

Impact of ply arrangement on the mechanical properties of luffa cylindrica/fiberglass reinforced polyester hybrid composites

Yossa Aulia Ardhana^a, Wijang Wisnu Raharjo^{b,1}, Wibowo^b

^aMahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 57126

^bProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 57126

¹Email korespondensi: m_asyain@staff.uns.ac.id

Abstract. Hybrid composites, incorporating multiple fiber reinforcements, offer enhanced mechanical performance by optimizing material properties. This study examines the influence of stacking sequence on the flexural and impact behavior of unsaturated polyester resin (UPR) composites reinforced with *Luffa cylindrica* fibers and fiberglass. Five configurations: Luffa–Luffa (L-L), Luffa–Chopped Strand Mat (L-CSM), Chopped Strand Mat–Luffa (CSM-L), Luffa–Woven Roving (L-WR), and Woven Roving–Luffa (WR-L) were evaluated. Flexural testing was conducted in accordance with ASTM D790, and impact testing was conducted per ASTM D5941 (Izod method). The results show that the L-WR configuration achieved the peak flexural strength of 107.72 MPa, whereas the WR-L exhibited the highest impact resistance of 50.49 kJ/m². Fiberglass placement on the tensile side maximized flexural strength, whereas placement on the compressive side improved impact absorption. These results demonstrate that mechanical performance is highly dependent on fiber stacking, enabling tailored designs for structural applications.

Keywords: hybrid composites, ply arrangement, mechanical properties, luffa cylindrica

Received: 30 September 2025; **Presented** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/kep5fv78>

PENDAHULUAN

Material komposit kini menjadi primadona di berbagai industri berkat keunggulannya yang unik: ringan tapi kuat, sekaligus tahan terhadap korosi, api, dan bahan kimia. Karakteristik istimewa ini menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi otomotif, konstruksi, dan infrastruktur [1], [2].

Perkembangan terbaru yang patut diperhatikan adalah kemunculan komposit hibrid. Dengan memadukan serat alam dan sintetis, material inovatif ini tidak hanya menawarkan performa mekanik yang lebih baik, tetapi juga lebih ramah lingkungan. Hal ini merupakan solusi sempurna untuk tantangan engineering modern yang mengedepankan keberlanjutan [3].

Serat gelas (fiberglass) telah lama menjadi andalan industri berkat kekuatan mekaniknya yang unggul serta ketahanannya terhadap kelembapan dan korosi. Namun, di balik kelebihanannya, material ini menyimpan dampak lingkungan yang serius. Ketidakmampuan serat gelas terurai secara alami hingga proses produksinya yang boros energi berkontribusi pada pencemaran lingkungan dan memperparah perubahan iklim [4], [5].

Di tengah tantangan ini, serat alam seperti jute, kenaf, dan luffa cylindrica (gambas) muncul sebagai harapan baru. Material ramah lingkungan ini tidak hanya berasal dari sumber terbarukan, tetapi juga dapat terurai secara hayati, menawarkan solusi berkelanjutan tanpa mengorbankan performa [6], [7].

Serat luffa cylindrica menawarkan keunggulan lingkungan yang signifikan. Namun, potensinya dalam

bidang komposit struktural masih terkendala oleh keterbatasan kekuatan mekanik dan stabilitas terhadap kelembapan. Inovasi penggabungan serat luffa dan serat gelas dalam komposit hibrida muncul sebagai solusi cerdas. Komposit ini memadukan keunggulan ramah lingkungan dari serat luffa cylindrica dengan performa tinggi serat gelas [8]. Hasil penelitian terbaru menegaskan bahwa desain lapisan komposit memegang peranan krusial dalam mencapai sifat mekanik optimal, termasuk kekuatan tarik, lentur, dan geser [9], [10].

Matriks dalam komposit memainkan peran vital sebagai "lem" yang menyatukan serat penguat menjadi struktur yang utuh dan kokoh [8], [11]. Temuan menarik dari penelitian terbaru mengungkapkan bahwa inovasi penambahan serat luffa cylindrica ke dalam komposit serat gelas-epoksi mampu meningkatkan performa material secara dramatis - kekuatan tarik melonjak 100,4% dan kekuatan lentur naik signifikan hingga 177% dibandingkan komposit serat gelas konvensional [12].

Faktor lainnya adalah strategi penataan lapisan serat. Studi komparatif pada komposit serat alam seperti sabut kelapa dan rami membuktikan bahwa konfigurasi lapisan yang tepat dapat secara optimal meningkatkan kemampuan komposit dalam menyerap energi impact [13].

Penelitian ini mengungkap peluang besar dalam pengembangan komposit ramah lingkungan. Kombinasi antara serat alam *luffa cylindrica* dan serat kaca diprediksi mampu menghasilkan komposit hibrid dengan performa mekanik unggul. Meskipun komposit hibrid berbahan serat alam dan serat gelas telah banyak

dilaporkan, kajian yang membandingkan secara langsung respons lentur dan dampak dari dua jenis serat gelas (CSM dan WR) jika dicampur dengan serat alam masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut melalui investigasi pengaruh susunan lapisan hibrid terhadap mekanisme kegagalan dan sifat ketahanan komposit *unsaturated polyester* terhadap beban mekanik (impak dan lentur).

