MACHINERY JURNAL TEKNOLOGI TERAPAN
VOL.6 NO.3, OKTOBER 2025

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

ANALISIS KETANGGUHAN IMPAK DAN KARAKTER PATAHAN KOMPOSIT *SANDWICH* SERAT RAMI–EPOKSI BERBASIS *CORRUGATE CARDBOARD*

Zulkifli Zulkifli [1)*], Ida Bagus Dharmawan [1)], Syaeful Akbar [1)] Yasmin Zulfati Yusrina [1)] Devina Sanchia Samosir [1)] Mohamad Amin [1)] Rafli Prayoga [1)]

[1)]Program Studi Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Balikpapan, Jl. Soekarno Hatta No. KM. 8 Balikpapan, 76129, Indonesia

[*]email korespondensi: zulkifli.as@poltekba.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Received:
17/10/2025

Received in revised:
07/11/2025

Accepted:
07/11/2025

Online-Published:
25/11/2025

ABSTRAK

Kombinasi serat rami dan resin epoksi dalam struktur sandwich menawarkan keseimbangan antara kekakuan dan massa ringan, terutama ketika menggunakan corrugated cardboard sebagai material inti (core). Namun, pengaruh orientasi serat terhadap kemampuan penyerapan energi impak dan karakteristik patahan pada komposit sandwich berbasis serat alami masih jarang dikaji secara mendalam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh orientasi serat terhadap ketangguhan impak dan morfologi patahan komposit sandwich serat rami–epoksi dengan inti karton bergelombang. Serat rami digunakan sebagai penguat alami karena ringan, terbarukan, dan memiliki kekuatan mekanik yang baik. Panel komposit disusun dalam tiga orientasi serat: longitudinal (0°), transversal (90°), dan tenunan polos (plain weave), menggunakan metode vacuum bagging. Resin epoksi tipe bisfenol-A berfungsi sebagai matriks, sedangkan core berasal dari limbah karton rokok tipe double wall. Pengujian impak dilakukan dengan metode Charpy pada konfigurasi flatwise sesuai ISO 179-1:2023 untuk menilai kemampuan panel dalam menyerap energi tumbukan. Hasil menunjukkan bahwa orientasi serat berpengaruh signifikan terhadap energi serap dan ketangguhan impak. Orientasi 0° menghasilkan energi tertinggi (2,854 J) dan ketangguhan 30,43 kJ/m², sedangkan orientasi 90° dan plain weave menurun masing-masing 36% dan 70%. Pengamatan makroskopik menunjukkan pola kegagalan khas: 0° mengalami micro crack dan core shear fracture; 90° menunjukkan fiber pull-out dan delaminasi; sedangkan plain weave menampilkan fiber bridging dan retak getas. Orientasi longitudinal terbukti memberikan ketangguhan impak terbaik dengan penyaluran beban paling efisien.

***Kata Kunci** : komposit sandwich, serat rami, orientasi serat, ketangguhan impak, morfologi patahan*

ABSTRACT

The combination of hemp fibers and epoxy resin in a sandwich structure offers a balance between stiffness and light weight, especially when using corrugated cardboard as the core material. However, the effect of fiber orientation on impact energy absorption and fracture characteristics in natural fiber-based sandwich composites has rarely been studied in depth. This study aims to analyze the effect of fiber orientation on the impact toughness and fracture morphology of hemp fiber–epoxy sandwich composites with corrugated cardboard cores. Hemp fiber is used as a natural reinforcement because it is lightweight, renewable, and has good mechanical strength. The composite panels were arranged in three fiber orientations —longitudinal (0°), transverse (90°), and plain weave —using the vacuum bagging method. Bisphenol-A epoxy resin served as the matrix, while the core came from double-wall cigarette carton waste. Impact testing was conducted using the Charpy method in a flatwise configuration in accordance with ISO 179-1:2023 to assess the panel's ability to absorb impact energy. The results show that fiber

©2025 The Authors. Published by Machinery: Jurnal Teknologi Terapan (Indexed in SINTA)

doi:
http://doi.org/10.36257/machinery.v6i3.11401

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

orientation significantly affects energy absorption and impact toughness. The 0° orientation produced the highest energy (2.854 J) and toughness of 30.43 kJ/m², while the 90° and plain weave orientations decreased by 36% and 70%, respectively. Macroscopic observations revealed characteristic failure patterns: 0° exhibited microcracks and core shear fractures; 90° showed fiber pull-out and delamination; while plain weave displayed fiber bridging and brittle cracks. Longitudinal orientation provided the best impact toughness and the most efficient load transfer.

