



Analisa Perbandingan Sifat Mekanik Komposit *Carbon Fibre* dan *Boehmeria Nivea* Berpenguat *Epoxy* Pada Struktur Satelit dengan Menggunakan Uji *Impact*

***Comparative Analysis Of The Mechanical Properties Of Carbon Fiber–Epoxy And
Boehmeria Nivea–Epoxy Composites As Satellite Structural Applications Using
Impact Testing***

Ariiq Naufal Matondang¹, Sya'ban Tri Hernawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Aeronautika Pertahanan, Akademi Angkatan Udara
E-mail: matondangariiq@gmail.com

Abstract— *Composite materials are an important innovation in aerospace technology due to their high strength-to-weight ratio, light weight, and resistance to corrosion. This study analyzes the toughness of carbon fiber–epoxy composites and Boehmeria nivea (ramie)–epoxy composites compared to aluminum alloy 7075-T651 as a reference material for satellite structural applications. The composite specimens were fabricated using the vacuum bag method and tested with the Charpy impact test to determine their energy absorption and toughness characteristics. The results show that fiber type and the number of layers significantly affect impact strength. The carbon fiber–epoxy composite achieved an average fracture energy of 63 Joules (0.39 J/mm²), while the hybrid carbon–ramie composite reached 71.8 Joules (0.49 J/mm²). In contrast, aluminum alloy 7075-T651 produced only 15.5 Joules (0.193 J/mm²). These results indicate that composite materials possess greater toughness, making them promising alternatives for satellite structural materials. It can be concluded that the carbon fiber–epoxy composite provides the most stable performance, while the hybrid carbon–ramie composite offers the highest toughness but exhibits greater variation due to the nonuniformity of natural fiber distribution. Therefore, the hybrid composite requires better control during the manufacturing process.*

Keywords— *Composite, carbon fiber, Boehmeria nivea, epoxy, aluminum 7075, impact test, satellite structure.*

Abstrak— *Material komposit merupakan inovasi penting dalam pengembangan teknologi kedirgantaraan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ringan, dan tahan terhadap korosi. Penelitian ini menganalisis perbandingan ketangguhan komposit serat karbon berpenguat epoxy dan komposit Boehmeria nivea (rami) berpenguat epoxy terhadap material aluminium alloy 7075-T651 sebagai pembandingan untuk aplikasi struktur satelit. Spesimen komposit dibuat dengan metode Vacuum Bag dan diuji menggunakan uji impak metode Charpy guna mengetahui energi serap dan ketangguhan material. Hasil menunjukkan jenis serat dan jumlah lapisan berpengaruh signifikan terhadap kekuatan impak. Komposit serat karbon memiliki energi patah rata-rata 63 Joule (0,39 J/mm²), sedangkan komposit hibrid karbon–rami mencapai 71,8 Joule (0,49 J/mm²). Sebagai pembandingan, aluminium 7075-T651 hanya menghasilkan 15,5 Joule (0,193 J/mm²). Komposit serat karbon memberikan performa paling stabil, sementara komposit hibrid menawarkan ketangguhan tertinggi namun dengan variasi hasil yang cukup besar akibat ketidakseragaman serat alami. Hasil ini diharapkan menjadi acuan pengembangan material ringan dan tangguh untuk struktur satelit di masa depan.*

Kata Kunci— *Komposit, serat karbon, Boehmeria nivea, epoxy, aluminium 7075, uji impak, struktur satelit.*

*Ariiq Naufal Matondang
E-mail: matondangariiq@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Perkembangan wahana antariksa saat ini telah menjadi salah satu indikator kemajuan suatu negara. Dalam era eksplorasi luar angkasa yang berkembang pesat, kebutuhan akan material yang kuat dan ringan sangat penting untuk struktur satelit, seperti satelit komunikasi, penginderaan jauh, dan ilmiah. Material yang digunakan untuk pembuatan struktur utama umumnya adalah *Aluminium Alloy 7075 T651*, seperti pada satelit LAPAN-ORARI/A2. Satelit di *Low Earth Orbit* (LEO), seperti LAPAN-ORARI/A2, berisiko terkena *micrometeoroid and orbital debris* (MMOD) yang bergerak hingga 10 km/s, sehingga memerlukan material yang tangguh.