METODOLOGI

Bahan Penelitian

Serat alam yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari buah *luffa cylindrica* (gambas) seperti terlihat pada Gambar 1 yang diperoleh dari Desa Seputih, Kabupaten Jember, Indonesia. Serat diekstraksi dari buah *luffa cylindrica* (gambas) kering. Bagian anyaman luar buah *luffa* dipilih sebagai penguat

komposit karena memiliki struktur serat yang teratur. Sebagai bahan penguat tambahan, penelitian ini menggunakan dua jenis serat gelas komersial, yaitu *chopped strand mat* (CSM) tipe EMC200 dan woven roving (WR) 200. Serat gelas ini diperoleh dari toko Resinca di Jl. Mr. Sartono No 6, Surakarta, Jawa Tengah. Kedua jenis serat gelas ini dipilih karena karakteristik mekaniknya yang baik dan banyak digunakan dalam aplikasi industri. Matriks *unsaturated polyester* tipe YUKALAC 157 BQTN-EX diperoleh dari PT. Justus Kimia Raya, Semarang, Jawa Tengah. Resin ini memiliki densitas sebesar 1,2 g/cm³. Natrium hidroksida (NaOH) dari PT. Sulfindo Adiusaha, Banten digunakan untuk perlakuan permukaan serat. NaOH ini berbentuk serpihan memiliki konsentrasi 98%, pH 14, densitas 2,13 gr/cm³, dan kelarutan dalam air sebesar 42 gr/100 mL



Gambar 1. Serat *luffa cylindrica* (gambas)

Persiapan Serat *Luffa Cylindrica*

Serat *luffa cylindrica* diekstraksi dari buah gambas kering dengan memisahkan bagian inti dari bagian luar. Selanjutnya, bagian luar yang berbentuk mat ini dipotong dengan ukuran 160 x 170 mm. Potongan serat *luffa* dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 45 menit untuk menghilangkan tegangan sisa dan kelembaban.

Perlakuan Alkali.

Perlakuan alkali serat *luffa cylindrica* dilakukan dengan merendam serat dalam larutan alkali (NaOH) berkonsentrasi 2% selama 8 jam. Selanjutnya, serat dibilas menggunakan air distilasi sampai dengan pH ~7. Setelah itu, serat *luffa* diangin-anginkan selama 48 jam pada suhu ruang. Terakhir, serat dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C selama 10 jam [14].

Persiapan fiber glass

Persiapan serat gelas (CSM atau WR) dilakukan dengan memotong serat dengan ukuran (160 × 170 mm). Massa setiap lembar serat gelas ditimbang

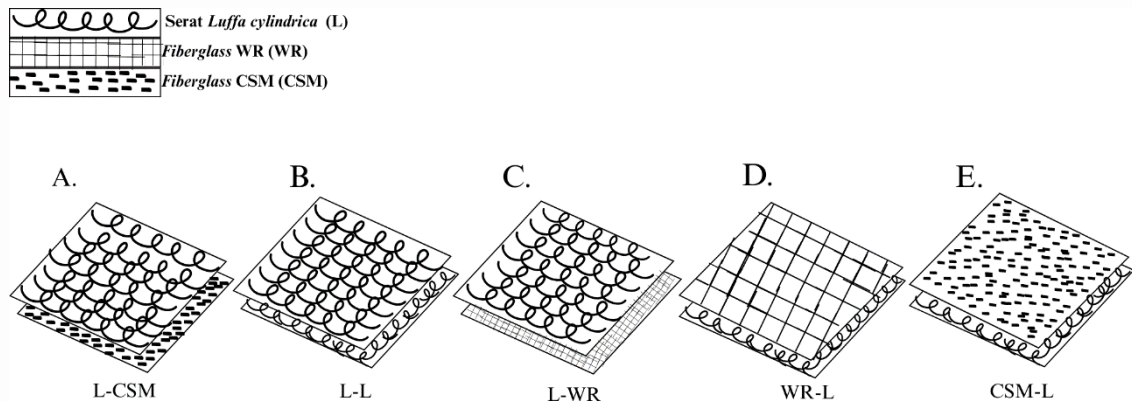
sebelum disimpan dalam plastik yang dilengkapi dengan silika gel.

