

Analisis Material Kevlar Dengan Coating Polyurea Sebagai Bahan Pembuatan Sepatu Pdl Tni Untuk Medan Operasi Militer Di Sugapa, Intan Jaya, Papua

Sahirah Princka^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Jalan Anyar, Citeureup, Indonesia

*Email: sahirahprincka@gmail.com

ABSTRACT

Sugapa District, Intan Jaya Regency, Papua, is a region prone to military conflict, with its highland, hilly topography and extreme climate. Temperatures can reach 9.2°C with high rainfall. These conditions demand robust, durable military equipment that provides maximum protection for Indonesian National Armed Forces (TNI) personnel engaged in military operations. One such area is Field Service Equipment (PDL) footwear. PDL footwear must meet the criteria for protection, high grip, abrasion resistance, and optimal insulation from temperature and water. However, the current standard TNI PDL footwear does not meet the criteria for the Sugapa theater of operations, Papua. This research was conducted to examine and characterize a Kevlar-based composite material with a polyurea coating as an innovative raw material for TNI PDL footwear. Kevlar is a material that has been proven to be superior anti-ballistic, with a very high tensile strength of approximately 3620 MPa and high resistance to impact and punctures. Furthermore, polyurea, an elastomer with a deformation elongation of 400-500%, is considered an appropriate material for enhancing the waterproof properties and chemical resistance of Kevlar. The research method used a systematic literature review to examine published research data on Kevlar, polyurea, military equipment, and the conditions in Sugapa District, Papua. Data analysis was conducted using a descriptive-qualitative method to address the urgent need for Kevlar-polyurea composite materials. The material analysis results showed that a Kevlar coating with a polyurea layer with a thickness variation of 0.2 mm on the front layer was the most optimal material configuration. This configuration provided the highest Ballistic Velocity Limit (Vbl) of 143.5 m/s, with a 58% increase in protection compared to plain Kevlar (90.8 m/s). Furthermore, the specific energy absorption efficiency also reached the highest value at 51.1 J.m²/g. The front-side coating has proven superior as a buffer layer, effectively absorbing impact energy and altering the fiber failure mode. In addition to the material used, the right outsole design is also crucial for slip control in the wet, muddy Sugapa operating terrain. The lightweight and flexible design demonstrates superior anti-slip performance. The combination of 0.2 mm Kevlar PU composite material with an optimal outsole design creates an effective surgical shoe in the Sugapa operating terrain.

Keywords: Kevlar, Polyurea, PDL Shoes, Sugapa, Ballistics.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Distrik Sugapa di Kabupaten Intan Jaya, Papua, merupakan salah satu wilayah operasi militer dengan berbagai tantangan geogradis. Dimana wilayah tersebut memiliki topografi yang didominasi dataran tinggi, perbukitan serta lembah curam yang terletak di bawah Puncak Cartenz. Selain itu Distrik Sugapa dikenal memiliki kondisi iklim yang ekstrem dengan suhu udara yang dapat mencapai 9,2°C serta curah hujan tinggi. Hal tersebut menyebabkan adanya urgensi peralatan tempur yang tangguh dan tahan lama, namun dapat memberikan proteksi maksimal bagi personel TNI yang sedang menjalankan Operasi Militer.

Kefektifan Operasi Militer dan pengamanan wilayah bergantung pada kesiapan dan ketepatan alat pendukung, salah satunya adalah Perlengkapan Dinas Lapangan (PDL), khususnya sepatu. Sebagai komponen PDL yang vital, sepatu harus memenuhi kriteria proteksi, daya cengkeram tinggi, ketahanan terhadap abrasi, serta isolasi terhadap suhu serta air. Kriteria tersebut merupakan

salah satu tantangan yang dimiliki oleh sepatu PDL standar karena kurang optimal dalam menghadapi medan ekstrem di Sugapa. Di sisi lain, material komposit Kevlar dikenal sebagai material antibalistik unggulan yang digunakan dalam body armour. Kevlar memiliki berbagai kelebihan dengan kekuatan tarik yang sangat tinggi dan ketahanan terhadap benturan serta tusukan yang telah diuji untuk mendukung peralatan - peralatan militer. Akan tetapi, penelitian terkait pemanfaatan Kevlar sebagai bahan baku utama sepatu tempur masih sangat terbatas, terlebih dengan adanya modifikasi coating polyurea untuk meningkatkan sifat waterproofing dan ketahanan kimia.