Penggunaan material komposit telah menjadi inovasi penting dalam berbagai industri, termasuk otomotif, penerbangan, dan luar angkasa, karena menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi. Komposit *carbon fiber* berpenguat *epoxy* adalah material yang sangat kuat, ringan, dan tahan terhadap korosi, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi di industri ruang angkasa. Di sisi lain, komposit serat rami (*Boehmeria nivea*) berpenguat *epoxy* menawarkan keunggulan dalam hal keberlanjutan dan biaya produksi yang lebih rendah, serta sifat mekanik yang baik. Kedua jenis komposit ini memiliki potensi besar untuk digunakan dalam aplikasi luar angkasa.

Beberapa tantangan utama dalam studi aplikasi komposit pada struktur satelit adalah mengatasi ketidakseragaman sifat mekanik material alami dan membandingkan ketangguhannya terhadap material *space qualified* seperti *aluminium alloy 7075*. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai ketahanan dampak komposit berpenguat serat untuk aplikasi ruang angkasa. Penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan rekomendasi material alternatif yang lebih ringan dan tangguh untuk struktur satelit di masa depan.

II. LANDASAN TEORI

A. Komposit

Komposit adalah salah satu jenis material yang terdiri dari dua atau lebih material yang berbeda, yang digabungkan tanpa terjadi reaksi kimia. Material komposit adalah material *multi-fase*, di mana pencampurannya tidak terjadi reaksi secara kimia. Sifat material komposit merupakan paduan dari sifat-sifat material penyusunnya, yaitu matriks dan penguat (*reinforcement*) atau pengisi (*filler*), di mana keduanya memiliki sifat yang berbeda. Keunggulan material ini adalah kuat, kaku, dan ringan, namun kelemahannya adalah harga yang mahal dan kemungkinan mengalami delaminasi.

B. Satelit ORARI/A2

Satelit LAPAN-ORARI/A2 (LAPAN-A2) merupakan mikrosatelit buatan Indonesia yang beroperasi pada Low Earth Orbit (LEO). Struktur utama satelit ini menggunakan material Aluminium Alloy 7075-T651. Pemilihan material ini didasarkan pada keunggulannya dalam rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta statusnya sebagai material yang telah teruji dan memenuhi kualifikasi untuk lingkungan luar angkasa (*space qualified*). Satelit yang berada di orbit rendah memiliki risiko tinggi terhadap benturan dari Micrometeoroid and Orbital Debris (MMOD) yang dapat bergerak hingga kecepatan 10 km/s. Dalam konteks ketahanan dampak, hasil penelitian menunjukkan bahwa Aluminium 7075-T651 memiliki energi patahan dampak yang relatif rendah, yaitu sekitar 15,5 J. Hal ini memberikan justifikasi kuat untuk melakukan evaluasi

terhadap komposit serat karbon dan komposit hibrid sebagai alternatif material struktural yang lebih tangguh. Meskipun aluminium telah memenuhi kualifikasi ruang angkasa, material ini masih dapat digantikan sebagian oleh komposit serat karbon yang lebih ringan untuk menurunkan massa total tanpa mengorbankan kekakuan struktural.

C. Uji Impak

Software Uji impak merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk mengukur ketahanan bahan terhadap beban kejut atau beban yang datang secara tiba-tiba. Hal ini yang membedakannya dengan pengujian tarik dan kekerasan, di mana pembebanan dilakukan secara perlahan. Secara umum, metode pengujian impak terdiri dari dua jenis, yaitu Metode Charpy dan Metode Izod. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode Charpy, di mana spesimen uji diletakkan secara mendatar (horizontal) pada dua tumpuan dan arah pembebanan berlawanan dengan arah takikan. Kelebihan Metode Charpy adalah hasil pengujian yang lebih akurat dan pengerjaannya lebih mudah dilakukan serta dipahami. Alat uji impak yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1.

Energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen (E) diukur dari perbedaan ketinggian atau sudut ayunan pendulum sebelum dan sesudah menumbuk spesimen. Energi impak (E) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E = P \cdot D(\cos \beta - \cos \alpha) - L \quad (1)$$

Setelah didapatkan nilai energi impak, Kekuatan Impak (Impact Strength) atau yang disebut juga Harga Impak (HI) dapat ditentukan. Harga impak didefinisikan sebagai energi yang diserap per satuan luas penampang patah. Persamaan untuk menghitung harga impak adalah:

$$HI = \frac{E}{A} (\text{J/mm}^2) \quad (2)$$

dengan E merupakan energi yang diperlukan untuk mematahkan benda uji (Joule), dan A adalah luas penampang di luar takikan ($\{\text{mm}\}^2$).



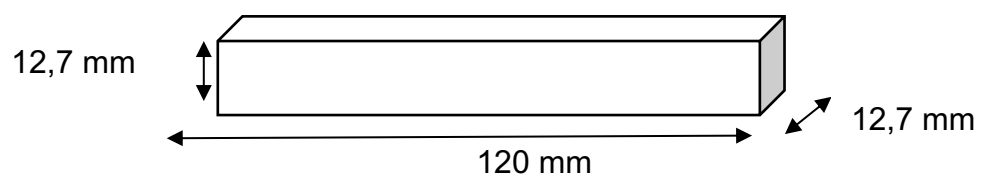
Gambar 1. Alat Uji Impak Charpy

D. Prinsip Dasar dalam Pembuatan Komposit.

Dalam pembuatan Jenis benda uji yang akan dibuat adalah komposit lapis (laminates composites), yang merupakan komposit berlapis-lapis, di mana sedikitnya terdiri dari dua serat yang digabung menjadi satu lapisan. Sebelum melaksanakan percobaan, peneliti harus menyediakan alat dan bahan untuk membuat benda uji komposit sebanyak tiga buah, dan setiap benda uji akan dipotong menjadi spesimen sesuai dengan kebutuhan pengujian. Setelah spesimen disiapkan, peneliti akan menyiapkan alat uji untuk melakukan pengujian impact, yang bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan dan ketahanan dari masing-masing jenis komposit, yang sangat penting untuk aplikasi pada struktur satelit.

E. Dimensi Spesimen Komposit.

Seluruh spesimen komposit yang digunakan dalam penelitian ini, baik spesimen komposit serat karbon murni maupun komposit hibrid serat karbon-rami, dipersiapkan sesuai dengan standar pengujian ASTM D5942-96 untuk uji impact metode Charpy. Standar ini mengatur ukuran spesimen agar hasil pengujian dapat diperoleh secara valid dan dapat dibandingkan antar material. Setiap spesimen komposit yang telah diproduksi melalui proses vacuum bag dan curing kemudian dipotong dengan dimensi panjang 120 mm, lebar 12,7 mm, dan tebal 12,7 mm. Dimensi ini diukur secara akurat menggunakan caliper sebelum dilakukan pengujian, karena luas penampang patah (A) digunakan sebagai pembagi dalam perhitungan Harga Impact (HI) untuk menormalisasi data hasil pengujian seperti yang tersaji pada Gambar 2. berikut ini.



Gambar 2. Ukuran Spesimen ASTM D5942-96

F. Aluminium Alloy 7075 T651

Aluminium Alloy 7075 adalah salah satu paduan aluminium paling kuat yang tersedia secara komersial, menjadikannya material pilihan utama untuk aplikasi struktural bertegangan tinggi, terutama dalam industri kedirgantaraan dan pesawat terbang. Paduan ini diklasifikasikan dalam Seri 7000 karena elemen paduan utamanya adalah Seng (Zn), bersama dengan Magnesium (Mg) dan Tembaga (Cu). Kombinasi elemen-elemen ini, khususnya pembentukan presipitat $MgZn_2$ melalui perlakuan panas, menghasilkan peningkatan kekuatan yang luar biasa. Berikut ukuran specimen aluminium yang digunakan tersaji pada Gambar 3. di bawah ini.