Pembuatan komposit hibrid

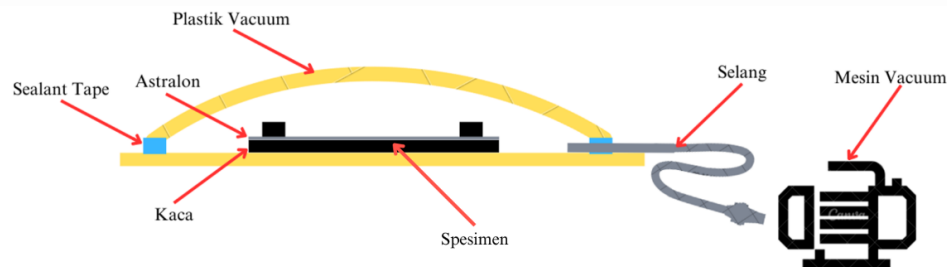
Komposit hibrid dibuat dengan menggabungkan serat *luffa cylindrica* dan serat gelas dalam beberapa variasi susunan lapisan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Sebelum proses pencetakan, terlebih dahulu cetakan dilapisi dengan *wax release*. Cetakan komposit terdiri dari dua ukuran, yaitu 160 x 170 x 30 mm untuk spesimen uji bending dan 160 x 170 x 40 mm untuk spesimen dampak. Serat lapis pertama diletakkan di dasar cetakan yang sudah dilapisi *wax*. Kemudian, campuran resin UPRs dan katalis dituangkan ke permukaan serat lapis pertama dan diratakan menggunakan kuas/roller. Langkah berikutnya, serat lapis kedua diletakkan di atas serat lapis pertama. Setelah itu, campuran resin *Unsaturated Polyester* (UPRs) dan katalis kembali diaplikasikan hingga seluruh serat terbasahi. Setelah proses laminasi selesai dilakukan, area laminasi ditutup dengan kantong plastik. Selubung vakum ini dilengkapi dengan sistem saluran yang terhubung ke pompa vakum melalui selang untuk menyedot udara yang terperangkap selama proses laminasi dan membuang kelebihan resin

seperti terlihat pada Gambar 3. Proses *vacuum bagging* ini dilakukan selama 15 menit. Selanjutnya spesimen di proses curing dalam oven pada suhu 50°C selama 2

jam. Terakhir, pembuatan spesimen uji bending dan uji impak dilakukan dengan memotong lembar komposit hibrid sesuai standar ASTM.



Gambar 2. Variasi Susunan Lapisan Komposit Hibrid



Gambar 3. Proses *Vacuum Bagging*

Pengujian Bending

Pengujian bending dilakukan untuk mendapatkan sifat lentur dari komposit hibrid *luffa cylindrica*/serat gelas - *unsaturated* polyester. Pengujian bending dilakukan memakai *Universal Testing Machine* (UTM) JTM-UTS510 dengan *load cell* 100 kg pada laju *crosshead* 1,5 mm/menit. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D790-17. Ada lima spesimen bending untuk setiap variasi tumpukan, hasilnya disajikan dalam bentuk nilai rata-rata dan standar deviasi untuk setiap variasi tumpukan.

Pengujian Impak

Ketangguhan impak suatu material adalah jumlah energi yang dapat diserap material. Pengujian impak komposit hibrid *luffa cylindrica*/serat glass-UPRs dilakukan menggunakan alat uji impak Izod. Alat uji impak izod yang digunakan mempunyai panjang pendulum 33,3 cm, berat pendulum 1,93 Kg, sudut awal sebesar 152° dan kecepatan ayun 3,4 m/ detik. semua spesimen impak diuji mengikuti standar ASTM D5941-96. Masing-masing variasi tumpukan diuji

sebanyak lima kali. Hasil uji ditampilkan dalam bentuk nilai rata-rata dan standar deviasi untuk setiap variasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

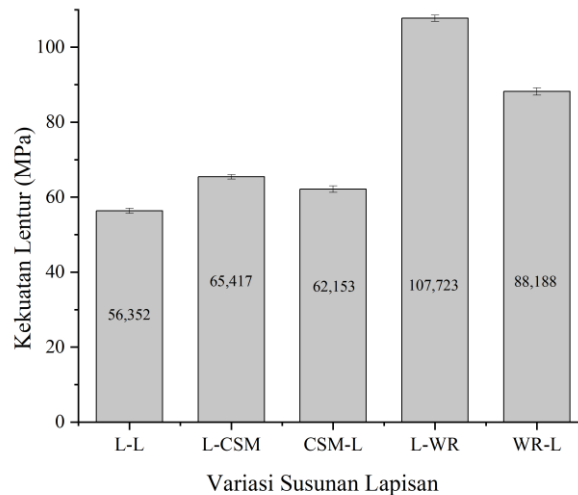
Pengaruh Susunan Lapisan Serat terhadap kekuatan Kekuatan Lentur Komposit Hybrid *Luffa Cylindrica*/Fiberglass

Hasil uji lentur mengungkapkan bahwa tatanan lapisan serat berpengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik komposit hibrid serat *luffa cylindrica*/serat gelas. Konfigurasi L-WR, dengan matriks *luffa* menempati zona tekan dan woven roving (WR) pada zona tarik, menghasilkan respons mekanik optimal, tercermin dari nilai kekuatan lentur 107,72 MPa dan modulus lentur 6,92 GPa sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 4 dan Gambar 5. Kinerja unggul ini disebabkan oleh struktur anyaman woven roving (WR) mempunyai kekuatan tarik tinggi dan mampu mentransfer beban secara efektif selama pembebanan lentur. Pada pembebanan lentur, sisi tarik merupakan zona kritis awal terjadinya retak. Oleh karena itu, pada sisi tarik, penempatan lapisan dengan nilai kekuatan tarik tinggi (WR) mampu menghambat terjadinya perambatan retak, meningkatkan efisiensi

transfer beban, dan meningkatkan kapasitas pembebanan lentur.

