

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

Eksplorasi komposit *sandwich* berbasis polyurethane sebagai alternatif material struktural dalam industri kelautan

R. Puranggo Ganjar Widityo^{1*}, Sumarji², Dani Hari Tunggal Prasetyo³, Subhannaan Alif Rezeki⁴,

^{1,2,4} Teknik Konstruksi Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Jember

³ Rekayasa Perancangan Mekanik, Fakultas Teknik, Universitas Jember,

Jl. Kalimantan No.37, Krajan Timur, Sumbersari, Kec. Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68121

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:
*Sandwich composite,
Polyurethane foam,
Polyurethane sheet,
CSM fiber,
Woven roving.*

The use of lightweight structural materials, high mechanical strength, and resistance to corrosive marine conditions is very important for the marine industry. The properties of lightweight, strong, and corrosion-resistant materials can be fulfilled by one of the materials, namely polyurethane sandwich composites. The purpose of this study is to study how sandwich composites function mechanically with various types of reinforcing layers (skins), including Chop Strand Mat (CSM), Woven Roving (WR), and a mixture (CSM + WR) and two types of cores, namely polyurethane sheet and polyurethane foam. This study uses a hand lay-up technique to make sandwich composite specimens. The specimens that have been made are subjected to flexural and impact tests to measure the mechanical properties of the material. The test results show that the specimen with WR skin and polyurethane sheet core has the highest flexural strength of 94.78 MPa. On the other hand, in the impact test, the WR composition also shows the best value, with an impact value of up to 0.34 J/mm² in the polyurethane foam core configuration. The sandwich composite consisting of WR layer and polyurethane foam core has the best mechanical performance in terms of flexural strength and impact toughness.

Pendahuluan

Industri kelautan membutuhkan material struktur yang ringan, kuat, dan

*Corresponding author: ganjarwidi.teknik@unej.ac.id

DOI <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.9461>

Received 12 Juli 2025; Received in revised form 7 Agustus 2025; Accepted 26 Desember 2025

Available online 1 Maret 2026

tahan terhadap korosi [1]. Material konvensional seperti logam dan kayu, yang sebelumnya menjadi bahan utama dalam konstruksi kapal, saat ini mulai ditinggalkan karena memiliki berbagai keterbatasan. Keterbatasan tersebut antara lain memiliki nilai massa yang lebih besar, biaya perawatan yang tinggi, dan kurang tahan terhadap korosi, serta ketersediaan bahan baku yang bergantung pada alam [2]. Permasalahan ini harus segera di tangani dengan memunculkan inovasi dan gagasan untuk mengatasi permasalahan yang terjadi. Salah satu alternatif solusi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan material komposit dengan struktur sandwich [3-7].

Material komposit dikenal memiliki kekakuan lentur tinggi, tahan terhadap benturan, dan memiliki massa jenis yang rendah [8-10]. Berkat keunggulan tersebut material ini cocok untuk digunakan sebagai panel, lambung dan sekat pada bagian struktur kapal [11,12]. Komposit dengan struktur sandwich, polyurethane merupakan material yang menjanjikan untuk dibentuk lembaran maupun busa [13]. *Polyurethane* memiliki kekuatan mekanik yang baik, fleksibilitas dalam proses fabrikasi, serta biaya produksi yang kompetitif, menjadikannya kandidat material struktural yang potensial. *Polyurethane* dapat digunakan dalam bentuk lembaran padat maupun busa, dengan karakteristik mekanik yang berbeda dan potensi aplikasi struktural yang berbeda. Selain itu, untuk serat kaca seperti *Chopped Strand Mat* (CSM) dan *Woven Roving* (WR) telah banyak digunakan pada sisi lapisan penguat (skin) karena mudah didapat, memiliki kekuatan tarik yang tinggi, dan dapat dibuat dengan tangan. Hal ini dikarenakan sifat mekanik yang baik dan proses manufaktur serta fabrikasi yang relatif lebih mudah, disertai dengan harganya yang kompetitif [14]. Berbagai keunggulan yang dimilikinya, komposit *sandwich* berbasis *polyurethane* bisa menjadi pilihan yang tepat untuk menggantikan material konvensional seperti pelat logam atau laminasi padat, terutama

jika dikombinasikan dengan lapisan serat kaca melalui proses *vacuum infusion* [15].