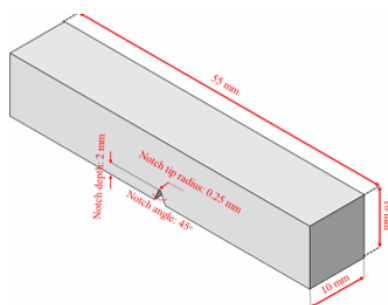


Fig. 1. Standard specimen dimensions of Charpy impact test.

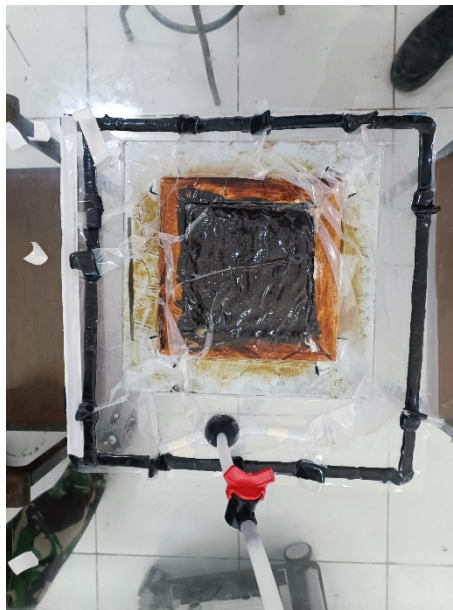
Gambar 3. Ukuran Spesimen *Aluminium Alloy 7075 T651*

Material Aluminium Alloy 7075-T651 memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dengan massa jenis sekitar $2,81 \text{ g/cm}^3$, sehingga sangat ideal untuk struktur satelit yang menuntut efisiensi massa dan kekuatan tinggi. Material ini juga memiliki kekakuan tinggi dengan modulus elastisitas sekitar 72 GPa serta ketahanan baik terhadap kelelahan, menjadikannya cocok untuk komponen yang mengalami beban siklik dan getaran tinggi. Secara mekanik, kekuatan tarik ultimate berada pada kisaran 570–746 MPa, kekuatan luluh sekitar 500–530 MPa, dan energi patah impak relatif rendah, yaitu sekitar 15,5 J. Kombinasi sifat tersebut menjadikan Aluminium 7075-T651 banyak digunakan pada struktur utama satelit, meskipun sifat impaknya yang rendah membuka peluang penggunaan material alternatif seperti komposit serat karbon atau komposit hibrid untuk peningkatan ketangguhan dan pengurangan massa.

III. METODE/MODEL YANG DIUSULKAN

Bab ini berisikan diagram alir (*flowchart*) yang meliputi proses penelitian, uraian data secara rinci mengenai penelitian, variabel penelitian, alat atau instrumen untuk mengumpulkan data, prosedur pengambilan pengumpulan data dengan menggunakan alat uji impak *charpy*. Hasil spesimen berupa sepuluh spesimen dengan masing masing 5 per komposit dan fraksi volume yang telah ditentukan sebelumnya. Spesimen akan diuji untuk mengetahui tingkat ketangguhan (*toughness*) dari komposit tersebut. Penjelasan singkat mengenai tahapan penelitian yang dilaksanakan adalah sebagai berikut :

1. Pada tahap awal adalah mencari materi yang berhubungan dengan tugas akhir dengan judul dan materi yang telah ditentukan yaitu mencari informasi mengenai bahan struktur pada satelit ORARI/A2.
2. Selanjutnya adalah pembuatan spesimen komposit dengan total 10 spesimen dengan fraksi volume yang telah ditentukan sebelumnya, kemudian diuji dan dianalisis hasilnya. Dari hasil pengujian dan analisis dapat diketahui sifat ketangguhan pada komposit dan potensinya untuk menjadi bahan alternatif satelit. Pembuatan spesimen dan hasilnya seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5 berikut.



