



Analisis Komposit *Epoxy HGM Carbon Fiber* dan *Epoxy HGM Sisal Woven* sebagai Material Rompi Anti Peluru

Bagus Kusuma^{1*}, Elza Ully Tiara Tampubolon², Sovian Aritonang

^{1,2,3}Universitas Pertahanan, Indonesia

Email : baguskusuma089@gmail.com, elzaullytiaratampubolon089@gmail.com,
sovia.aritonang@idu.ac.id

Alamat: Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Bogor, Jawa Barat, 16810,
Indonesia

Korespondensi penulis: baguskusuma089@gmail.com*

Abstract. *This research examines the potential of Epoxy-HGM-Carbon Fibre and Epoxy HGM Sisal Woven Fibre composites as alternative materials for bulletproof vests. These two materials were chosen because they have similar ballistic protection capabilities to kevlar but with lighter weight and more economical cost. Using the finite element method, this study simulates the resistance of each composite to the penetration and impact energy of projectiles in accordance with the NIJ 0101.06 standard to protect users from ballistic threats. The simulation results show that the Epoxy-HGM-S Sisal Woven Fibre specimen at an optimum thickness of 30 mm as well as Epoxy-HGM-Carbon Fibre at a thickness of 18 to 30 mm are able to meet the penetration, Back Face Signature (BFS), and residual kinetic energy criteria that comply with the safe limits for users. This research makes an important contribution to the identification of alternative materials that not only improve user comfort and mobility, but also maintain ballistic protection effectiveness for military and security applications, especially for personnel who need protection against ballistic projectiles.*

Keywords: *Composite, Epoxy, Carbon Fibre, Sisal Fibre, Bulletproof Ves*

Abstrak. *Penelitian ini mengkaji potensi komposit Epoxy-HGM-Serat Karbon dan Epoxy HGM Serat Sisal Woven untuk material alternatif untuk rompi anti peluru. Kedua material ini dipilih karena memiliki kemampuan proteksi balistik yang mirip dengan kevlar namun dengan berat yang lebih ringan dan biaya lebih ekonomis. Menggunakan metode elemen hingga, penelitian ini mensimulasikan ketahanan masing-masing komposit terhadap penetrasi dan energi impact proyektil memenuhi standar NIJ 0101.06 untuk melindungi pengguna dari ancaman balistik. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa spesimen Epoxy-HGM-Serat Sisal Woven pada ketebalan optimal 30 mm serta Epoxy HGM Serat Karbon pada ketebalan 18 hingga 30 mm mampu memenuhi standar penetrasi, Back Face Signature atau BFS, dan energi kinetik yang sesuai dengan batas aman untuk pengguna. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam identifikasi material alternatif yang tidak hanya meningkatkan kenyamanan dan mobilitas pengguna, tetapi juga mempertahankan efektivitas proteksi balistik untuk aplikasi di bidang militer dan keamanan, khususnya bagi personel yang membutuhkan perlindungan terhadap proyektil balistik.*

Kata Kunci: Komposit, Epoxy, Serat Karbon, Serat Sisal, Rompi Anti Peluru

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan Teknologi Militer yang semakin pesat, Potensi ancaman yang akan dihadapi Indonesia semakin beragam. Oleh karena itu, memerlukan teknologi pertahanan negara yang kuat (Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, 2015). Salah satu teknologi militer yang berkembang pesat adalah persenjataan. Seiring dengan perkembangan senjata, pengembangan alat pertahanan dan perlindungan diri juga menjadi hal yang sangat penting. Perlindungan terhadap ancaman senjata api menjadi isu utama, terutama bagi aparat penegak hukum dan personel militer. Kebutuhan akan sistem

pelindung yang dapat melindungi dari serangan berbagai jenis ancaman menjadi masalah yang mendalam, baik dari segi keamanan pribadi, sosial, maupun nasional. Rompi anti peluru adalah alat pelindung yang vital bagi anggota militer, yang bertujuan untuk mengurangi dampak akibat balistik/Peluru pada tubuh personel. Mulanya, rompi anti peluru dibuat menggunakan bahan logam, namun dengan berkembangnya taktik peperangan infanteri, rompi anti peluru berbahan logam tidak lagi dianggap efektif (Ashari, 2017), (Pulungan, 2017).