Keywords : *sandwich composite, hemp fiber, fiber orientation, impact toughness, fracture morphology*

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan material komposit telah mengalami kemajuan yang signifikan, karena permintaan akan bahan yang ringan, kuat, dan efisien telah meningkat di berbagai domain teknik, termasuk aplikasi pada industri otomotif, kedirgantaraan, konstruksi, dan kelautan. Komposit menghadirkan manfaat mekanis dan *multi* desain yang sulit dicapai dengan bahan tradisional [1]. Beberapa klasifikasi komposit menunjukkan bahwa struktur *sandwich* merupakan salah satu konfigurasi yang paling dicari karena kapasitasnya untuk mengintegrasikan kekakuan yang cukup besar dan massa minimal melalui penggabungan lapisan eksternal yang kuat (*skin*) dan inti internal yang ringan (*core*) [2]. Konfigurasi struktural ini relevan dalam konteks yang memerlukan daya tahan terhadap beban lentur dan dinamis, contohnya pada penutup panel, komponen kendaraan penerbangan, dan *body* mobil [3].

Sesuai dengan kebutuhan akan material yang berkelanjutan, fokus dalam rekayasa material secara progresif beralih dari serat sintetis ke pemanfaatan serat alami sebagai pengganti penguatan komposit. Serat rami, yang diekstraksi dari tanaman *Boehmeria nivea*, telah menunjukkan sifat mekanik yang handal dan dapat mudah terurai secara alami dan ramah lingkungan [4]. Berbeda dengan serat sintetis, seperti serat fiber dan serat karbon, serat rami memberikan manfaat yang signifikan mengenai aksesibilitas, kelayakan ekonomi, dan pengurangan jejak ekologis, sehingga menjadikan serat rami sebagai pilihan yang lebih menguntungkan untuk pembuatan bahan yang ramah lingkungan. Keuntungan ini memberikan peluang besar untuk penelitian yang berfokus pada pemanfaatan serat rami dalam bahan komposit berbasis epoksi, hal ini berlaku untuk konfigurasi *monolitik* dan *sandwich* [5][6].

Keuntungan komposit *sandwich* yang menggunakan *corrugated cardboard* sebagai *core* menjadi semakin signifikan karena sifatnya, seperti kepadatan rendah, biaya yang efisien, dan mudah di daur ulang. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya berkonsentrasi pada komposit *sandwich* yang menggunakan busa atau polimer kaku sebagai *core* pada komposit *sandwich* [7][2]. Pemanfaatan *corrugated cardboard* sebagai bahan *core* masih tergolong sedikit, khususnya dalam hal hubungan strukturalnya dengan lapisan *skin* yang menggunakan serat alami. Selain itu, banyak penelitian terdahulu belum meninjau pengaruh orientasi serat terhadap performa material saat menerima beban impak. Padahal, arah penyusunan serat memiliki peranan penting dalam menentukan pola distribusi tegangan, deformasi, serta mekanisme kerusakan yang terjadi pada struktur komposit [8][9]. Beberapa referensi yang tersedia menunjukkan bahwa perubahan arah orientasi serat seperti konfigurasi 0°, 90°, dan tenunan polos (*plain weave*) dapat memberikan respons impak yang berbeda-beda. Namun demikian, variasi orientasi tersebut belum banyak dieksplorasi secara mendalam dalam konteks sistem komposit *sandwich* berbasis serat alami [1].

Selain orientasi serat, perlakuan awal terhadap serat alami juga berperan penting dalam menentukan kekuatan impak komposit. Penelitian yang dilakukan oleh Zulkifli et al [10] menunjukkan bahwa perlakuan NaOH dan H_2O_2 pada serat sabut kelapa mampu meningkatkan ketangguhan impak serta menghasilkan struktur antarmuka yang lebih seragam. Hasil serupa dilaporkan oleh Sundari et al [11], yang menjelaskan bahwa perlakuan alkali 7% pada serat kelapa sawit dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga 22,46 MPa dan energi tumbukan mencapai 0,15 J/mm². Modifikasi permukaan serat terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja komposit berbasis serat alami, sehingga menjadikannya lebih kompetitif dibandingkan material sintetis.