Gambar 4. Pembuatan Spesimen



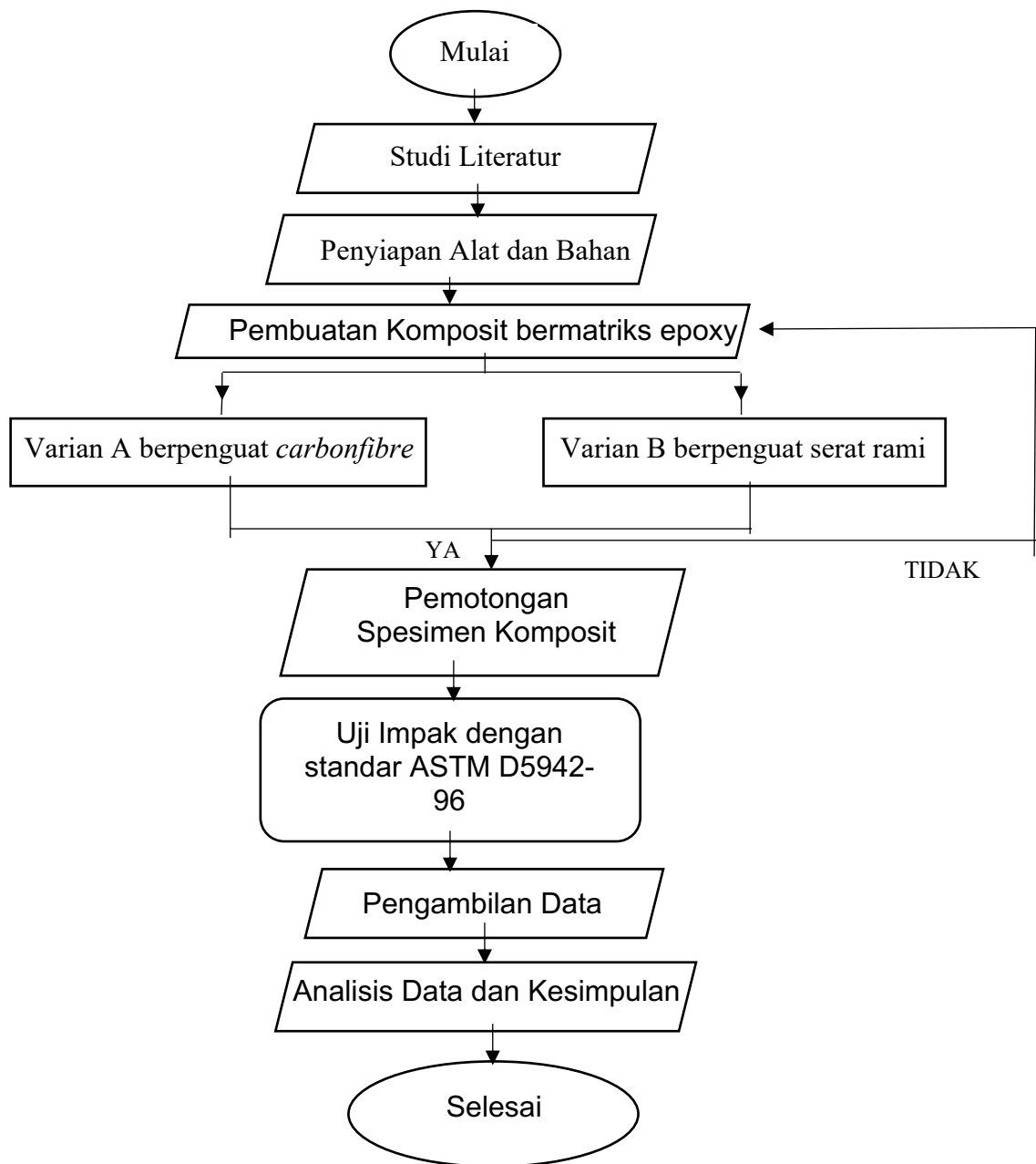
Gambar 5. Hasil Spesimen

3. Sepuluh spesimen komposit carbon fibre dan komposit hybrid dibentuk sesuai ukuran standar ASTM D5942-96. Kemudian dilaksanakan pengujian impak untuk mengetahui ketangguhan pada komposit tersebut.
4. Hasil pengujian didapat hasil sebagai berikut :
 - a. Komposit hibrid yang menggabungkan serat karbon dan serat rami menunjukkan energi patah rata-rata tertinggi sebesar 71,8 J, dengan nilai Harga Impak (HI) sebesar 0,49 J/mm². Keunggulan ini berasal dari efek sinergis antara kedua jenis serat, di mana serat rami (*Boehmeria nivea*) meningkatkan ketangguhan dan kemampuan penyerapan energi melalui mekanisme *fiber pull-out*. Meskipun demikian, komposit hibrid memperlihatkan

sebaran nilai impak yang lebih luas antarspesimen. Variasi ini disebabkan oleh ketidakseragaman karakteristik serat alami serta distribusi serat yang tidak sepenuhnya homogen selama proses manufaktur, sehingga diperlukan kontrol proses yang lebih baik untuk memperoleh hasil yang konsisten.

b. Komposit serat karbon murni menghasilkan energi patah rata-rata sebesar 63,0 J dengan nilai Harga Impak (HI) 0,39 J/mm². Serat karbon memberikan kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*rigidity*) yang tinggi, menjadikan material ini memiliki performa paling stabil pada pengujian impak dibandingkan variasi komposit lainnya.

Diagram alir penyusun penelitian ini digambarkan pada gambar dibawah ini



Gambar 4. Diagram Alir