Rompi anti peluru dirancang untuk melindungi tubuh dari serangan fisik. Rompi ini harus nyaman dipakai, ringan, tidak menghambat pergerakan, serta memberikan ruang yang cukup untuk bernapas, terutama selama penggunaan dalam waktu lama dan pada suhu yang tinggi (Aritonang & Murniati, 2024). Rompi anti peluru juga mempunyai fungsi menghalangi penetrasi dan meredam energi dampak dari proyektil. Ketika terjadi suatu tumbukan, energi kinetik dari sebuah peluru terserap dan disebarkan ke seluruh area sekitar tabrakan sebelum diteruskan ke tubuh personel. Dengan demikian, rompi berperan dalam memperluas area kena antara peluru dan tubuh manusia. Namun, rompi anti peluru berbahan kevlar yang dipakai oleh personel TNI dan POLRI memiliki bobot yang cukup berat, sehingga membatasi kelincahan personel saat bertugas. Meskipun kevlar efektif dalam menyerap energi peluru, bobotnya masih dianggap mengganggu pergerakan anggota angkatan bersenjata (Rahmatullah, 2021). Dari perspektif ekonomi, kevlar tergolong material yang mahal dan sering kali perlu diimpor dari luar negeri. Oleh karena itu, dibutuhkan material/bahan alternatif yang memiliki kemampuan meredam energi dampak serupa dengan kevlar, namun lebih ringan dan lebih terjangkau. Dengan demikian, pengembangan material bahan alternatif yang dapat meredam energi dampak dengan performa yang hampir sama seperti kevlar menjadi sangat penting (Gultom, 2019).

Penelitian tentang rompi anti peluru berbahan komposit telah menunjukkan berbagai inovasi dan perkembangan, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap proyektil dan kemampuan menyerap energi impact. Komposit adalah suatu teknologi rekayasa material yang berkembang di era ini karena kemampuannya mengombinasikan berbagai sifat material dengan karakteristik berbeda menjadi sifat baru yang sesuai dengan desain yang diinginkan (Fikran et al, 2022), (Alfarizi et al, 2022). Pada tahun 2010, Daniel Burger dan rekan-rekannya meneliti kerusakan pada rompi anti peluru dengan material komposit keramik dan fiber yang diuji terhadap proyektil penembus armor. Rompi ini terdiri dari material komposit keramik dan fiber. Dalam penelitian tersebut, tiga variasi model rompi anti peluru yang diterapkan menggunakan kode elemen hingga

ABAQUS/Explicit. Variasi model yaitu dengan ukuran 0,1 x 0,1 x 0,01 meter, dengan variasi ketebalan keramik menjadi dua, yaitu 5 cm dan 10 cm (Ashari, 2017). Carbon fiber adalah material komposit yang terdiri dari serat-serat tipis, yang umumnya memiliki diameter sekitar 5-10 mikrometer, dan sebagian besar terdiri dari atom karbon. Serat karbon adalah material dengan spesifikasi modulus tinggi, yang memiliki kekuatan tarik mencapai 4000 MPa, modulus elastisitas antara 230 hingga 240 GPa, dan densitas sebesar 1,6 g/cm³ (Banowati et al, 202). Serat karbon sangat kuat, tahan terhadap korosi, mudah untuk dibentuk, lebih ringan dan lebih kuat dibanding logam, menjadikannya pilihan populer dalam berbagai aplikasi yang membutuhkan material dengan kekuatan tinggi namun ringan, seperti dalam industri pesawat terbang, otomotif, dan perlindungan balistik (Susila, 2021).

Luasnya lahan pertanian dan perkebunan yang ada di Indonesia, penelitian terkait pemanfaatan serat alam perlu terus dikembangkan. Serat alam memiliki berbagai keunggulan, seperti ketersediaan yang melimpah, harga yang terjangkau, kemudahan dalam proses pengolahan, densitas yang cukup rendah, dan bisa terurai secara biologis. Serat alam yang berkembang cukup pesat di Indonesia untuk penguat dalam matriks polimer komposit adalah serat sisal (*Agave Sisalana*). Serat ini diperoleh melalui ekstraksi dari daun tanaman sisal (*Agave Sisalana Perrine*) dan dikenal memiliki kekuatan yang baik (Fitrayudha et al., 2020). Indonesia memproduksi sekitar 500 ton serat sisal per tahun. Serat sisal memiliki beberapa keunggulan sebagai bahan penguat komposit, seperti sifat mekanik yang baik, kemampuan terbiodegradasi, densitas rendah, ketersediaan yang melimpah, dan biaya yang relatif terjangkau. Secara komposisi, serat sisal yang terdiri dari 78% selulosa, 19% hemiselulosa, 8% lignin, dan beberapa komponen lainnya. Kandungan selulosa yang tinggi memberikan kekuatan, struktur molekul yang kristalin, dan tanpa percabangan (Widyawati & Haqqi, 2020).

Penelitian mengenai pengaruh komposisi serat sisal selaku penguat komposit dalam matriks epoxy oleh sifat mekaniknya sudah diteliti oleh Gupta et al. (2015). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serat sisal sebesar 30% dalam matriks epoxy menghasilkan sifat mekanik terbaik, dengan tensile strength mencapai 83,96 MPa dan energi dampak sebesar 1,09 J. Penelitian lain oleh Joko pada tahun 2018 juga mengkaji pengaruh serat sisal dalam komposit Epoxy-HGM untuk aplikasi sungkup helm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa serat sisal woven dengan orientasi 90° lebih unggul dibanding dengan serat cincang, dengan modulus Young sebesar 2304 Mpa, dan dengan tegangan tarik maksimum mencapai 332 MPa (Gultom, 2019).