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah penting pada dua aspek utama. Pertama, dari sisi kuantitatif, penelitian ini menghasilkan data empiris mengenai energi serapan impak pada setiap variasi orientasi serat, yang menjadi indikator kunci ketangguhan material. Kedua, dari sisi kualitatif, studi ini menyajikan karakterisasi visual terhadap morfologi patahan makro akibat beban impak, sehingga memperdalam pemahaman tentang mekanisme kerusakan yang dipengaruhi oleh arah orientasi serat dan struktur inti.

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

Berdasarkan konteks tersebut, tujuan utama penelitian ini yaitu menganalisis ketangguhan impak komposit *sandwich* berbasis serat rami–epoksi dengan tiga variasi orientasi serat (0°, 90°, dan *plain weave*); dan mengidentifikasi karakteristik patahan makro yang muncul dari pengujian impak.

2. BAHAN DAN METODA

2.1. Bahan

Serat rami yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pemasok lokal di Jawa Tengah (Gambar 1a). Serat-serat ini menunjukkan morfologi silinder alami, ditandai dengan diameter rata-rata mulai dari 100 hingga 150 µm dan panjang bervariasi antara 50 hingga 100 mm, serta massa jenis serat kering di sekitar 1,48 g/cm³ [12]. Sebelum digunakan sebagai penguat, serat menjalani dua tahapan perlakuan kimia awal untuk meningkatkan adhesi antarmuka dengan matriks. Tahap pertama yaitu perendaman dalam larutan NaOH 15% selama 2 jam untuk menghilangkan hemiselulosa dan kotoran permukaan. Tahap kedua dilakukan dengan merendam serat dalam larutan H_2O_2 3% selama 1 jam untuk mengoksidasi lignin dan mencerahkan permukaan serat. Setelah itu, serat dibilas hingga mencapai pH netral dan dikeringkan dalam ruangan selama 3 hari [10]. Serat yang telah diproses perlakuan awal tersebut kemudian disusun dalam tiga orientasi berbeda sebagai lapisan *skin*, yaitu arah mendatar (0°), melintang (90°), dan *plain weave*, seperti yang digunakan pada penelitian komposit serat alami sebelumnya yang di lakukan oleh Bledzki & Gassan [13].

Material *core* berupa *corrugated cardboard* diperoleh dari limbah kardus rokok tipe *double wall* dengan arah gelombang mendatar (0°) (Gambar 1b). Ketebalan nominal *corrugated cardboard* adalah 6 mm dengan massa jenis curah berkisar di antara 250–280 kg/m³, Massa jenis ini menunjukkan bahwa *corrugated cardboard* memiliki karakteristik yang mendukung kekuatan dan daya tahan, sesuai dengan standar bahan yang digunakan dalam konstruksi [14]. Pemilihan bahan ini didasarkan pada karakteristiknya yang ringan, kapasitas penyerapan energi yang tinggi, dan asalnya dari sumber limbah daur ulang yang ramah lingkungan [15]. Sebelum digunakan pada pembuatan material komposit *sandwich* sebagai *core*, permukaan karton dibersihkan dan diamplas ringan untuk meningkatkan kekasaran permukaan dan daya lekat terhadap resin epoksi.

Resin epoksi yang digunakan sebagai matriks (Gambar 1c) terdiri dari *Eposchon* A, yaitu resin *epoxy* tipe *bisphenol* A, dan *Eposchon* B, sebagai *epoxy hardener* tipe *polyamide*, kombinasi ini menghasilkan daya rekat yang sangat kuat, dengan rasio pencampuran 1:1 sesuai dengan spesifikasi pabrikan. Campuran dilakukan pada suhu ruang dengan pengadukan konstan selama 3–5 menit hingga tercapai homogenitas. Nilai densitas epoksi setelah mengeras mencapai sekitar 1100 kg/m³ [16]. Epoksi dipilih karena memiliki kekuatan mekaniknya yang tinggi dan ketahanan kimia yang baik, serta kemampuannya untuk membentuk ikatan antarmuka yang efektif dengan serat alami [17].



(a) (b) (c)

Gambar 1. Material (a) Serat Rami, (b) *Corrugated Cardboard*, (c) Resin Epoksi

2.2. Metoda

Penelitian ini menggunakan metodologi eksperimental di laboratorium untuk mengetahui efek orientasi serat pada *skin* terhadap kekuatan impak dan bentuk patahan material komposit *sandwich* berbasis serat rami. Penelitian dilakukan dalam empat tahap utama, yaitu: (1) persiapan dan perlakuan awal pada material (serat, dan *corrugated cardboard*); (2) proses pembuatan panel spesimen menggunakan metode *vacuum bagging*; (3) pengujian impak dilakukan sesuai dengan standar ISO 179-1:2023 tentang metode pengujian ketangguhan impak dari komposit, khususnya pengujian impak *Charpy* dengan menggunakan konfigurasi *flatwise*; serta (4) analisis makroskopik karakter patahan. Metode ini dipilih karena mampu memberikan data yang akurat

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

terkait pengaruh orientasi serat pada *skin* terhadap kekuatan impak dan bentuk patahan material komposit *sandwich*.