Selain itu, keberadaan serat luffa cylindrica di zona tekan, mencegah kegagalan prematur komposit hibrid. Konfigurasi L-WR mampu mempertahankan integritas

struktural hingga regangan maksimum. Hal ini selaras dengan prinsip dasar mekanika komposit dimana penempatan material dengan kekuatan tinggi pada zona kritis (tarik) secara signifikan meningkatkan kapasitas pembebanan lentur [15]



Gambar 4. Kekuatan Lentur Komposit *Hybrid Luffa Cylindrical/Fiberglass*

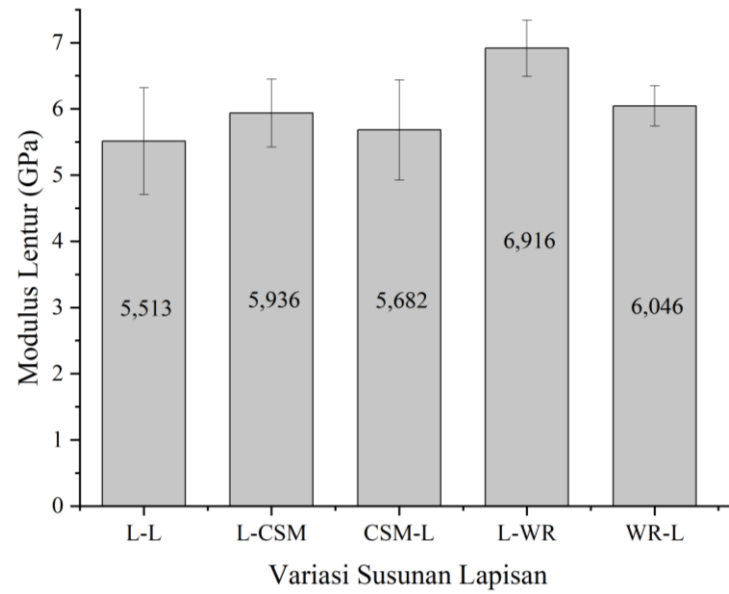
Sebaliknya, konfigurasi berbasis CSM (Chopped Strand Mat) dan L-L (dual-layer Luffa cylindrica) menunjukkan performa mekanik yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh orientasi acak dari serat CSM. Orientasi acak ini mendorong distribusi tegangan yang tidak optimal dan efisiensi transfer beban yang rendah. Selain itu, keterbatasan serat luffa dalam menahan beban tarik juga menyebabkan rendahnya kekuatan lentur komposit berbasis serat luffa cylindrica (L-L), seperti yang sudah dibuktikan dalam penelitian sebelumnya [16]. Data pada Gambar 5 semakin memperkuat hal ini, di mana susunan L-L memiliki nilai kekakuan paling rendah dibandingkan dengan yang lain.

Hasil pengujian mengungkapkan bahwa fenomena delaminasi dan retak matrik cenderung terjadi ketika lapisan serat luffa cylindrica ditempatkan di zona tarik. Mekanisme kegagalan ini dapat diamati pada Gambar 6 yang menunjukkan perbedaan morfologi patah, di mana spesimen L-L menunjukkan permukaan patah tidak teratur dan getas. Hal ini mengindikasikan bahwa ikatan antarmuka yang buruk antara serat dan matriks telah memicu inisiasi retak dan propagasi delaminasi. Temuan ini selaras dengan mekanisme kegagalan komposit hibrid yang dijelaskan dalam literatur [17], [18]. Hal yang berbeda ditemui pada konfigurasi L-WR, fraktur terlihat lebih teratur dan terkendali. Hal ini

mengindikasikan transfer beban yang lebih efisien dan kegagalan yang bersifat ulet.