Penelitian ini mengeksplorasi penyerapan energi benturan dan tingkat kerusakan dengan bahan komposit partikel, dengan kandungan HGM sebesar 16% dalam matriks epoxy. Ketika terkena beban balistik, energi kinetik peluru ditransfer menjadi sebuah energi internal, energi kinetik, serta energi termal dalam rompi tersebut. Berdasarkan standar NIJ 0101.06, penetrasi proyektil pada rompi tidak melebihi kedalaman 44 mm. Rompi anti peluru yang mempunyai tebal 25 mm memiliki kemampuan menyerap energi kinetik peluru hingga 149,5 joule (Rollastin et al, 2023). Hollow Glass Microsphere atau (HGM) adalah material mikro dengan bentuk bulat dan berongga, terbuat dengan bahan kaca Sodium Borosilicate. Dengan densitas yang cukup rendah dan bobot yang relatif ringan, HGM dapat menaikkan stabilitas dan kekuatan pada material komposit, meskipun ketahanannya terhadap tekanan tinggi dan gaya geser terbatas. Selain itu, HGM mempunyai sejumlah keunggulan, seperti ketahanan pada suhu yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, kekuatan tekan yang memadai, dan memiliki konduktivitas termal yang cukup rendah (Gultom, 2019). Epoxy adalah resin yang mengandung struktur epoksi atau oxirena. Resin ini berbentuk cairan kental atau padat yang digunakan sebagai material untuk pengerasan. Ketika dicampur dengan hardener, resin epoxy mengalami reaksi kimia yang membentuk struktur polimer cross-linked (ikatan silang) yang kuat. Proses pengerasan ini disebut curing, dan untuk curing pada suhu ruang biasanya menggunakan senyawa poliamida yang memiliki dua atau lebih gugus amina (Pramono et al, 2019). Komposit Epoxy HGM adalah material komposit yang menggunakan epoxy sebagai matriks dan bola kaca berongga berukuran mikro sebagai penguat. HGM memiliki sejumlah keunggulan, termasuk densitas rendah, kapasitas pengisian yang cukup tinggi, dan kemampuan menyerap energi benturan yang optimal. (Safa'at, 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis material bahan alternatif bagi rompi anti peluru menggunakan komposit Epoxy HGM Carbon Fiber & Epoxy HGM Sisal Woven 90°. Kedua komposit ini dipilih karena memiliki potensi untuk memberikan perlindungan balistik yang setara atau bahkan lebih baik dari kevlar, tetapi dengan keunggulan berupa bobot yang lebih ringan dan biaya lebih ekonomis. Penelitian ini menguji ketahanan kedua komposit tersebut terhadap penetrasi dan energi impak proyektil berdasarkan Uji tembak standar NIJ 0101.06 Level IV dan Level II. Uji tembak peluru merupakan proses untuk memastikan apakah produk anti peluru atau tahan peluru dapat memenuhi standar yang ditetapkan dalam menahan tembakan. Uji ini harus dilakukan di lapangan oleh pihak yang berkompeten untuk menjamin keakuratan hasil yang diperoleh (Hertanto et al, 2024). Selain itu, penelitian ini memiliki tujuan untuk menentukan

konfigurasi terbaik antara HGM, serat karbon, dan serat sisal dalam matriks epoxy, sehingga dapat menghasilkan rompi anti peluru yang efektif dalam menyerap energi proyektil dan meningkatkan perlindungan pengguna tanpa mengorbankan mobilitas atau kenyamanan.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah penggunaan Literature Review atau tinjauan pustaka sebagai pendekatan utama. Metode ini merupakan pendekatan sistematis dalam mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis literatur serta penelitian yang telah ada di bidang tertentu. Dalam penelitian ini, proses pencarian artikel dilakukan melalui database jurnal penelitian, dengan Google Scholar sebagai alat pencarian utama. Data yang digunakan yaitu data sekunder yang merupakan data yang tidak diperoleh melalui pengamatan langsung, melainkan berasal dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya.

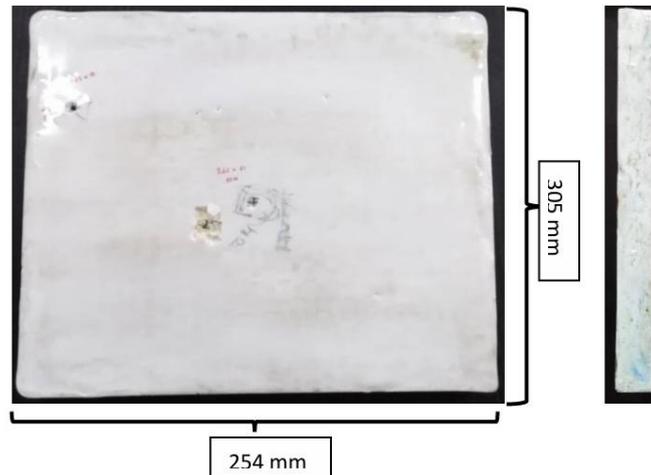
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan simulasi rompi anti peluru berstandar NIJ 0101.06 level IV, dan Armor Piercing (AP) menggunakan bahan epoxy HGM serat sisal woven dan level 2 menggunakan bahan epoxy HGM Fiber Carbon dilakukan dengan metode elemen hingga (finite element). Model simulasi ini dirancang dengan berdasarkan standar dari uji balistik NIJ 0101.06, dengan variasi ketebalan yang ditambah sebesar 2 mm per lapisan pada material Epoxy HGM serat sisal woven dan bertambah 4 mm pada material epoxy-HGM-Fiber Carbon.