Pembuatan komposit *sandwich* dilakukan dengan menggunakan metode *vacuum bagging* di Politeknik Negeri Balikpapan. metode *vacuum bagging* ini diketahui sangat efektif dalam menghasilkan laminasi yang homogen dan mengurangi *void* pada material komposit [18]. Panel komposit *sandwich* ini terdiri dari tiga lapisan utama yaitu; dua lapisan *skin* dari serat rami-epoksi dan satu lapisan *core* dari *corrugated cardboard* tipe *double wall* yang dijadikan satu. Panel yang telah jadi dibuat kemudian dipotong menjadi spesimen uji sesuai standar ISO 179-1:2023 dengan menggunakan *Scroll Saw* RSS 125. Setiap orientasi serat 0°, 90°, dan *plain weave* dibuat sebanyak 5 spesimen uji untuk menjamin keandalan data statistik.

Pengujian ketangguhan impak dilakukan pada Lab Bahan UGM menggunakan metode *Charpy* dengan konfigurasi *flatwise* sesuai standar ISO 179-1:2023. Di mana dimensi spesimen adalah 80 mm × 10 mm × sesuai ketebalan fabrikasi tanpa diberi takikan. Metode ini dipilih dikarenakan beban tumbukan ke arah tegak lurus terhadap permukaan lapisan *skin* panel dengan tujuan untuk menilai ketangguhan struktur *sandwich* secara keseluruhan (bukan hanya satu lapisan) dalam menahan beban kejut dan juga untuk mengetahui bagaimana energi tumbukan disalurkan melalui lapisan *skin-core-skin* [4] Pengujian ini dilakukan pada suhu ruang (±25 °C) dengan menggunakan mesin impak tipe pendulum dengan energi maksimum 5 J. Selain itu, pengamatan makroskopik dilakukan pada permukaan patahan spesimen menggunakan kamera merk *olympus*, dengan tipe kamera DP30 dan pembesaran hingga 7 kali sampai dengan 112 kali. Pengamatan foto makro ini bertujuan untuk menganalisis bentuk patahan yang dominan yang terjadi pada material komposit *sandwich* setelah menerima beban kejut.



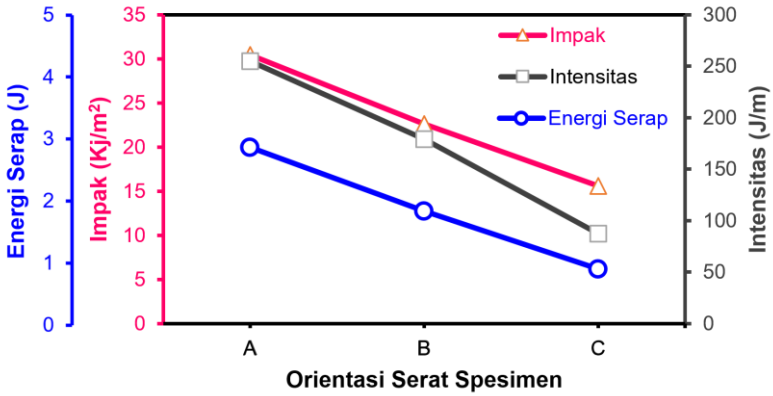
(a) (b) (c)

Gambar 2. Metoda (a) *Vacuum Bagging*, (b) Spesimen Uji, (c) Alat Uji Impak Energi Maks 5 J

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Impak

Pengujian impak dilakukan pada tiga variasi orientasi serat rami, yaitu 0° (A), 90° (B), dan *plain weave* (C). Hasil nilai rata-rata energi serap, ketangguhan dan intensitas ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Nilai Rata-rata Komposit *Sandwich* (a) Energi Serap, (b) Impak, (c) Intensitas

Dari hasil pengujian impak dari komposit *sandwich* dengan variasi arah serat dengan variasi sudut serat 0°, 90°, dan *plain weave*. Orientasi 0° memiliki nilai energi serap yang tertinggi sebesar 2,854 J, diikuti orientasi