Berdasarkan urgensitas tersebut penelitian ini dilakukan untuk mengkaji dan mengkarakterisasi material komposit berbasis Kevlar dengan coating Polyurea sebagai bahan baku inovatif untuk sepatu PDL TNI. Sehingga dapat menciptakan sepatu operasi yang meningkatkan keselamatan, kenyamanan, serta efektivitas operasional prajurit TNI di medan yang menantang.

TINJAUAN PUSTAKA

Material Komposit

Material komposit merupakan hasil penggabungan dua atau lebih material pada skala makroskopik yang tidak larut sehingga membentuk material baru dengan sifat mekanik dan fungsional yang lebih baik. Komposit dibedakan menjadi tiga kategori, diantaranya adalah

A. Komposit Serat

Serat merupakan bagian utama dari material. Serat dengan diameter kecil memberikan luas permukaan besar antara serat dan matriks, sehingga meningkatkan ikatan dan transfer beban. Serat yang paling sering digunakan adalah Kevlar, Karbon, dan Kaca (E-glass). Material Kevlar dengan kekuatan maksimum 1389 MPa dengan deformasi rendah (1,08 mm). Sehingga Kevlar merupakan material ideal untuk aplikasi pelindung [1].

B. Komposit Matriks Polimer (Polymer Matrix Composites)

Serat dengan jenis ini menggunakan resin seperti epoxy, polyester, atau polyurethane sebagai matriks. Keunggulannya antara lain bobot ringan, mudah dibentuk, serta tahan terhadap korosi dan kelembapan. Komposit epoxy-glass fiber menunjukkan peningkatan kekuatan tarik hingga 638 MPa dan modulus elastisitas mencapai 31 GPa pada suhu rendah, menunjukkan kestabilan termal tinggi [2].

C. Komposit Hibrida

Komposit hibrida menggabungkan dua atau lebih jenis serat atau matriks untuk mengoptimalkan sifat. Kevlar yang dipadukan dengan shear thickening fluid (STF) mampu meningkatkan energi serap hingga 400% dibanding Kevlar murni [3]. Komposit berlapis multi-material (multi-layered hybrid) dapat dioptimalkan menggunakan machine learning untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas [4].

Secara mekanika, peningkatan sifat komposit terjadi karena interaksi antara fase penguat dan fase matrix. Dimana terdapat 3 faktor yang memengaruhi, yaitu kontinuitas bebas, adhesi antarmuka tinggi dan kecocokan sifat termal [5].

Material Kevlar

Kevlar merupakan serat sintesis yang dikenal sebagai poly(p-phenylene terephthalamide). Rantai polimer Kevlar dapat memiliki monomer yang berkisar dari lima hingga satu juta, dengan struktur molekul $[-CO-C_6H_4-CO-NH-C_6H_4-NH-]_n$ [6]. Rantai aromatikny memberikan kekuatan tarik yang sangat tinggi, sedangkan ikatan hidrogen antar rantai polimer memberikan stabilitas termal dan kekakuan.

Kevlar memiliki sifat mekanik yang unggul, yang menjadikannya material pilihan untuk aplikasi berkinerja tinggi. Sifat-sifat utamanya meliputi:

1. Kekuatan Tarik Tinggi: Kevlar memiliki kekuatan tarik sekitar 3620 MPa, yang hampir lima kali lebih kuat dari baja pada berat yang setara [7].
2. Rasio Kekuatan terhadap Berat yang Unggul: Densitasnya yang rendah (1,44 g/cm³) menjadikannya sangat ringan tanpa mengorbankan kekuatan.

3. Ketahanan Impact: Kevlar mampu menyerap energi benturan yang signifikan melalui mekanisme deformasi dan fiber pull-out. Pada komposit berpelapis Shear Thickening Fluid (STF), penyerapan energi impact dapat meningkat hingga 150-400% [3].
4. Ketangguhan Fraktur: Komposit laminasi Kevlar auxetic menunjukkan peningkatan ketangguhan fraktur inisiasi hingga 225% dibandingkan dengan Kevlar tenun biasa [8].
5. Elastisitas dan Fleksibilitas: Kevlar mempertahankan fleksibilitasnya bahkan ketika digunakan dalam banyak lapisan, yang penting untuk aplikasi wearable seperti body armor dan alas kaki.