Kelayakan penggunaan bahan epoxy HGM serat sisal woven dan material epoxy HGM Fiber Carbon di ketebalan tertentu sebagai bahan untuk rompi anti peluru dievaluasi berdasarkan beberapa aspek, yaitu:

- a. *Back Face Signature* atau (BFS) adalah deformasi dibagian belakang rompi yang terjadi akibat dampak proyektil. Berdasarkan standar NIJ 0101.06, deformasi maksimal yang diizinkan adalah 44 mm untuk memastikan keamanan pengguna dari cedera internal yang parah.
- b. Keberhasilan perlindungan rompi anti peluru diukur dari kemampuannya dalam mencegah penetrasi proyektil melalui spesimen. Apabila rompi mampu menahan proyektil tanpa menembus, maka rompi tersebut dinyatakan berhasil dalam memberikan perlindungan optimal kepada pengguna.

- c. Energi kinetik yang diterima oleh tubuh dapat memiliki dampak signifikan terhadap kondisi fisik. Berdasarkan penelitian dalam Hatcher's Notebook, energi kinetik dengan besar 170,2 Joule yang mengenai tubuh bisa menyebabkan kehilangan kesadaran sementara, yang menunjukkan bahwa energi yang diteruskan perlu dikurangi untuk menghindari efek negatif pada pengguna.



Gambar 1. Ukuran Simulasi Rompi Anti Peluru berbahan epoxy HGM dan serat sisal woven.

Tabel 1. Hasil Simulasi Variasi Ketebalan Epoxy HGM Serat Sisal Woven pada Rompi Anti Peluru

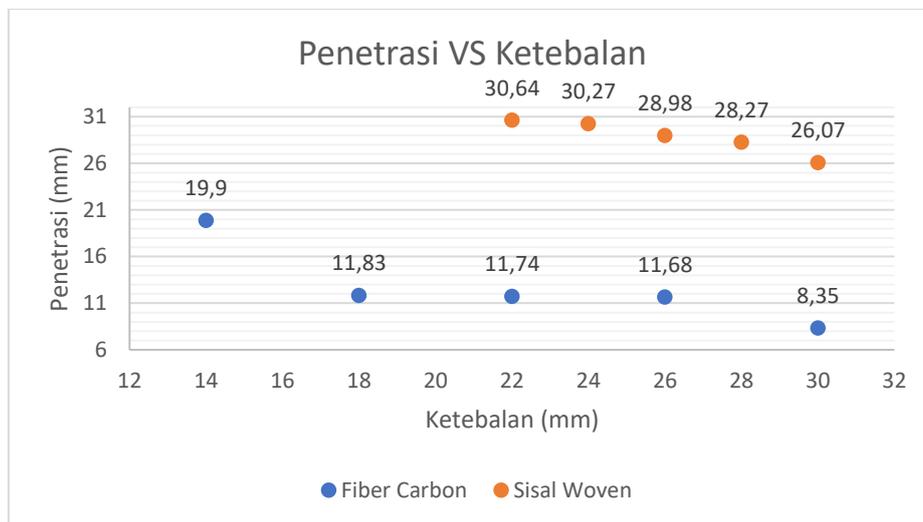
Ketebalan (mm)	Berat (Kg)	Penetrasi (mm)	Energi Kinetik Panel/Rompi (Joule)	BFS (mm)
22	1,81	30,64	175,18	6,5
24	1,98	30,27	146,86	6,09
26	2,14	28,98	159,17	4,85
28	2,31	28,27	102,18	4,82
30	2,47	26,07	99,258	2,14

Tabel 1. menyajikan hasil simulasi yang memperlihatkan variasi ketebalan rompi anti peluru, serta pengaruh ketebalan rompi yang berbahan Epoxy HGM Serat Sisal Woven terhadap penetrasi, energi kinetik panel/rompi, dan deformasi pada belakang rompi atau (back face signature).