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

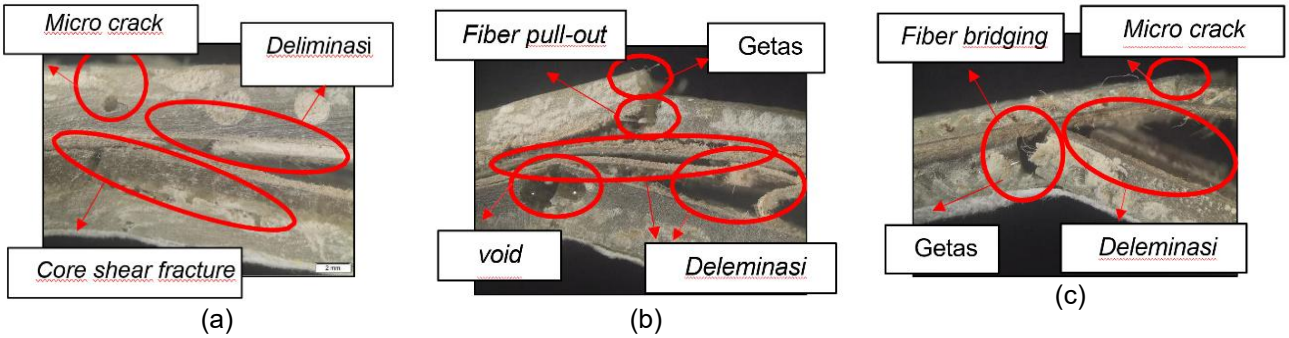
90° sebesar 1,8255 J, dan *plain weave* sebesar 0,8925 J. Begitu pun juga nilai kekuatan impak rata-rata menunjukkan *tren* yang sama, yaitu 30,43 kJ/m² untuk orientasi 0°, 22,60 kJ/m² untuk 90° dan 15,59 kJ/m² untuk *plain weave*. Serta intensitas impak juga memperlihatkan kecenderungan yang sama yaitu 254,80 J/m untuk 0°, 178,97 J/m untuk 90° dan 87,51 J/m untuk *plain weave*.

Secara keseluruhan, orientasi serat yang sejajar (0°) menunjukkan kinerja impak tertinggi dibandingkan dua orientasi lainnya. Hal ini disebabkan karena orientasi ini membantu menahan gelombang tegangan tekan yang dihasilkan selama benturan, sehingga meningkatkan penyerapan energi dan mengurangi kerusakan [19][20]. Pada kondisi ini, sebagian besar energi tumbukan diserap oleh deformasi elastis serat, bukan oleh kegagalan *interlaminar*.

Sebaliknya, serat yang berorientasi melintang (90°) kurang efektif dalam menahan beban, yang menyebabkan berkurangnya penyerapan energi dan peningkatan *delaminasi*. Ini karena tegangan benturan tegak lurus terhadap serat, mendorong pemisahan lapisan dan mengurangi integritas struktural komposit [21]. Hal ini dikarenakan Orientasi melintang lebih rentan terhadap *delaminasi*, suatu proses di mana lapisan komposit terpisah di bawah tekanan. Ini adalah mekanisme penyerapan energi yang signifikan, tetapi juga menunjukkan mode kegagalan yang mengurangi kekuatan keseluruhan komposit. Sebaliknya, orientasi serat paralel cenderung gagal melalui kerusakan serat dan pemisahan antarmuka, yang merupakan proses yang lebih padat energi[20]. Adapun pada struktur *plain weave* memiliki Konsentrasi tegangan yang tinggi hal ini disebabkan oleh konfigurasi geometris serat dan adanya rongga pada titik simpul. Konsentrasi tegangan ini dapat menyebabkan daerah tegangan tinggi terlokalisasi, yang rentan terhadap retak matriks di bawah beban mekanis [22] [23]. Sehingga hal ini menyebabkan nilai energi serap, kekuatan impak, dan intensitas impak juga yang paling rendah di antara ketiganya.

3.2. Analisis Foto Makro Patahan

Hasil pengamatan foto makro terhadap permukaan patahan setelah uji impak disajikan pada Gambar 5. Setiap variasi orientasi menunjukkan bentuk morfologi patahan yang khas.