IV. HASIL/IMPLEMENTASI MODEL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian

Berikut merupakan tahapan pengujian impak yang dilakukan terhadap spesimen komposit serat karbon murni dan komposit hibrid serat karbon–rami. Setelah seluruh spesimen dipersiapkan sesuai standar dan dilakukan pengukuran dimensi, pengujian dilakukan menggunakan metode Charpy dengan parameter dan prosedur yang telah ditentukan. Analisis pengujian difokuskan pada pengaruh perbedaan jenis material komposit terhadap karakteristik energi patah dan nilai Harga Impak (HI) untuk menilai kemampuan material dalam menyerap energi akibat beban kejut.

B. Pembahasan

Pengujian impak metode Charpy menunjukkan adanya perbedaan ketangguhan yang signifikan antar material. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa material komposit, baik komposit serat karbon murni maupun komposit hibrid serat karbon–rami, memiliki kemampuan menahan beban kejut yang jauh lebih tinggi dibandingkan Aluminium 7075-T651. Aluminium 7075-T651 memiliki energi impak terendah sebesar 15,5 J dengan nilai harga impak sebesar 0,193 J/mm². Data ini konsisten dengan hasil penelitian Hosseinzadeh et al. (2020) yang melaporkan energi impak Aluminium 7075-T651 mendekati 15,7 J, sehingga memperkuat bahwa material komposit memiliki keunggulan dalam aplikasi struktur yang memerlukan kekuatan sekaligus ketangguhan. Adapun hasil pengujian impak tersaji pada Tabel I dan Tabel II di bawah ini.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN IMPAK