Material Polyurea

Polyurea merupakan elastomer hasil reaksi cepat antara isosianat dan amina primer, menghasilkan ikatan ($-NH-CO-NH-$) yang membentuk jaringan silang kuat dan fleksibel. Struktur mikro polyurea terdiri atas hard segment dan soft segment. [9]. Segmen keras (hard segment) tersusun dari gugus urea yang saling terhubung oleh ikatan hidrogen kuat, memberikan kekuatan tarik dan stabilitas termal tinggi. Sebaliknya, segmen lunak (soft segment) berasal dari rantai polieter atau poliester yang berperan dalam memberikan fleksibilitas dan ketahanan terhadap suhu rendah [13].

Polyurea memiliki sifat mekanik unggul yang menjadikannya material ideal untuk aplikasi pelindung dan penahan energi. Material polyurea menunjukkan kemampuan deformasi tinggi dengan nilai elongation at break dapat mencapai 300–500%, serta kekuatan tarik di atas 20 MPa pada berbagai formulasi komersial (contohnya SPUA 306 dan AMMT-55) [14]. Polyurea memiliki kekuatan tarik tinggi (10–35 MPa) dan elongasi hingga 400–500%, menunjukkan kemampuan deformasi luar biasa serta ketahanan aus tinggi. Material ini juga sangat sensitif terhadap laju regangan (strain rate sensitive), sehingga mampu menyerap energi kinetik dan gaya kejutan melalui perubahan fase dari rubbery ke glassy state yang bersifat reversibel [15].

Distrik Sugapa, Intan Jaya, Papua

Distrik Sugapa, ibu kota Kabupaten Intan Jaya, Papua Tengah, berada pada ketinggian ± 2.000 meter dpl dan merupakan wilayah pegunungan terjal. Sugapa merupakan distrik dengan wilayah paling lembab di Papua karena memiliki curah hujan tinggi sebesar 3.500-4.000 mm per tahun [16]. Selain itu wilayah ini memiliki akses transportasi yang terbatas dan hanya memiliki akses utama berupa Bandara Bilogai. Hal tersebut terjadi karena jalur darat yang sering tertutup longsor dan rawan adanya penyergapan [17]. Wilayah ini menjadi titik strategis operasi TNI–Polri menghadapi kelompok separatis bersenjata (TPNPB-OPM). Kontak senjata sering terjadi di sekitar Sugapa dan Hitadipa, menyebabkan gugurnya aparat serta korban warga sipil yang terluka [18]. Media melaporkan bahwa medan berat dan kondisi cuaca ekstrem menyebabkan banyak prajurit mengalami cedera fisik dan kelelahan berat [19].

METODE PENELITIAN

Pengumpulan data dilakukan melalui proses penelusuran basis data akademik dan publikasi resmi dengan fokus pada material Kevlar, Polyurea, perlengkapan militer dan Distrik Sugapa, Intan Jaya, Papua. Berdasarkan sumber yang telah dianalisis dalam penelitian tersebut, mencakup: 18 artikel yang ditinjau pada sifat mekanik komposit material Kevlar, karakteristik material coating Polyurea, dan rekayas dan 4 berita atau laporan resmi dari sumber terpercaya untuk memberikan data kontekstual mengenai tantangan geografis dan iklim serta urgensi konflik pada Distrik Sugapa, Intan Jaya, Papua

Analisis data dilakukan dengan menggunakan metode deskriptif-kualitatif dengan mencakup beberapa langkah, diantaranya identifikasi kata kunci pada setiap sumber, mengklasifikasi data berdasarkan kesesuaian aspek material yang akan digunakan (Kevlar dan Polyurea) serta aspek aplikasi material (kondisi medan Sugapa. Data yang telah dikumpulkan dianalisis dengan membandingkan data dan mengintegrasikan data data tersebut untuk membangun argumen yang logis terkait dengan urgensi penggunaan komposit Kevlar-Polyurea sebagai bahan baku sepatu PDL. Berdasarkan data yang telah didapatkan dilakukan perumusan kesimpulan secara teoritis dan

memberikan rekomendasi praktis mengenai kelayakan material yang digunakan untuk mendukung efektivitas operasi militer di medan Sugapa

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis yang dilakukan secara komprehensif terhadap pengaruh pelapisan Polyurea terhadap kain Kevlar dengan metode coating spray. Berikut disajikan data yang merangkum hasil uji Batas Balistik (V_{bl}) sebagai indikator kinerja utama, serta perubahan Gaya Tarik Benang (F_{pull}) yang memengaruhi mekanisme penyerapan energi dan mengubah Mode Kegagalan material saat terkena dampak dari adanya pembebanan.