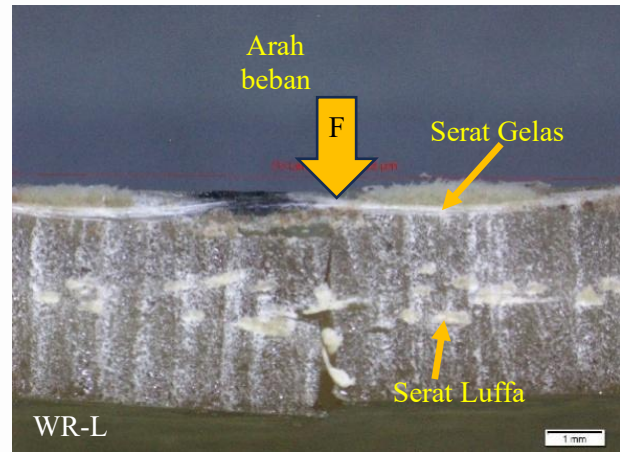
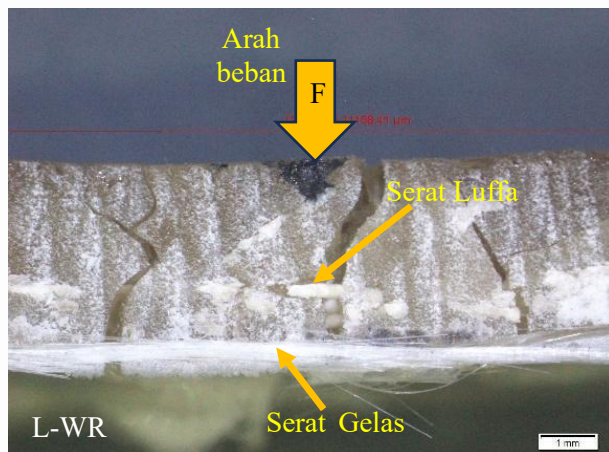
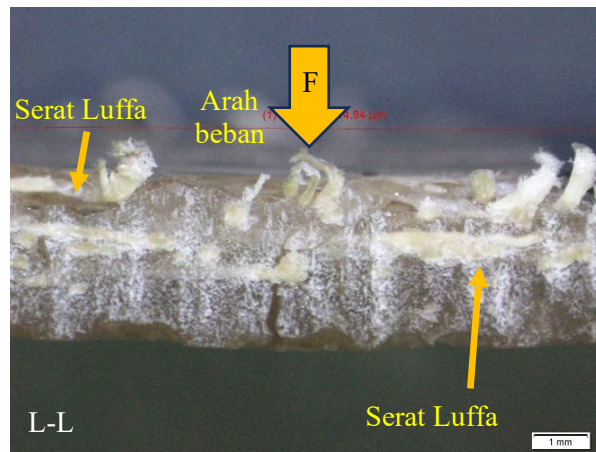
Performa unggul konfigurasi L-WR juga dapat dianalisis melalui distribusi beban selama pengujian *three-point bending*. Beban lentur (F) menciptakan zona tarik di bagian bawah dan zona tekan di bagian atas. Ketika WR ditempatkan di sisi tarik, material ini secara efektif menahan beban tarik tersebut berkat kekuatan dan kekakuannya yang tinggi. Sebaliknya, penempatan *luffa cylindrica* di zona tarik seperti pada konfigurasi L-L menyebabkan kegagalan dini karena serat alam secara umum memiliki kekuatan tarik yang rendah. Oleh karena itu, kemampuan WR dalam menahan beban tarik yang lebih besar menjadi faktor kunci dalam peningkatan performa lentur komposit hibrid.

Keunggulan konfigurasi L-WR dan kelemahan L-L terlihat jelas pada kurva beban-defleksi di Gambar 7, yang membandingkan spesimen dengan kinerja terbaik dan terburuk. Spesimen L-WR menunjukkan beban maksimum lebih tinggi dan defleksi yang lebih besar. Hal ini menandakan kemampuannya dalam menahan beban lentur dan menyerap energi sebelum mengalami kegagalan. Sebaliknya, spesimen L-L mencapai beban maksimum yang lebih rendah dan menunjukkan perilaku yang lebih getas, mengonfirmasi kinerja mekanik yang lebih rendah serta kemampuan disipasi energi yang terbatas saat mengalami beban lentur.