Tabel 2. Hasil Simulasi Variasi Ketebalan Epoxy HGM Fiber Carbon pada Rompi Anti Peluru

Ketebalan Fiber Carbon (mm)	Ketebalan HGM (mm)	Total Ketebalan	Berat (Kg)	Penetrasi (mm)	Energi Kinetik Panel/Rompi (Joule)	BFS (mm)
8	6	14	1,38	19,90	211,87	17,86
	10	18	1,80	11,83	160,35	2,19
	14	22	2,21	11,74	151,61	2,05
	18	26	2,62	11,68	101,16	2,00
	22	30	3,02	8,35	88,73	1,91

Tabel 2 menyajikan hasil simulasi yang memperlihatkan variasi ketebalan rompi anti peluru, serta dampak ketebalan rompi yang berbahan Epoxy HGM Fiber Carbon terhadap penetrasi, energi kinetik panel/rompi, dan deformasi pada belakang rompi atau (back face signature).



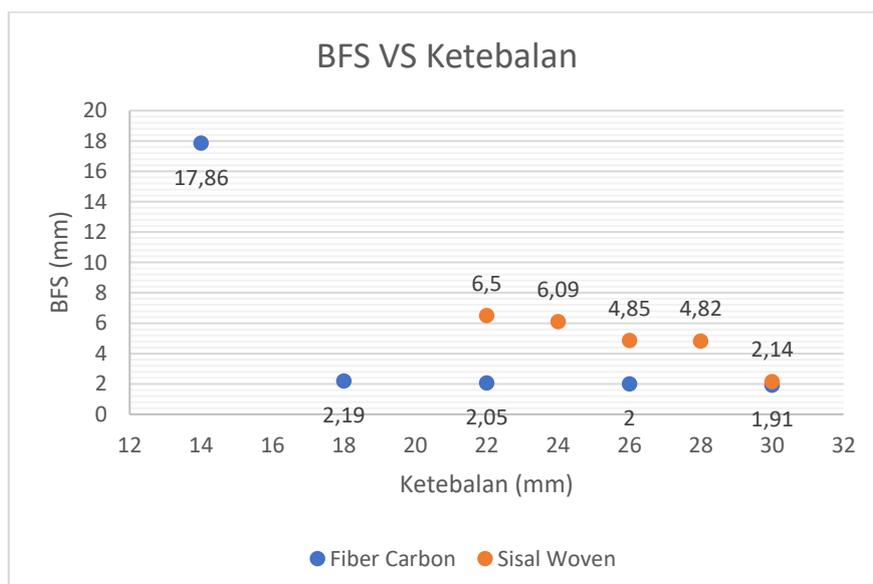
Gambar 2. Grafik Penetrasi Proyektil Peluru (mm) terhadap Ketebalan Rompi Anti Peluru Berbahan Epoxy HGM dengan Serat Sisal Woven & Epoxy HGM dengan Serat Karbon.

Penetrasi proyektil peluru merujuk pada perpindahan maksimum proyektil berkecepatan tinggi setelah menabrak spesimen rompi anti peluru hingga proyektil berhenti. Kelayakan material rompi anti peluru ditentukan oleh seberapa efektif bahan tersebut dapat menghalangi laju proyektil dengan penetrasi sekecil mungkin. Gambar 2 memperlihatkan korelasi antara penetrasi proyektil dan peningkatan ketebalan spesimen rompi anti peluru berbahan Epoxy HGM Serat Sisal Woven untuk level IV AP sesuai standar NIJ 0101.06, dan spesimen berbahan Epoxy HGM fiber carbon yang sesuai standar uji NIJ 0101.06 level 2. Grafik tersebut menunjukkan tingkat penurunan penetrasi

proyektil seiring bertambahnya ketebalan spesimen. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin tebal rompi anti peluru, semakin kecil penetrasi proyektil yang terjadi. Hal tersebut sesuai pada teori yang menyatakan bahwa ketebalan rompi yang lebih besar meningkatkan kemampuannya dalam menahan laju proyektil, sehingga penetrasi proyektil menjadi lebih kecil.

Menurut standar NIJ 0101.06 untuk proyektil level IV AP, hasil percobaan menunjukkan bahwa rompi pada ketebalan 30 mm memenuhi kriteria penetrasi yang ditetapkan, sebagaimana ditampilkan pada tabel 1 dan gambar 2. Konfigurasi dengan ketebalan Epoxy HGM Serat Sisal Woven yang sesuai Standar NIJ 0101.06 berada diketebalan 30 mm, dan memiliki penetrasi proyektil level IV AP tercatat yaitu sebesar 26,068 mm. Hal ini menunjukkan bahwa proyektil tidak berhasil menembus spesimen pada ketebalan tersebut.

Menurut Standar NIJ 01.01.06, penetrasi peluru tidak lebih dari ketebalan rompi itu sendiri, sebab jika peluru berhasil menembus, pengguna dapat terkena proyektil. Berdasarkan simulasi, ketebalan fiber karbon 8 lapis hanya mengalami kegagalan pada ketebalan HGM 6 mm dengan penetrasi proyektil sebesar 19,90 mm. Konfigurasi ketebalan epoxy HGM fiber carbon yang sesuai dengan Standar NIJ 0101.06 tercapai diketebalan 18, 22, 26, dan 30 mm, dengan penetrasi proyektil masing-masing sebesar 11,83 mm, 11,74 mm, 11,68 mm, dan 8,35 mm. Artinya, pada ketebalan tersebut, proyektil tidak berhasil menembus spesimen.

