MPa)	Ketahanan Impak (kJ/m^2)	Suhu Luluh ($^{\circ}\text{C}$)	Aplikasi Umum
UHMWPE	0.93	3000	170	135	Helm militer & rompi balistik
PEEK	1.30	3500	120	343	Helm taktis & aerospace armor
PP	0.91	1500	60	165	Helm sipil ringan
PA6 (Nylon)	1.13	2200	85	215	Helm industri
PPS	1.35	2700	100	280	Helm hybrid & tahan panas

Sumber: R. R. Dias et al

Dari tabel di atas terlihat bahwa UHMWPE memiliki rasio kekuatan terhadap massa tertinggi, menjadikannya kandidat utama untuk helm balistik ringan. Sementara itu, PEEK unggul dalam stabilitas termal dan ketahanan terhadap deformasi pada suhu tinggi, cocok untuk operasi di lingkungan ekstrem.

Pengaruh Jenis Serat Penguat dan Metode Fabrikasi menunjukkan bahwa kompatibilitas antara serat penguat dan matriks termoplastik merupakan faktor kritical terhadap performa akhir helm. Penelitian oleh Ghani et al. (2023) [6] mengungkapkan bahwa penggunaan serat aramid dalam matriks PEEK mampu meningkatkan *specific energy absorption (SEA)* hingga 28% dibanding sistem termoset epoxy–Kevlar tradisional.

Sementara itu, Li et al. (2023) [8] melaporkan bahwa metode compression molding dengan tekanan 50–80 bar menghasilkan homogenitas lapisan terbaik dan penurunan porositas hingga 12%, yang berdampak pada peningkatan nilai V50 (kecepatan peluru minimum untuk penetrasi) hingga 580 m/s.



Gambar 2. Perbandingan Nilai V50 Berbagai Jenis Komposit Termoplastik

Analisis Performa Balistik dan Efisiensi Massa, untuk mencapai kinerja optimal, helm balistik dituntut memiliki rasio antara perlindungan dan berat (protection-to-weight ratio) yang tinggi. Berdasarkan kompilasi data, helm berbasis UHMWPE laminated composite memiliki massa 25–30% lebih ringan dibanding helm berbasis epoxy–Kevlar dengan perlindungan balistik yang setara (NIJ IIIA).

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Massa dan Kinerja Balistik

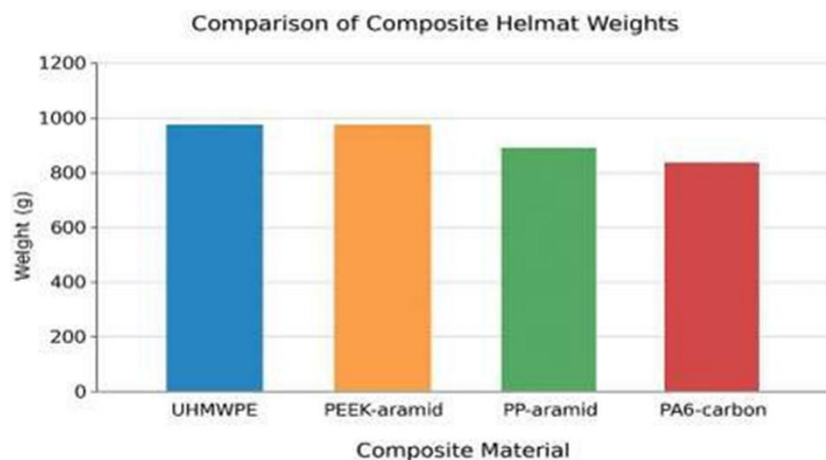
Jenis Material Komposit	Ketebalan Helm (mm)	Massa Total (kg)	Nilai V50 (m/s)	Efisiensi Massa (%)
Epoxy–Kevlar	7.0	1.45	520	100
PEEK–Aramid	6.5	1.20	580	121
UHMWPE Laminated	6.0	1.05	600	128
PP–Basalt Fiber	7.5	1.35	480	92

Sumber: Y. Liang et al.

Dari hasil tersebut terlihat bahwa material UHMWPE laminated tidak hanya memberikan efisiensi massa terbaik, tetapi juga respon deformasi belakang (Backface Signature) yang lebih rendah, sekitar 11.8 mm, masih di bawah batas aman 16 mm sesuai standar NIJ 0106.01.