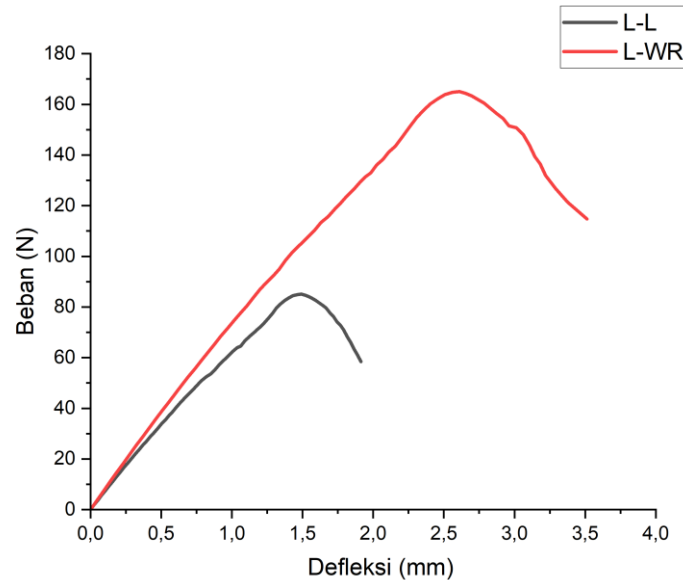


G

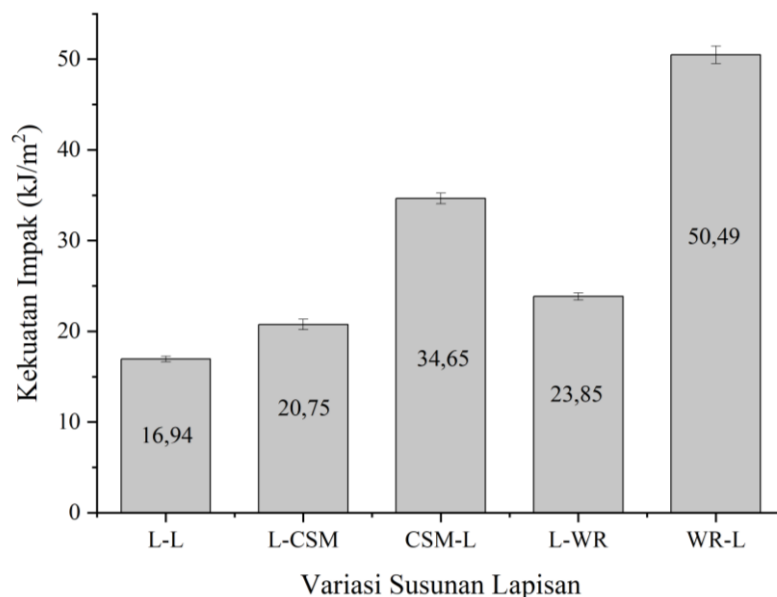
as



Gambar 6 Patahan Spesimen Uji Bending Komposit Hibrid *Luffa Cylindrica*/serat gelas



Gambar 7. Kurva Beban-Defleksi dari Konfigurasi Terbaik (L-WR) dan Terburuk (L-L)



Gambar 8. Kekuatan Impak Komposit Hibrid *Luffa Cylindrica*/Serat Gelas

Pengaruh Susunan Lapisan Serat terhadap kekuatan Impak Komposit Hybrid *Luffa Cylindrica*/Fiberglass.

Hasil uji impak mengungkapkan bahwa penempatan serat sintetis pada sisi yang terkena beban impak secara signifikan meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi. Konfigurasi WR-L, dengan lapisan WR (woven roving) berada di sisi yang menerima beban impak dan serat *luffa cylindrica* (L) di sisi

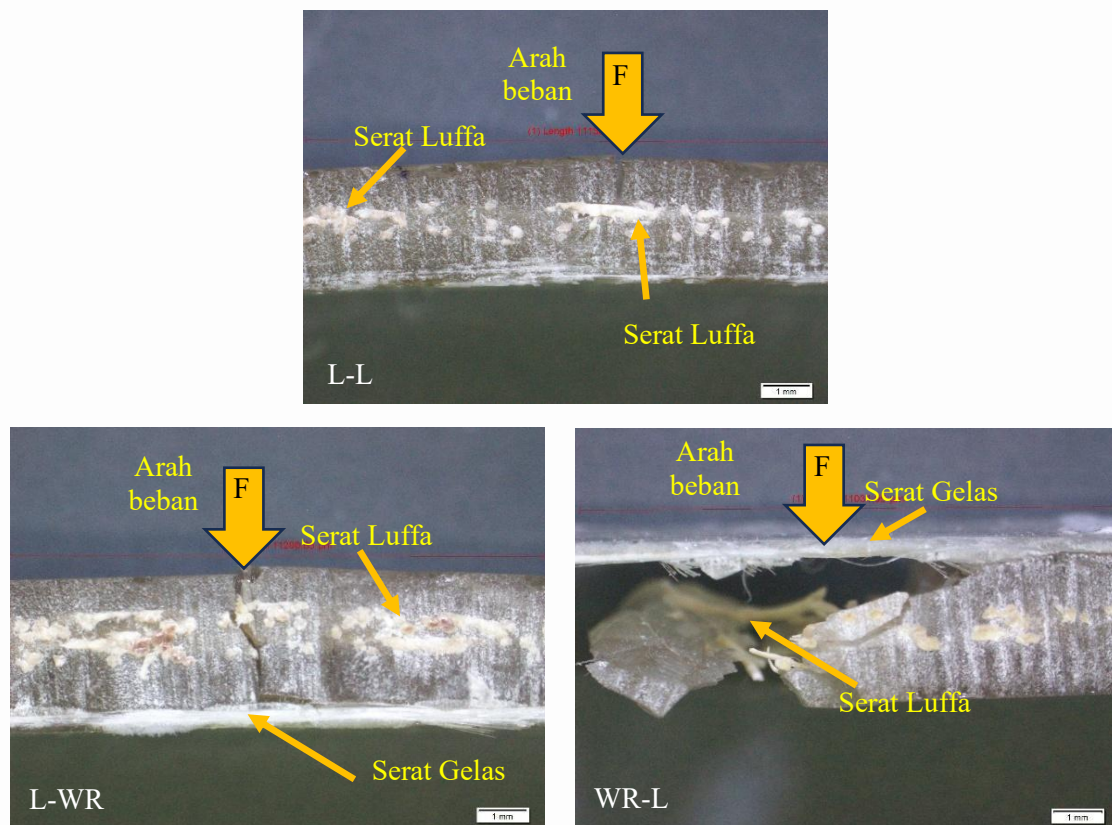
berlawanan, menunjukkan nilai impak tertinggi, yaitu 50,49 kJ/m², diikuti oleh konfigurasi CSM-L sebesar 34,65 kJ/m² (Gambar 8). Sebaliknya, konfigurasi L-L (*luffa* - *luffa*) mencatat nilai impak terendah sebesar 16,94 kJ/m², mengindikasikan bahwa penggunaan serat alam *luffa cylindrica* tanpa penguatan sintetis memiliki ketahanan impak yang terbatas [19], [20].