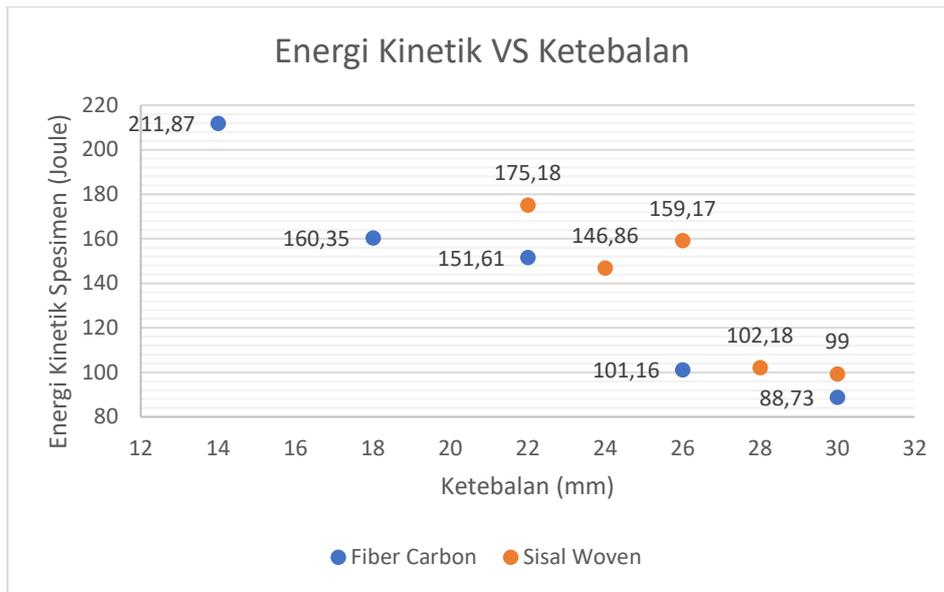


Gambar 3. Grafik BFS (mm) Proyektil terhadap Penambahan Ketebalan Rompi Anti Peluru Berbahan Epoxy HGM dengan Serat Sisal Woven & Epoxy HGM Fiber dengan Serat Karbon.

Back Face Signature (BFS) adalah deformasi pada bagian belakang rompi anti peluru yang tampak sebagai perpindahan titik terjauh akibat tumbukan proyektil. Kelayakan material rompi dapat ditentukan berdasarkan seberapa kecil nilai BFS yang dihasilkan setelah benturan proyektil. Gambar 3 memperlihatkan korelasi antara nilai BFS dengan peningkatan ketebalan spesimen rompi berbahan Epoxy HGM Serat Sisal Woven sesuai standar level IV NIJ 0101.06, dan spesimen berbahan Epoxy HGM dan fiber carbon yang sesuai standar NIJ 0101.06 level 2. Grafik tersebut menunjukkan penurunan BFS seiring bertambahnya ketebalan spesimen. Ini mengindikasikan bahwa ketebalan rompi yang lebih besar mampu meningkatkan kemampuan menahan proyektil, sehingga menghasilkan BFS yang lebih rendah.

Berdasarkan Standar NIJ 0101.06 untuk proyektil level IV AP, hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan ketebalan antara 22 mm hingga 30 mm memenuhi kriteria back face signature (BFS), seperti yang terlihat pada gambar 3. Ketebalan Epoxy HGM dengan Serat Sisal Woven yang memenuhi standar NIJ 0101.06 berada dalam rentang 22 mm hingga 30 mm, dengan nilai BFS akibat benturan proyektil level IV AP masing-masing sebesar 6,50 mm, 6,09 mm, 4,85 mm, 4,85 mm, dan 2,14 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada ketebalan tersebut, model rompi uji balistik level IV AP tidak melampaui batas Standar BFS NIJ 0101.06, yaitu 44 mm.

Menurut standar NIJ 0101.06, nilai BFS untuk rompi anti peluru tidak boleh melebihi 44 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model spesimen rompi dengan ketebalan antara 14 mm hingga 30 mm memenuhi kriteria BFS, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Konfigurasi ketebalan Epoxy HGM dengan Serat Karbon yang sesuai dengan standar NIJ 0101.06 berada dalam rentang 14 mm hingga 30 mm, dengan nilai BFS akibat benturan proyektil level II masing-masing sebesar 17,86 mm, 2,19 mm, 2,05 mm, 2,00 mm, dan 1,91 mm. Dengan demikian, pada ketebalan 14 mm hingga 30 mm, model rompi uji balistik level II tetap berada di bawah batas standar BFS NIJ 0101.06, yaitu 44 mm.