Spesimen	Energi (Joule)	Luas Penampang (mm ²)	Harga Impak (J/mm ²)	E _(setara) (Joule)
Carbon A1	84	161.29	0.52	84
Carbon A2	59	161.29	0.37	59
Carbon A3	55	161.29	0.34	55
Carbon A4	65	161.29	0.40	65
Carbon A5	52	161.29	0.32	52
Rata-rata Carbon	63	161.29	0.39	63
Hybrid B1	86	161.29	0.53	86
Hybrid B2	129	161.29	0.80	129
Hybrid B3	109	161.29	0.67	109
Hybrid B4	31	161.29	0.19	31
Hybrid B5	44	161.29	0.27	44
Rata-rata Hybrid	71.8	161.29	0.49	71.8
Aluminium 7075	15.5	80	0.193	31.19

TABEL II
HASIL AWAL PENGUJIAN IMPAK

Benda Uji	Spesimen	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas (mm ²)	Panjang Pendulum (m)	Berat Pendulum (kg)	α (°)	β (°)
Serat Karbon Murni	A1	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	85,8
Serat Karbon Murni	A2	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	101,8
Serat Karbon Murni	A3	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	104,4
Serat Karbon Murni	A4	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	97,8
Serat Karbon Murni	A5	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	106,5
Komposit Hybrid (Carbon Fibre + Rami)	B1	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	84,4
Komposit Hybrid (Carbon Fibre + Rami)	B2	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	54,7
Komposit Hybrid (Carbon Fibre + Rami)	B3	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	69,3
Komposit Hybrid (Carbon Fibre + Rami)	B4	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	121,2
Komposit Hybrid (Carbon Fibre + Rami)	B5	12,7	12,7	161,3	0,65	14	150	111,8

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel di atas, menunjukkan bahwa jenis serat dan jumlah lapisan yang digunakan berpengaruh signifikan terhadap ketahanan spesimen terhadap beban impact. Serat karbon memberikan sifat kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*rigidity*) yang tinggi, sedangkan serat rami (*Boehmeria nivea*) berkontribusi terhadap peningkatan ketangguhan (*toughness*) dan kemampuan penyerapan energi. Kombinasi kedua jenis serat ini pada komposit hibrid menghasilkan efek sinergis yang mampu meningkatkan nilai harga impact dibandingkan penggunaan serat karbon murni. Temuan ini sejalan dengan penelitian Wijoyo (2022) yang menyatakan bahwa kombinasi antara serat alami dan serat sintetis dapat meningkatkan kemampuan absorpsi energi material komposit.

Komposit hibrid serat karbon–rami menunjukkan energi impact rata-rata tertinggi sebesar 71,8 J dengan harga impact sebesar 0,49 J/mm². Namun, variasi nilai impact pada komposit hibrid relatif lebih besar dibandingkan komposit serat karbon murni. Variasi ini disebabkan oleh sifat alami serat rami yang higroskopis serta ketidakseragaman penyebarannya selama proses produksi, yang menyebabkan variasi lokal dalam kekuatan ikatan antara serat dan matriks. Hal ini sejalan dengan pernyataan Faruk et al. (2014) bahwa komposit hibrid berbasis serat alami memiliki potensi peningkatan ketangguhan, namun cenderung menunjukkan penyebaran nilai hasil yang lebih luas akibat sifat alami seratnya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian impak metode Charpy, komposit hibrid serat karbon–rami menunjukkan performa paling unggul dibandingkan material lainnya, dengan energi patah rata-rata sebesar 71,8 J dan harga impak 0,49 J/mm². Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan Aluminium 7075-T651 yang hanya mencapai energi patah 15,5 J dengan harga impak 0,193 J/mm², serta lebih baik dibandingkan komposit serat karbon murni yang memiliki nilai energi impak 63,0 J dan harga impak 0,39 J/mm². Peningkatan performa ini disebabkan oleh efek sinergis antara serat karbon yang berperan dalam memberikan kekuatan dan kekakuan struktural dengan serat rami yang berfungsi meningkatkan ketangguhan dan kemampuan penyerapan energi akibat beban kejut. Kombinasi kedua jenis serat ini menghasilkan komposit dengan karakteristik yang seimbang antara kekuatan dan fleksibilitas, sehingga lebih mampu menahan energi tumbukan tanpa mengalami kegagalan dini. Meskipun demikian, komposit hibrid menunjukkan variasi nilai impak yang lebih besar antarspesimen akibat sifat higroskopis serat rami serta ketidakseragaman penyebaran serat selama proses manufaktur. Hal ini menunjukkan pentingnya pengendalian proses produksi untuk menjaga konsistensi kualitas mekanik material. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa komposit hibrid serat karbon–rami memiliki potensi tinggi sebagai material alternatif pengganti sebagian struktur Aluminium 7075-T651 pada satelit, karena mampu menawarkan kombinasi optimal antara kekuatan, ketangguhan, dan efisiensi massa yang mendukung peningkatan kinerja serta keandalan struktur luar angkasa.