Konfigurasi WR-L menunjukkan ketahanan terhadap impak yang baik karena sifat kaku dan

tangguh dari serat WR (woven roving), yang mampu menyerap dan mendistribusikan energi impact secara efektif sebelum mencapai lapisan luffa yang lebih elastis [20]–[22]. Lapisan yang terkena langsung beban impact berperan dominan dalam menyerap dan mendistribusikan energi, sehingga penempatan lapisan WR pada sisi penerima impact akan meningkatkan ketahanan impact komposit WR-L. Sebaliknya, pada konfigurasi L-WR, deformasi yang terjadi pada permukaan luffa menyebabkan kegagalan prematur meskipun terdapat lapisan serat gelas di bawahnya.

Perilaku patahan dapat diamati secara visual pada Gambar 9, di mana spesimen WR-L dan L-WR menunjukkan zona retak pada area matrik dan serat *luffa cylindrica*. Pada komposit hibrid dengan konfigurasi L-WR, retakan pertama kali muncul di

permukaan matriks yang terkena beban impact, kemudian merambat ke lapisan serat luffa yang lebih lemah. Karena serat gelas memiliki ketahanan terhadap impact yang tinggi, retakan akhirnya menjalar ke bidang antarmuka antara matriks dan serat gelas. Sementara itu, pada konfigurasi WR-L, ketahanan serat gelas terhadap beban impact menyebabkan kerusakan dimulai dari antarmuka serat gelas-matrik. Retakan kemudian merambat dan memutus lapisan serat luffa serta ikatan antarmuka serat luffa-matriks UPRs. Adapun pada konfigurasi L-L, retakan bermula di permukaan resin yang terkena beban impact, lalu merambat dan memutus serat luffa di lapisan pertama sebelum menembus lapisan kedua. Pola ini menunjukkan mode patahan yang lebih getas dibandingkan dengan konfigurasi lainnya.



Gambar 9. Patahan Spesimen Uji Impact Komposit Hybrid Luffa Cylindrica/Fiberglass

Kekuatan impact secara mekanik sangat dipengaruhi oleh kemampuan lapisan serat dalam menahan dan menyebarkan energi impact. Pada konfigurasi WR-L, beban impact (F) pertama kali diserap oleh lapisan serat sintetis (WR) yang memiliki kekakuan dan ketangguhan tinggi. Lapisan luar (WR) ini berperan menghambat perambatan retak dan menunda kerusakan, sehingga energi impact dapat disalurkan lebih lanjut ke lapisan serat *luffa cylindrica* yang lebih ulet di bawahnya. Sebaliknya, pada

konfigurasi L-WR atau L-L, di mana serat *luffa cylindrica* berada di sisi yang terkena beban impact, material cenderung mengalami kegagalan lebih cepat akibat ketahanan impactnya yang lebih rendah. Hal ini menjelaskan bahwa spesimen dengan lapisan luar serat sintetis menunjukkan ketangguhan yang lebih baik. Temuan ini menegaskan bahwa posisi serat sintetis di lapisan terluar, terutama di bagian yang langsung terkena hantaman atau beban impact, sangat berpengaruh pada kemampuan material menahan

benturan. Susunan serat yang optimal, yang menggabungkan kekakuan serat sintetis dengan kemampuan redaman energi serat alam, terbukti mampu meningkatkan ketangguhan material secara signifikan [14].

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa susunan lapisan serat berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik komposit hibrid *luffa cylindrica*/serat gelas. Konfigurasi WR-L, dengan serat gelas di daerah tekan dan *luffa* di daerah tarik, menunjukkan ketahanan impak tertinggi (50,49 kJ/m²) berkat kemampuannya menyerap dan mendistribusikan energi benturan secara optimal. Sementara itu, susunan L-WR, *luffa* di sisi tekan dan serat gelas di sisi tarik memberikan performa lentur terbaik dengan kekuatan 107,72 MPa dan

modulus 6,92 GPa. Peningkatan ini dikaitkan dengan kekuatan tarik tinggi yang dimiliki oleh serat gelas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh RKAT Universitas Sebelas Maret Tahun Anggaran 2025 melalui skema Penelitian PENGUATAN KAPASITAS GRUP RISET (PKGR-UNS) A dengan Nomor Perjanjian Penugasan Penelitian : 371/UN27.22/PT.01.03/2025