Gambar 4. Grafik Simulasi Energi Kinetik Panel/Rompi terhadap Penambahan Ketebalan Rompi Anti Peluru Berbahan Epoxy HGM dengan Serat Sisal Woven & Epoxy HGM Fiber dengan Serat Karbon

Energi kinetik mengacu pada energi kinetik proyektil yang tidak dapat terserap oleh rompi setelah tumbukan, sehingga energi tersebut diteruskan ke tubuh. Energi yang diterima tubuh memiliki batas aman tertentu, dan jika melampaui batas tersebut, pengguna dapat trauma atau cedera serius. Oleh karena itu, sangat penting untuk memiliki rompi anti peluru yang terbuat dari bahan yang mampu menyerap sebanyak mungkin energi kinetik proyektil, untuk meminimalkan energi yang diteruskan ke tubuh.

Gambar 4 memperlihatkan korelasi antara energi kinetik yang diteruskan menuju tubuh dan peningkatan ketebalan rompi anti peluru berbahan Epoxy HGM Serat Sisal Woven. Grafik ini menampilkan tingkat penurunan energi yang diteruskan menuju tubuh seiring dengan bertambahnya ketebalan rompi. Hal ini sejalan dengan teori yang menyebutkan bahwa semakin tebal rompi anti peluru, semakin efektif kemampuannya dalam menahan proyektil, sehingga dapat mengurangi energi kinetik yang diteruskan ke tubuh. Anomali di ketebalan 26 mm disebabkan karena keterbatasan perangkat lunak yang mempengaruhi presisi hasil simulasi. Berdasarkan *Hatcher's Notebook*, batas energi kinetik yang aman bagi tubuh pengguna rompi adalah 170,2 Joule. Hasil simulasi menunjukkan empat konfigurasi ketebalan antara 24 mm hingga 30 mm yang memenuhi batas ini, dengan ketebalan 30 mm menghasilkan energi kinetik sisa terendah sebesar

99,258 Joule, sementara ketebalan 22 mm tidak memenuhi kriteria, karena energi kinetik yang diteruskan yaitu sebesar 175,18 Joule melebihi batas yang aman.

Gambar 4 juga memperlihatkan korelasi antara energi kinetik dan penambahan ketebalan rompi anti peluru berbahan Epoxy HGM Fiber Carbon. Grafik tersebut menunjukkan penurunan energi yang diteruskan ke tubuh saat ketebalan spesimen bertambah. Hal ini konsisten dengan teori yaitu jika semakin tebal rompi anti peluru, semakin besar kemampuannya untuk menahan proyektil, maka energi kinetik yang diteruskan ke tubuh menjadi lebih kecil. Berdasarkan Hatcher's Notebook, batas energi kinetik yang bisa diterima oleh tubuh adalah 170,2 Joule. Hasil Simulasi menunjukkan bahwa ada empat konfigurasi ketebalan yaitu pada ketebalan 18 mm, 22 mm, 26 mm, dan 30 mm yang memenuhi kriteria, dan pada ketebalan 14 mm tidak memenuhi kriteria karena nilai energi kinetiknya sebesar 211,87 Joule, cukup jauh dari batas energi kinetik yang bisa diterima oleh tubuh yaitu 170,2 Joule.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

- a) Komposit Epoxy HGM Serat Sisal Woven dan Epoxy HGM Fiber Carbon terbukti dapat digunakan untuk bahan alternatif rompi anti peluru dengan potensi perlindungan balistik yang memadai. Kedua material menunjukkan penurunan nilai penetrasi proyektil dan Back Face Signature atau BFS sejalan dengan bertambahnya ketebalan rompi, sesuai dengan standar NIJ 0101.06.
- b) Pada Epoxy HGM Serat Sisal Woven, ketebalan optimal yang sesuai kriteria penetrasi adalah 30 mm, di mana penetrasi proyektil sebesar 26,07 mm. Sementara itu, spesimen berbahan Epoxy HGM Fiber Carbon menunjukkan kinerja yang optimal pada ketebalan 18 mm, 22 mm, 26 mm, dan 30 mm dengan penetrasi proyektil terbaik yaitu sebesar 8,35 mm.
- c) Berdasarkan standar NIJ 0101.06, berbahan Epoxy HGM Serat Sisal Woven dengan ketebalan 22 mm hingga 30 mm memenuhi kriteria back face signature dan spesimen berbahan Epoxy HGM Fiber Carbon pada ketebalan 14 mm hingga 30 mm juga memenuhi kriteria back face signature. Artinya, semua variasi ketebalan dari kedua jenis bahan spesimen tidak melampaui batas standar BFS NIJ 0101.06 sebesar 44 mm.
- d) Peningkatan ketebalan spesimen berfungsi untuk mengurangi energi kinetik yang diteruskan ke tubuh. Berdasarkan *Hatcher's Notebook*, batas energi kinetik yang aman bagi tubuh rompi anti peluru adalah 170,2 Joule. Spesimen Epoxy HGM Serat Sisal Woven pada ketebalan 22 mm tidak memenuhi kriteria ini karena energi kinetiknya

mencapai 175,18 Joule, melebihi ambang batas aman. Demikian pula, spesimen Epoxy HGM Fiber Carbon dengan ketebalan 14 mm tidak memenuhi standar karena energi kinetiknya sebesar 211,87 Joule, jauh di atas batas aman yang diterima tubuh yaitu 170,2 Joule.