Gambar 4. Hasil Pengamatan Foto Makro Spesimen: (a) A (Variasi 0^0), (b) B (Variasi 90^o), (c) C (Variasi *Plain Weave*)

a. Spesimen A (0°) menggambarkan munculnya retakan mikro, *delaminasi*, dan fraktur geser pada struktur inti. Pola ini menunjukkan bahwa segmen energi tumbukan serap melalui deformasi lokal yang ada di dalam lapisan *core* dari *corrugated cardboard*, sedangkan lapisan *skin* mempertahankan kapasitasnya untuk menahan tegangan tarik sebelum timbulnya retakan antar lapisan komposit *sandwich*. Mekanisme ini menunjukkan kegagalan bertahap (*progressive failure*) yang umumnya ditemukan pada komposit *sandwich* dengan arah serat sejajar terhadap beban kejut [24].
b. Spesimen B (90°) memperlihatkan dominasi *fiber pull-out, void*, dan *delaminasi* yang luas. Pola ini mengindikasikan lemahnya ikatan antara serat dan matriks dikarenakan arah beban tegak lurus terhadap serat. Fenomena *fiber pull-out* mengakibatkan energi yang diserap lebih rendah, hal ini sejalan dengan penurunan nilai ketangguhan impak pada spesimen dengan orientasi serat 90° [25] [26].
c. Spesimen C (*plain weave*) menunjukkan kombinasi *fiber bridging*, *micro crack*, serta *delaminasi* getas. Walaupun tenunan memberikan orientasi serat dua dimensi yang memiliki potensi untuk mendistribusikan tegangan lebih merata, tetapi struktur simpul antar serat menghasilkan daerah konsentrasi tegangan tinggi yang memicu fraktur rapuh yang lebih awal [27][28].

Secara keseluruhan, morfologi fraktur menguatkan temuan kuantitatif dari pengujian impak, di mana integritas antarmuka yang ditingkatkan dan orientasi paralel beban berkontribusi pada peningkatan ketangguhan [24]. Sebaliknya, kompleksitas yang lebih besar dalam orientasi serat (seperti yang diamati pada *plain weave*) menyebabkan kegagalan antarmuka yang dipercepat sebagai akibat dari distribusi tegangan yang tidak merata [27][28].

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

3.3. Korelasi Antara Orientasi Serat dan Ketangguhan Impak

Hasil penelitian menunjukkan bahwa orientasi serat memiliki pengaruh signifikan terhadap performa impak komposit *sandwich* serat rami–epoksi. Orientasi serat 0° menghasilkan energi serap tertinggi yaitu 2,854 J dan ketangguhan 30,43 kJ/m², karena arah serat sejajar dengan beban impak sehingga mekanisme *transfer* tegangan berlangsung optimal di dalam jaringan serat. Hal ini menghasilkan mekanisme kegagalan bertahap seperti *micro crack* dan *core crushing* yang mampu menyerap energi lebih banyak sebelum runtuh sepenuhnya [29]

Sebaliknya, pada orientasi 90°, gaya tumbukan diteruskan langsung ke matriks dan inti (*core*), sehingga mempercepat terjadinya pemisahan antar lapis (*fiber pull-out* dan *debonding*). Hal ini menyebabkan penurunan energi serap hingga sekitar 22–36% dibandingkan orientasi 0°, di mana serat sejajar dengan arah gaya. Kondisi ini sejalan dengan temuan Ö. Özbek et al [30] dan Hetrick et al [31], bahwa Serat tidak efektif menahan beban tumbukan, sehingga gaya lebih banyak diserap oleh matriks dan core. Akibatnya, terjadi *debonding, fiber pull-out,* dan *delaminas*i lebih cepat

Sementara struktur *plain weave* menunjukkan energi serap terendah (turun ±70% dibanding 0°) meskipun memiliki arah serat dua dimensi. Hal ini disebabkan adanya titik-simpul tenunan yang menjadi konsentrasi tegangan dan memicu retak getas (*brittle fracture*) serta *fiber bridging*. Fenomena ini didukung oleh studi Bednarcyk et al [27] dan Zhou et al [28] yang menyatakan bahwa struktur *plain weave* pada komposit *sandwich* menghasilkan energi serap terendah akibat konsentrasi tegangan di titik simpul tenunan, yang memicu retak getas dan *fiber bridging*. Meskipun serat tersusun dua dimensi, pola tenunan ini justru membatasi mekanisme serap energi dan mempercepat kegagalan.