KONTRIBUSI PENULIS

Wijang Wisnu Raharjo: menulis original paper, mereview, menganalisis, mensupervisi, Yossa Aulia Ardhana : menulis original paper, pengambilan data, pengolahan data, Wibowo : menulis original paper, menganalisis, mensupervisi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Yusuf, D. Ariawan, and W. W. Raharjo, "Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Pellet Based Recycled High Density Polyethylene Fabrication by Extruder Machine," *AIP Conf. Proc.*, vol. 3124, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0228204.
- [2] W. W. Raharjo, H. Sukanto, and M. Anwar, "Effect of Soaking Time in Alkali Solution on the Interfacial Shear Strength of Cantala Fiber/Recycled HDPE Composites," *Mater. Sci. Forum*, vol. 827, pp. 375–380, Aug. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.827.375.
- [3] G. Pramudi, W. W. Raharjo, and D. Ariawan, "Investigation of the flexural and impact strength of recycled carbon fiber (RCF) i polyester composite," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2391, no. March, 2022, doi: 10.1063/5.0072702.
- [4] F. Hermansson, S. Heimersson, M. Janssen, and M. Svanström, "Can carbon fiber composites have a lower environmental impact than fiberglass?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 181, no. February, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106234.
- [5] K. Roni, W. W. Raharjo, and D. Ariawan, "The effect of weather exposure on the impact strength of polyester composites with Petung bamboo fiber (*Dendrocalamus Asper*) reinforcement," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, p. 050009. doi: 10.1063/5.0122554.
- [6] A. F. M. Nor, M. T. H. Sultan, A. Hamdan, A. M. R. Azmi, and K. Jayakrisna, "Hybrid Composites Based on Kenaf, Jute, Fiberglass Woven Fabrics: Tensile and Impact Properties," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 11198–11207, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.01.144.
- [7] D. F. Martiningsih and A. S. Soekoco, "Pemanfaatan Luffa Cylindrica (Blustru) Sebagai Bahan Alternatif Insulator Panas," *Pros. Semin. Nas. Peran Sek. Ind. dalam Percepatan dan Pemulihan Ekon. Nas.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–28, 2018.
- [8] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Ali, A. Khalina, and M. Jonoobi, "Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10, pp. 4927–4932, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.05.021.
- [9] T. N. Huynh and J. Lee, "Optimal thickness distribution design for blending hybrid composite laminates using Buckling Factor and Failure Index prediction," *Comput. Struct.*, vol. 305, no. May, 2024, doi: 10.1016/j.compstruc.2024.107562.
- [10] G. Umindya Nur Tajalla, M. Risky Syaifullah, and A. Idhil Ismail, "Mechanical Properties and Water Absorption of Ramie-Glass fibre-based Hybrid Composite," *Rotasi*, vol. 24, no. 3, pp. 1–6, 2022.
- [11] S. R. M. Paladugu *et al.*, "A Comprehensive Review of Self-Healing Polymer, Metal, and Ceramic Matrix Composites and Their Modeling Aspects for Aerospace Applications," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 23, 2022, doi: 10.3390/ma15238521.
- [12] N. Mohanta and S. K. Acharya, "Investigation of mechanical properties of luffa cylindrica fibre reinforced epoxy hybrid composite," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 1970, doi: 10.4314/ijest.v7i1.1.
- [13] M. Abdus Shomad and A. Sofyan, "Analisis Karakterisasi Komposit Hibrid pada Spatbor Depan Motor Matic," *J.*

Engine Energi, Manufaktur, dan Mater., vol. 4, no. 2, pp. 68–75, 2020.

- [14] N. Karthi, K. Kumaresan, S. Sathish, S. Gokulkumar, L. Prabhu, and N. Vigneshkumar, “An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.011.
- [15] R. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics, Fourth Edition*. CRC Press Taylor & Francis, 2016. doi: 10.1201/b19626.
- [16] B. Rashid, A. Sadeq, M. Ebraheem, and A. R. Mohammed, “Mechanical properties of hybrid woven roving and chopped strand mat glass fabric reinforced polyester composites,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab4085.
- [17] I. E. Tabrizi, A. Kefal, J. S. M. Zanjani, C. Akalin, and M. Yildiz, “Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory,” *Compos. Struct.*, vol. 223, no. February, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110971.
- [18] E. H. Saidane, D. Scida, M. Assarar, and R. Ayad, “Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fibre composites using acoustic emission,” *Compos. Struct.*, vol. 174, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.044.
- [19] M. A. S. Siddiqui, M. S. Rabbi, and S. Dewanjee, “Low-velocity impact response of natural fiber reinforced composites: A comprehensive review on influential parameters,” *Compos. Part C Open Access*, vol. 12, no. November, 2023, doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100422.
- [20] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaidd, and K. Jayakrishna, “Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 112–121, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.008.
- [21] K. R. Kumar, T. J. Vijay, A. Bahrami, and G. Ravindran, “Structural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Biaxial Geogrid,” *Buildings*, vol. 13, no. 5, p. 1124, Apr. 2023, doi: 10.3390/buildings13051124.
- [22] J. Il Choi, S. E. Park, H. H. Nguyễn, Y. Lee, and B. Y. Lee, “Resistance of hybrid layered composite panels composed of fiber-reinforced cementitious composites against high-velocity projectile impact,” *Compos. Struct.*, vol. 281, no. November 2021, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114993.