Saran

- a) Penelitian selanjutnya yang membahas mengenai dampak terhadap pengguna, dan dampak terhadap lingkungan.
- b) Penelitian tambahan yang mencakup pengujian material di berbagai kondisi lingkungan, seperti suhu ekstrem, paparan sinar matahari dan kelembapan tinggi, untuk memastikan kinerja yang stabil di berbagai situasi operasional.
- c) Dilakukan studi biaya untuk menilai keefektifan penggunaan material alternatif ini dibandingkan dengan kevlar dan bahan lainnya, termasuk biaya produksi massal dan perawatan.

DAFTAR REFERENSI

- Alfarizi, M., Rollastin, B., & Sukanto. (2022). Studi eksperimen pengaruh kekuatan material komposit HGM, epoxy, dan serat daun nanas terhadap kekuatan tarik dan dampak. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan*, 174–180. <http://snitt.polman-babel.ac.id/index.php/snitt/article/view/157>
- Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). *Material pertahanan*. Bogor: CV. Aksara Global Akademia bekerja sama dengan UNHAN RI Press. ISBN: 978-623-8049-95-0
- Ashari, W. (2017). *Aplikasi kemampuan rompi anti peluru terbuat dari epoxy – HGM – carbon fiber dalam menahan back face signature dan energi impact akibat proyektil* (Undergraduate thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Banowati, L., Ghani, R. A., & Rianto, R. (2022). Prosiding Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia - Akademi Angkatan Udara, 4, 11–20. <https://doi.org/10.54706/senastindo.v4.2022.163>
- Fikran, B., Balfas, M., & Mardin. (2022). Analisis sifat mekanis bahan komposit lamina serat sisal (Sisalana Agave) bermatriks polimer. *Journal Technology Process (JTP)*, 2(1).
- Fitrayudha, A., Fajrin, J., & Anshari, B. (2020). Analisis sifat mekanis komposit polyester-sisal menggunakan metode ANOVA. *Open Journal System*, 14(7). <https://doi.org/10.33758/mbi.v14i7.489>
- Gultom, A. W. J. (2019). *Analisis komposit epoxy-HGM-serat sisal woven sebagai bahan alternatif rompi anti peluru* (Undergraduate thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/60926>

- Hertanto, T. L. O., Aritonang, S., & Murniati, R. (2024). Efektivitas komposit dalam memperkuat rompi anti peluru. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 7(1), 160–167. <https://doi.org/10.30596/rmme.v7i1.17325>
- Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. (2015). *Buku putih pertahanan Indonesia*. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.
- Pramono, C., Widodo, S., & Ardiyanto, M. G. (2019). Karakteristik kekuatan tarik komposit berpenguat serat ampas tebu dengan matriks epoxy. *Journal of Mechanical Engineering*, 3(1). <http://jurnal.untidar.ac.id/index.php/mechanical>
- Pulungan, M. A. (2017). *Analisis kemampuan rompi anti peluru yang terbuat dari komposit HGM-epoxy dan serat karbon dalam menyerap energi akibat impact peluru* (Master's thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Rahmatullah, G. M. (2021). *Kaji eksperimental material komposit berpenguat serat daun nanas pada pengujian balistik* (Undergraduate thesis). Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. <http://snitt.polman-babel.ac.id/index.php/snitt/article/view/56>
- Rollastin, B., Juanda, J., Oktriadi, Y., & Rahmatullah, G. M. (2023). Analisis simulasi pengaruh kekuatan material komposit paduan HGM dan serat alami terhadap kekuatan uji balistik. *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, 7(2), 90–97. <https://doi.org/10.32528/jp.v7i2.11474>
- Safa'at, A. (2017). *Aplikasi komposit epoxy – HGM – carbon fiber pada sungkup helm untuk menahan penetrasi dan mereduksi energi impact* (Undergraduate thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. <http://repository.its.ac.id/45997/>
- Susila, D. J. P. (2021). *Pengaruh serat karbon terhadap sifat mekanik dan topografi pada komposit bermatriks polyester BQTN 157* (Undergraduate thesis). Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.
- Widyawati, F., & Haqqi, T. A. (2020). Pemanfaatan serat sisal (*Agave sisalana* L.) dan limbah plastik PET untuk pembuatan bata ringan CLC (Cellular Lightweight Concrete). *Jurnal Tambora*, 4(1), 21–25. <https://doi.org/10.36761/jt.v4i1.566>