Dengan demikian, semakin besar keselarasan orientasi serat terhadap arah beban impak, semakin tinggi kemampuan komposit dalam menyerap energi. Hal ini menguatkan pernyataan Ramagiri et al [19] yang melaporkan peningkatan ketangguhan impak hingga 40–60% pada orientasi serat longitudinal dibanding *transversa*l.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian impak dan pengamatan morfologi patahan, dapat disimpulkan bahwa orientasi serat berpengaruh signifikan terhadap kemampuan penyerapan energi dan mekanisme kegagalan komposit *sandwich* serat rami–epoksi dengan *core corrugated cardboard*, di mana orientasi serat 0° menunjukkan kinerja impak paling tinggi, sedangkan pada orientasi serat 90° menghasilkan penurunan ketangguhan hingga 25–30% dibandingkan dengan orientasi 0°, dan juga struktur serat *plain weave* memperlihatkan ketangguhan yang paling rendah, dan secara umum, orientasi serat longitudinal (0°) direkomendasikan untuk desain komposit *sandwich* berbasis serat rami–epoksi yang membutuhkan ketangguhan impak tinggi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Balikpapan atas bantuan finansial yang diberikan dalam penelitian ini. Kontribusi tersebut memungkinkan penulis untuk mengumpulkan data dan menganalisis temuan yang telah disajikan dalam artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Rajesh, S. R. Taywade, S. J. Devaraj, and A. J. K. Arputham, “Improving interfacial bonding and impact characteristics of Sandwich composites by interweaving carbon fiber,” *Polym. Compos.*, vol. 45, no. 17, pp. 16043–16057, 2024, doi: 10.1002/pc.28889.

[2] C. Chen, P. Wang, and X. Legrand, “Effect of core architecture on charpy impact and compression properties of tufted sandwich structural composites,” *Polymers (Basel).*, vol. 13, no. 10, p. 1665, 2021, doi: 10.3390/polym13101665.

[3] I. Boem, N. Gattesco, E. Rizzi, A. Dudine, and M. Gams, “Fibre-based composite materials for the seismic strengthening of masonry ring beams: cyclic tests on full-scale samples,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 58, no. 3, 2025, doi: 10.1617/s11527-025-02617-w.

[4] W. Zhao, R. Jia, X. Li, J. Zhao, and Z. Xie, “Flatwise compression behavior of composite Nomex® honeycomb sandwich structure,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 1169–1188, 2022, doi: 10.1177/10996362211035425.

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

[5] Y. Özbek, A. Al-Nadhari, S. Elmas, V. Eskizeybek, M. Yıldız, and H. S. Sas, "Feasibility and performance evaluation of randomly oriented strand recycled composite skins in sandwich structures: A green cost-effective solution for aerospace secondary load-bearing applications," *Polym. Compos.*, vol. 46, no. 12, pp. 11341–11357, 2025, doi: 10.1002/pc.29689.

[6] B. Vahidimanesh, M. S. Gazor, and A. Farrokhabadi, "Experimental analysis of quasi-static indentation in composite sandwich multilayers with corrugated core," *Polym. Compos.*, vol. 46, no. 1, pp. 236–251, 2025, doi: 10.1002/pc.28981.

[7] F. Balıkoğlu, T. K. Demircioğlu, M. Yıldız, N. Arslan, and A. Ataş, "Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 2030–2048, 2020, doi: 10.1177/1099636218792671.

[8] P. M. Schubel, J. J. Luo, and I. M. Daniel, "Impact and post impact behavior of composite sandwich panels," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 3, pp. 1051–1057, 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.06.022.

[9] S. Zangana, J. Epaarachchi, W. Ferdous, J. Leng, and P. Schubel, "Behaviour of continuous fibre composite sandwich core under low-velocity impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 158, p. 107157, 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107157.

[10] Zulkifli, I. B. Dharmawan, and W. Anhar, "Analisa pengaruh perlakuan kimia pada serat terhadap kekuatan impak charpy komposit serat sabut kelapa bermatriks epoxy," *J. Polimesin*, vol. 18, no. 1, pp. 47–52, 2020, doi: 10.30811/jpl.v18i1.1583.

[11] E. Sundari, F. Putri, and A. Budiman, "Analisa Pengaruh Perlakuan Alkali Terhadap Sifat Mekanik Komposit Berpenguat Serat Buah Kelapa Sawit," *Mach. J. Teknol. Terap.*, vol. 4, no. 2, pp. 2723–3359, 2023, doi: 10.5281/zenodo.8048689.

[12] H. N. Dhakal and Z. Zhang, *The use of hemp fibres as reinforcements in composites*. 2015. doi: 10.1533/9781782421276.1.86.