REFERENSI

- [1] Azissyukhron, M., & Syarif, H. (2018). Perbandingan kekuatan material hasil metode hand lay-up dan metode vacuum bag pada material sandwich composite. *Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*, 9(Vol 9), 216–220.
- [2] B.S. Kukreja, & Löfström, J. (2009). Composites in the aircraft industry. Retrieved from https://www.appropedia.org/Composites_in_the_Aircraft_Industry
- [3] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [4] Jnsta, Technology Adpertisi, Kajang, G., & Fahar, A. A. (2024). Analisis sifat mekanik material komposit berpenguat serat karbon. *Journal of Natural Science*, 4(2), 18–22.
- [5] Maraki, M. R., Hosseinzadeh, A., Ghahremani-Moghadam, D., & Sadidi, M. (2020). Investigation of the notch angle effect on Charpy fracture energy in 7075-T651 aluminum alloy. *Journal of Stress Analysis*, 5(2), 123–135.
- [6] Muflikhun, M. A., & Jamasri. (2022). Proses manufaktur dan mekanika komposit. (April), 23.
- [7] Budiantoro, P. A., & Huzain, M. F. (2019). Pengembangan teknologi satelit di Indonesia: Sistem, subsistem, dan misi operasi.
- [8] Romdhani, I., Setiawan, F., & Wicaksono, D. (2024). Manufaktur vacuum resin infusion untuk pembuatan material komposit. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 1(2), 304–324.
- [9] Tjahjanti, P. H. (2018). Buku ajar teori dan aplikasi material komposit dan polimer. <https://doi.org/10.21070/2019/978-602-5914-27-0>
- [10] Widodo, E., & Iswanto. (2019). Buku ajar mekanika komposit dan bio-komposit (Vol. 11).
- [11] Wijoyo, A. B. S., & Suti, S. (2018). Analisa kemampuan absorpsi energi impact dari komposit serat rami chopped-HGM epoxy karbon fiber terhadap impact proyektil peluru.
- [12] Wulandari, F., Komang, I., Widi, A., & Febritasari, R. (2022). Analisa sifat mekanis pada material serat karbon dan resin epoxy dengan variasi laminasi.
- [13] Zhaliilaa, R. G. Z. (2024). Analisis kekuatan uji impak komposit serat fiberglass dan Kevlar dengan metode vacuum assisted resin infusion sebagai alternatif bahan tameng huru-hara KOPASGAT TNI-AU. Yogyakarta: Departemen Aeronautika, Akademi Angkatan Udara.
- [14] Riana, C., Sujana, W., & Anggraeni, Y. (2024). Utilisation of LAPAN-A2 satellite digital spacecam. *AIP Conference Proceedings*, 3106(1), 020009. Retrieved October 25, 2025, from <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3106/1/020009/3294631>
- [15] ARRL News. (2015). LAPAN-A2 FM and APRS satellite launched. Retrieved October 25, 2025, from <https://www.arrl.org/news/lapan-a2-fm-and-aprs-satellite-launched>
- [16] eoPortal. (n.d.). LAPAN-A2 microsatellite of Indonesia. Retrieved October 25, 2025, from <https://www.eoportal.org/satellite-missions/lapan-a2>