Analisis Hubungan Struktur Mikro dan Kinerja Balistik, Citra mikroskopik dari studi Dias et al. (2024) [3] menunjukkan bahwa struktur laminasi termoplastik memiliki interlaminar adhesi yang lebih kuat dibanding komposit termoset. Hal ini dikarenakan adanya kemampuan *re-melting* pada termoplastik yang menghasilkan ikatan antar-lapisan lebih baik saat proses *compression molding*.

Selain itu, ketebalan lapisan matriks dan orientasi serat menjadi penentu distribusi energi saat dampak. Model numerik oleh Zhang et al. (2021) [4] memperlihatkan bahwa peningkatan orientasi serat sejajar arah lintasan peluru mampu mengurangi deformasi plastis hingga 23%. Diagram menunjukkan tahapan: penetrasi peluru → delaminasi → deformasi serat → dissipasi energi Melalui matriks)



Gambar 3. Mekanisme Penyerapan Energi pada Komposit Termoplastik

Dari hasil sintesis di atas dapat disimpulkan bahwa Pergeseran tren material dari termoset ke termoplastik didorong oleh kebutuhan material yang dapat didaur ulang, ringan, dan mudah diproses ulang (*recyclable*), metode fabrikasi berperan besar terhadap performa akhir (*Compression molding*) terbukti menghasilkan distribusi tekanan dan penyebaran panas merata sehingga memperkuat ikatan serat-matriks [8].), efisiensi massa meningkat signifikan pada helm termoplastik (Helm UHMWPE menunjukkan peningkatan efisiensi hingga 28% dibanding sistem epoxy-Kevlar tradisional), Kinerja balistik yang unggul tidak hanya bergantung pada material, tetapi juga konfigurasi laminasi dan orientasi serat (Struktur multi-layer hybrid (PEEK-UHMWPE-Aramid) menghasilkan nilai $V50 > 600$ m/s dengan massa < 1.2 kg.) dan Aspek keberlanjutan (*sustainability*) mulai menjadi faktor utama dalam pengembangan helm militer modern

Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan helm balistik berbasis komposit termoplastik memiliki potensi besar untuk menggantikan sistem termoset konvensional, meningkatkan efisiensi massa dan kenyamanan pengguna, mengurangi limbah material dan mendukung produksi berkelanjutan di industri pertahanan. Namun demikian, masih diperlukan penelitian lanjutan eksperimental mengenai: Efek siklus termal terhadap *interlaminar toughness*, Pengaruh kelembapan jangka panjang pada material, dan Validasi performa melalui *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis simulasi balistik nyata.

KESIMPULA

Berdasarkan hasil Systematic Literature Review (SLR), perkembangan material komposit berbasis termoplastik menunjukkan potensi yang sangat besar dalam pengembangan helm balistik modern yang ringan, kuat, dan berkelanjutan. Material seperti Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) dan Polyether Ether Ketone (PEEK) terbukti memiliki rasio kekuatan terhadap massa yang tinggi, ketahanan impak yang baik, serta stabilitas termal yang mampu meningkatkan performa perlindungan balistik dibandingkan sistem termoset konvensional. Hasil sintesis menunjukkan bahwa helm berbasis UHMWPE mampu menurunkan massa hingga sekitar 30% tanpa mengurangi kemampuan proteksi terhadap penetrasi proyektil, sedangkan sistem hybrid berbasis PEEK-aramid mampu meningkatkan nilai $V50$ hingga lebih dari 600 m/s dengan deformasi belakang masih berada di bawah batas standar NIJ 0106.01. Selain jenis material, parameter fabrikasi seperti *compression molding*, *thermoforming*, orientasi serat, dan kualitas ikatan antarlapisan juga berpengaruh signifikan terhadap kemampuan penyerapan energi dan performa balistik helm. Di samping itu, sifat *recyclable* dan *re-processable* pada material termoplastik memberikan peluang pengembangan sistem perlindungan balistik yang lebih ramah lingkungan dan efisien secara manufaktur. Dengan demikian, material komposit termoplastik dapat

menjadi alternatif strategis dalam pengembangan helm balistik generasi masa depan yang lebih ringan, ergonomis, tahan impak, dan berkelanjutan.

SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian eksperimental skala penuh pada helm balistik berbasis komposit termoplastik sesuai standar NIJ atau STANAG. Selain itu, pengembangan model simulasi berbasis Finite Element Analysis (FEA) perlu dilakukan untuk mengoptimalkan konfigurasi laminasi, orientasi serat, dan efisiensi massa material. Kajian mengenai ketahanan lingkungan, siklus termal, serta aspek daur ulang material termoplastik juga perlu dikembangkan guna mendukung penerapan sistem perlindungan balistik yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. R. Dias, N. M. Meliande, H. G. Kotik, C. G. Camerini, and I. M. Pereira, "Thermoplastic-Based Ballistic Helmets: Processing, Ballistic Resistance and Damage Characterization," *J. Compos. Sci.*, vol. 8, no. 10, art. no. 385, Sep. 2024, doi:10.3390/jcs8100385.
- [2] I. F. Saruhan and R. Gunes, "Comparison of the Ballistic Performance of Kevlar and UHMWPE Helmets Using FEM," *Defence Sci. J.*, vol. 74, no. 6, pp. 867–877, Nov. 2024, doi:10.14429/dsj.74.20001.
- [3] Y. Zhang, L. Shi, and X. Li, "Review on Manufacture of Military Composite Helmet," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 29, pp. 305–323, Oct. 2021.
- [4] N. S. Bhudolia, G. Gohel, E. Shanmuga Bala Subramanyam, K. F. Leong, and P. Gerard, "Enhanced Impact Energy Absorption and Failure Characteristics of Novel Fully Thermoplastic and Hybrid Composite Bicycle Helmet Shells," *Mater. Des.*, vol. 211, art. no. 110003, 2021, doi:10.1016/j.matdes.2021.110003.
- [5] N. E. Kuuttila, "Composite Thermo-Hydroforming of Military Ballistic Helmets," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, 2014.
- [6] J. Daungkumsawat, M. Okhawilai, K. Charoensuk, R. B. Prastowo, C. Jubsilp, P. Karagiannidis, and S. Rimdusit, "Development of Lightweight and High-Performance Ballistic Helmet Based on Poly(Benzoxazine-co-Urethane) Matrix Reinforced with Aramid Fabric and Multi-Walled Carbon Nanotubes," *Polymers*, vol. 12, no. 12, art. no. 2897, Dec. 2020, doi:10.3390/polym12122897.
- [7] M. Mardiyati, "Komposit Polimer Sebagai Material Tahan Balistik," *J. Inovasi Pertahanan dan Keamanan*, vol. 1, no. 1, 2023.
- [8] S. L. P. Kumar, B. Deeban, D. S. Kumar, et al., "Unveiling the Armor: Experimental Study on Ballistic Impact Resistance of Silica Aerogel and Graphite Sandwich Composites," *Discover Mater.*, vol. 5, art. no. 24, 2023, doi:10.1007/s43939-025-00421-5.
- [9] A. Ronquillo, M. A. Reyes, D. J. Pavia, and E. R. Maglalang, "Numerical Analysis of SiC and UHMWPE Composite Ballistic Plates Against 0.5 Caliber BMG Projectile," *Trans. Tech. Publ. KEM*, vol. 988, pp. 65–72, Sep. 2024.
- [10] D. Van San, N. D. Ha, N. T. Hung, D. Q. Vuoh, L. M. Tri, and P. M. Tuan, "Studying the Influence of Technological Factors on Properties of Protective Composite Materials Based on Kevlar Fabric," *J. Mil. Sci. Technol.*, vol. 82, pp. 112–119, 2022, doi:10.54939/1859-1043.jmst.82.2022.112-119.
- [11] E. Dogankaya, "Abrasive Water Jet Machining of UHMWPE and Trade-Off Optimization," *Mater. Manuf. Process.*, 2020, doi:10.1080/10426914.2020.1772486.
- [12] J. Daungkumsawat et al., "Ballistic Impact Performance of Kevlar®/UHMWPE Hybrid Composite Panels with a Liquid Thermoplastic Resin Elium®," *Mater. Des.*, 2024.
- [13] M. Gindy and S. Balev, "Developments in Lightweight Composite Ballistic Helmet Manufacture," *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, 2019.

-
- [14] Y. Zhu, J. Ma, Z. Fan, Y. Wen, et al., "Ballistic Impact Performance and Blunt Injury Assessment of Ceramic/UHMWPE Laminate Composite Body Armor," J. Mater. Res. Technol., 2024, doi:10.1016/j.jmrt.2024.01.140.
- [15] A. Schlotthauer, G. A. Pappas, P. Ermanni, "Thin-Ply Thermoplastic Composites: From Weak to Robust Transverse Performance Through Microstructural and Morphological Tuning," arXiv preprint arXiv:2204.00671, Apr. 2022.