[13] A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 221–274, 1999, doi: 10.1016/S0079-6700(98)00018-5.

[14] J. Gallo, F. Cortés, E. Alberdi, and A. Goti, "Mechanical behavior modeling of containers and octabins made of corrugated cardboard subjected to vertical stacking loads," *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 9, 2021, doi: 10.3390/ma14092392.

[15] S. Secchi, F. Asdrubali, G. Cellai, E. Nannipieri, A. Rotili, and I. Vannucchi, "Experimental and environmental analysis of new sound-absorbing and insulating elements in recycled cardboard," *J. Build. Eng.*, vol. 5, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1016/j.jobe.2015.10.005.

[16] M. Nodehi, "Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s41062-021-00661-3.

[17] T. Celik, "Strengthening strategies for unreinforced stone masonry walls using FRP and CFM composites," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-13747-0.

[18] B. Muralidhara, S. P. Kumaresh Babu, and B. Suresha, "Utilizing vacuum bagging process to prepare carbon fiber/epoxy composites with improved mechanical properties," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 2022–2028, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.051.

[19] B. Ramagiri and C. S. Yerramalli, "Numerical investigation on the role of out-of-plane fiber direction on impact resistance of composite target," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 169–182, 2024, doi: 10.1177/07316844231158176.

[20] D. K. Hsu and B. E. Lucht, "Impact-Induced Delaminations in Thermoset and Thermoplastic Composites," *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, vol. 15, no. 4, pp. 1635–1642, 1989, doi: 10.1007/978-1-4613-0817-1_206.

[21] M. Z. Rahman, K. Jayaraman, and B. R. Mace, "Impact energy absorption of flax fiber-reinforced polypropylene composites," *Polym. Compos.*, vol. 39, no. 11, pp. 4165–4175, 2018, doi: 10.1002/pc.24486.

[22] M. P. Rao, M. Pantiuk, and P. G. Charalambides, "Modeling the effects of stress concentrations on the initiation of matrix cracking in woven CMCs," *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 10, pp. 1121–1143, 2011, doi: 10.1177/0021998310392412.

[23] W. Ross McLendon and J. D. Whitcomb, "Identification of characteristic failure initiation sites in plain weave textile composites," *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.*, 2011, doi: 10.2514/6.2011-1795.

[24] S. Johansson, J. Engqvist, J. Tryding, and S. A. Hall, "Microscale deformation mechanisms in paperboard during continuous tensile loading and 4D synchrotron X-ray tomography," *Strain*, vol. 58, no. 5, 2022, doi: 10.1111/str.12414.

[25] H. Liu, C. Lv, S. Shi, and Z. Sun, "Interfacial toughening and toughening mechanism of aramid staple fiber to carbon fiber reinforced epoxy resin composite-aluminum honeycomb sandwich structure," *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Mater. Compos. Sin.*, vol. 39, no. 2, pp. 559–567, 2022,

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

doi: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210526.002.
[26] S. T. Triadi, L. I. Ramadhani, R. Wirawan, and H. Judawisastra, “Pull-Out Resistance of 3D Woven Sandwich Composites,” *Key Eng. Mater.*, vol. 1020, pp. 11–28, 2025, doi: 10.4028/p-prz2e1.
[27] B. A. Bednarcyk, B. Stier, J. W. Simon, S. Reese, and E. J. Pineda, “Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites,” *Compos. Struct.*, vol. 121, pp. 258–270, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.11.013.
[28] G. Zhou *et al.*, “Effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors in carbon/epoxy woven composites under multiaxial stress states,” *Polym. Test.*, vol. 90, no. March, p. 106657, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106657.
[29] S. N. Nair and A. Dasari, “Development and Characterization of Natural-Fiber-Based Composite Panels,” *Polymers (Basel).*, vol. 14, no. 10, 2022, doi: 10.3390/polym14102079.
[30] Ö. Özbek, Ö. Y. Bozkurt, and A. Erkliğ, “Low Velocity Impact Behaviors of Basalt/Epoxy Reinforced Composite Laminates With Different Fiber Orientations,” *Turkish J. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 197–202, 2020, doi: 10.31127/tuje.644025.
[31] D. R. Hetrick, S. H. R. Sanei, O. Ashour, and C. E. Bakis, “Charpy impact energy absorption of 3D printed continuous Kevlar reinforced composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no. 12, pp. 1705–1713, 2021, doi: 10.1177/0021998320985596.