Tabel 1 Hasil Uji *Impact* Material Kevlar [10]

No	Konfigurasi Material	Densitas Area Akhir (g/m^2)	Kecepatan Balistik Limit (m/s)	Peningkatan (%)	Penyerapan Energi Spesifik ($\text{J.m}^2/\text{g}$)
1	Neat Fabric	202.00	90.8	-	40.8
2	0.2 mm PU-F	405.88	143.5	+58.0%	51.1
3	0.2 mm PU-B	403.56	128.8	+41.9%	38.2
4	0.4 mm PU-F	611.22	140.55	+54.8%	32.5
5	0.4 mm PU-B	612.55	112.58	+24.0%	22.7
6	0.6 mm PU-F	810.33	135.35	+49.1%	23.1
7	0.6 mm PU-B	811.11	110.50	+21.7%	18.1
8	0.8 mm PU-F	1013.33	128.92	+42.0%	15.3
9	0.8 mm PU-B	1014.56	116.92	+28.8%	11.6
10	1.0 mm PU-F	1215.00	128.80	+41.9%	12.8
11	1.0 mm PU-B	1215.89	102.45	+12.8%	9.1

Analisis komprehensif membuktikan terhadap data performa material, dapat disimpulkan bahwa material Kevlar dengan coating polyurea 0.2 mm pada lapisan coating depan (PU-Front) merupakan konfigurasi yang optimal. Material tersebut memiliki kecepatan balistik tertinggi sebesar 143.5 m/s yang berarti adanya peningkatan proteksi sebesar 58% dibandingkan dengan adanya kain Kevlar polos. Selain itu material Kevlar dengan coating polyurea 0.2 mm pada lapisan coating depan memiliki efisiensi penyerapan energi tertinggi sebesar 51.1 J.m²/g. Sehingga kombinasi dengan material tersebut merupakan proteksi maksimum untuk urgensi kebutuhan operasional militer.

Analisis mendalam dilakukan untuk memperlihatkan fenomena bahwa ketebalan coating yang lebih besar menunjukkan bahwa adanya performa lebih rendah, hal tersebut dapat terlihat dalam tabel 1, meskipun pada Coating 0.4 mm PU-F menunjukkan peningkatan kecepatan balistik limit sebesar 54.8%, namun penyerapan energi spesifik mengalami penurunan sebesar 32.5 J.m²/g. Penurunan massa menunjukkan bahwa penambahan massa tidak diimbangi dengan peningkatan kemampuan serap energi yang proporsional, sehingga menghasilkan material yang lebih berat namun tidak terjadi benefit tambahan terhadap proteksi. Posisi coating juga menjadi faktor kritis yang mempengaruhi performa material. Dimana pada coating sisi depan menunjukkan nilai yang unggul dibandingkan dengan sisi belakang. Proteksi coating depan yang berfungsi sebagai lapisan buffer pertama saat terjadinya impact dan mengubah mode kegagalan serat dari slip menjadi tensile fracture terbukti efektif untuk menyerap energi dampak.

Integrasi desain fungsional dan keselamatan merupakan faktor utama dalam efektivitas sepatu PDL, dimana efektivitas tersebut bergantung pada desain outsole. Analisis sepatu PDL menggarisbawahi pentingnya meminimalisasikan Jarak Selip Tumit (HSD) dan Kecepatan Selip Tumit Rata-rata (MHSV). Selain itu standar kompresi sebesar 15.000 N dan impact sebesar 200 J dengan material komposit Carbon untuk optimalisasi rasio kekuatan terhadap bobot. Berikut tabel data untuk merangkum nilai metrik kuantitatif dan kualitatif

Tabel 2 Desain Optimal Sepatu [11] [12]

Metrik Biomekanik	Simbol/ Definisi Spesifik	Minimalis Tactical Boot (MIN)	Standard Issue BOOT (STD)	Signifikasi Desain untuk Distrik Sugapa
Jarak Selip Tumit	HSD (Heel Slip Distance): Jarak horizontal yang ditempuh tumit sebelum friksi maksimum dicapai.	14.8 ± 6.8 mm	22.1 ± 10.9 mm	Desain outsole harus meminimalkan HSD dimana harus mendekati 14.8 mm untuk menghentikan adanya selip cepat, dan mengurangi adanya resiko jatuh di permukaan licin
Kecepatan Selip Tumit Rata-rata	MHSV (Mean Heel Slip Velocity): Laju kecepatan horizontal rata-rata tumit selama fase awal selip	0.21 ± 0.12 m/s	0.34 ± 0.17 m/s	Desain yang ringan dan fleksibel menghasilkan MHSV yang rendah dan memberikan personel waktu reaksi yang kritis untuk memulihkan keseimbangan di medan berlumpur
Koefisien Gesek	CoF (Coefficient of Friction): Rasio gaya gesek terhadap gaya normal	N/A (harus tinggi)	N/A (harus tinggi)	CoF wajib memiliki nilai >0.5 untuk keamanan minimal membawa beban

Desain *outsole* (sol luar) merupakan faktor penting bagi kontrol selip yang cepat, dimana sepatu PDL yang optimal untuk medan basah, licin dan berlumpur di Sugapa sehingga diperlukan adanya desain *outsole* yang tepat.

Data yang telah disajikan oleh tabel 2 tersebut menunjukkan bahwa adanya desain yang ringan dan fleksibel (Minimalis Tactical Boot) memiliki performa anti selip yang unggul dibandingkan sepatu standar yang kaku. Hal tersebut dapat terlihat dari beberapa faktor, diantaranya adalah

1. Desain minimalis mengurangi jarak selip tumit hingga 14.8 mm (lebih pendek 22.1 mm).

Sehingga sepatu segera mendapatkan kembali friksi saat terjadi selip dan hal tersebut meminimalisasikan potensi adanya jatuh)

2. Desain minimalis menghasilkan kecepatan selip tumit rata rata yang lebih rendah. Hal tersebut menyebabkan pengguna sepatu diberikan waktu kritis untuk memulihkan keseimbangan di medan berlumpur

Outsole dengan desain minimalis harus diterapkan pada sepatu PDL dengan menggunakan pola tapak yang agresif sehingga memiliki daya cengkeram yang tinggi untuk menjamin Koefisien Gesek (CoF) tinggi. Sehingga stabilitas dinamis dapat dipastikan dan mengurangi adanya risiko cedera di medan ekstrem.

KESIMPULAN

Penelitian menunjukkan pengaruh pelapisan Polyurea (PU) terhadap material Kevlar secara signifikan meningkatkan kinerja balistik dan sifat mekanik dari material komposit. Dimana kinerja optimum dicapai pada ketebalan coating dengan variasi lapisan depan sebesar 0.2 mm. Lapisan tersebut menunjukkan adanya peningkatan kerja balistik sebesar 51.1%. Karena coating yang terlalu tebal menyebabkan penurunan efisiensi penyerapan energi dan menyebabkan adanya kekakuan pada material. Mekanisme peningkatan penyerapan energi terjadi karena *coating* akan bertindak sebagai matriks perekat yang meningkatkan friksi antar-benang, sehingga mengubah mode kegagalan menjadi *tensile fracture*. Sehingga *Coating* Polyurea merupakan solusi efektif untuk pengembangan material Kevlar yang lebih unggul dan inovatif, karena menawarkan peningkatan perlindungan balistik, ketahanan terhadap benturan dan abrasi serta memperthankan sifat ringan dan fleksibel untuk aplikasi medan operasi tempur di Sugapa, Papua

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Majumdar, B. S. Butola, dan A. Srivastava, "Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear

- thickening fluid,” *Materials and Design*, vol. 54, pp. 295–300, 2014. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.067
- [2] A. Krzak, A. J. Nowak, J. Frolec, T. Kralik, D. Boroński, M. Kotyk, M. Bogacka, dan G. Matula, “Structure and properties of a multilayer composite material for cryogenic applications: From laboratory to industrial scale,” *Polymer Testing*, vol. 152, Art. no. 108999, 2025. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2025.108999
- [3] M. J. Siddiqui, P. K. Balguri, K. Haripriya, A. R. Rajendran, dan I. V. Patil, “Analysis of type IV hydrogen pressure vessel with S-glass, Carbon fiber T700 and Kevlar composite materials,” dalam *Proc. 14th Int. Conf. Mater. Proc. Charact.*, Hyderabad, India, 2023, DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.646
- [4] Yao, S., Wu, S., Yuan, C., Shi, L., & Wang, H. (2025). Structure generation and rolling strain prediction of layered composite materials based on Transformer model. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*, Nantong, China. *Materials Today Communications*, 49, 113915. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113915J>.
- [5] Lv, J., Wang, J., Zhang, T., Yang, B., Zhen, Z., Zheng, Y., & Wang, Y. (2023). Preparation and characterization of Kevlar nanofiber based composite phase change material with photo/electro-thermal conversion properties. In *Proceedings of the Energy Storage and Conversion Conference*, Lanzhou, China. *Journal of Energy Storage*, 61, 106771. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106771>
- [6] H. Yang, *Kevlar Aramid Fiber*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1993.
- [7] Anand Narayanan Nair, Santhosh Sundharesan, and Issa Saif Mohammed Al Tubi, “Kevlar-based Composite Material and its Applications in Body Armour: A Short Literature Review,” in *Proceedings of the ZICMSE 2020*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Al-Muladha, Sultanate of Oman. DOI:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012003>
- [8] Sen Yang, Vijaya B. Chalivendra, and Yong K. Kim, “Fracture and Impact Characterization of Novel Auxetic Kevlar/Epoxy Laminated Composites,” in *Proceedings of the Composite Structures Symposium*, Elsevier Conference Series, North Dartmouth, MA, United States. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.034>
- [9] P. Pasbakhsh, D. Mohotti, dan K. Palaniandy, Eds., *Polyurea: Synthesis, Properties, Composites, Production, and Applications*. Amsterdam, Belanda: Elsevier, 2023.
- [10] Xing Li, Mengqi Yuan, Chunyang Huang, and Shaowu Wang, “Influence of Surface Polyurea Coating on the Ballistic Performance of Kevlar Fabric,” in *Heliyon Conference on Advanced Protective Materials*, Beijing, China. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29113>.
- [11] Harish Chander, Adam C. Knight, John C. Garner, Chip Wade, Daniel W. Carruth, Hunter DeBusk, and Christopher M. Hill, “Impact of Military Type Footwear and Workload on Heel Contact Dynamics During Slip Events,” in *International Conference on Industrial Ergonomics and Human Factors*, Mississippi State, MS, USA. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.02.008>
- [12] H. N. Firmansyah, A. B. Anggoro, dan E. Safriana, “Kajian Awal Material Pembuat Toe cap (Safety shoes) Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 3, pp. 379–390, 2021.
- [13] Y. Li et al., “Hydrogen bonding and phase morphology in segmented polyurea elastomers,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 35, p. 50856, 2021.
- [14] R. Zhang, W. Huang, P. Lyu, S. Yan, X. Wang, dan J. Ju, “Polyurea for Blast and Impact Protection: A Review,” *Polymers*, vol. 14, no. 13, p. 2670, 2022. Sdoi: 10.3390/polym14132670.
- [15] J. Liu, G. Zhang, L. Liu, Y. He, Y. Wu, Z. Wang, and Y. Li, “Study on blast resistance and energy dissipation mechanism of reinforced concrete-polyurea composite slabs under long duration blast loading of thermobaric explosives,” *Eng. Struct.*, vol. 345, no. 121440, 2025.

- ◆ 
- [16] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Papua, Laporan iklim Papua Tengah 2022. Jayapura: BMKG Regional Papua, 2022.
 - [17] TNI Angkatan Udara, "Wujudkan Jembatan Udara di Papua, Satgas Yonko 465 Kopasgat Berhasil Operasionalkan Bandara Bilogai Distrik Sugapa," (14 Mei 2024). [Daring]. Tersedia: <https://tni-au.mil.id/berita/detail/wujudkan-jembatan-udara-di-papua-satgas-yonko-465-kopasgat-berhasil-operasionalkan-bandara-bilorai-distrik-sugapa..>
 - [18] Kompas, "Dua Prajurit TNI Gugur akibat Kontak Senjata dengan KKB di Intan Jaya," (22Jan2021).[Daring].Tersedia:<https://nasional.kompas.com/read/2021/01/22/17015921/dua-prajurit-tni-gugur-akibat-kontak-senjata-dengan-kkb-di-intan-jaya>.
 - [19] Antara News, "TNI tingkatkan operasi di Intan Jaya, sejumlah prajurit alami luka akibat medan berat," Mei 15, 2023. [Daring]. Tersedia: <https://www.antaranews.com>
 - [20] A. Hassan, R. Kumar, dan D. Sharma, "Environmental durability and fatigue performance of aramid-based composite materials," J. Reinf. Plast. Compos., vol. 41,2022.
 - [21] A. K. Kaw, Mechanics of Composite Materials, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.