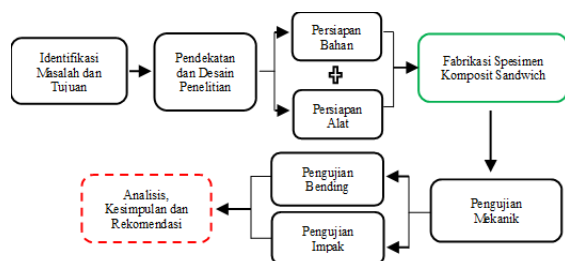
Pengembangan pada material komposit sandwich dalam dunia teknik dengan berbagai aplikasinya terus mengalami perubahan dan kemajuan besar sehingga banyak penelitian yang dilakukan. Hidayanto et al. (2024) menyelidiki modulus elastis dan kekuatan tekan komposit *sandwich* berbasis serat kaca 3D yang dilipat dengan matriks poliester tahan api dan variasi filler aluminium trioxide (ATH) [16]. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa, penggunaan preform 3D dan 2D yang dilapisi dengan penambahan ATH hingga 40% dapat meningkatkan kekuatan tekan dan modulus elastis komposit. Hal ini menunjukkan bahwa komposit dapat menjadi kandidat material ringan yang menarik untuk industri transportasi. Ma'ruf et al. (2023) dalam konteks maritim membandingkan komposit laminasi CSM–WR dan CSM–biaxial untuk kekuatan tarik dan lentur. Penelitian yang dilakukan memberikan informasi bahwa laminasi berbasis kain biaxial dapat menghasilkan kekuatan yang lebih besar dengan jumlah lapisan yang lebih sedikit, sehingga efisiensi produksi untuk kapal dapat ditingkatkan [17]. Sementara itu, Dejene dan Gudayu (2024) mempelajari literatur kritis tentang kemungkinan penggunaan kain *spacer woven* dengan diikat 3D dalam tekstil teknis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur terikat memiliki stabilitas tinggi untuk penguatan komposit, sedangkan struktur terikat lebih baik dalam pengebakan udara dan kenyamanan [18]. Di sisi lain, Xiong et al. (2023) mengkaji material kisi (*lattice*) berbahan serat komposit, dengan fokus pada desain serta respons mekaniknya dalam kondisi dinamis. Material ini memiliki struktur terbuka yang menyerupai truss atau grid, sehingga menawarkan bobot yang ringan tanpa mengorbankan kekuatan. Berkat sifat tersebut, material ini dinilai cocok untuk berbagai kebutuhan struktural, termasuk dalam pembangunan kapal dan sektor dirgantara [19]. Terakhir, Silva et al.

(2022) mengembangkan panel sandwich hibrida yang terdiri dari dinding samping dan lapisan bawah dari GFRP dan inti busa poliuretan di bagian atas. Selama 180 hari, koefisien lentur rata-rata 0,27 menunjukkan prediksi deformasi yang akurat, menurut pengujian eksperimental terhadap perilaku lentur jangka panjang (creep) [20].

Latar belakang yang telah diuraikan maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang komposit sandwich berbasis polyurethane. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja mekanik dari struktur komposit sandwich polyurethane sebagai alternatif material struktural dalam industri kelautan. Diharapkan bahwa penelitian ini akan membantu mengembangkan bahan komposit sandwich berbasis polyurethane dan menjadi dasar untuk memilih bahan struktur maritim yang lebih efisien dan berdaya guna.

Metode Penelitian

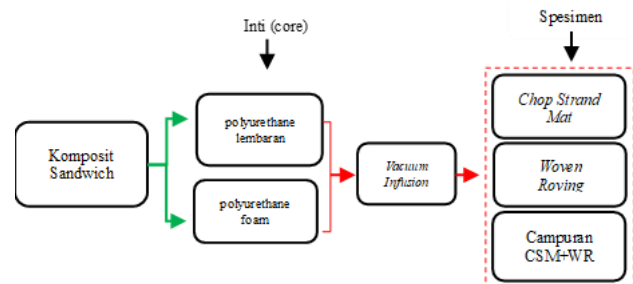
Penelitian ini dilakukan melalui metode eksperimental laboratorium dan kuantitatif. Skema penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Penelitian

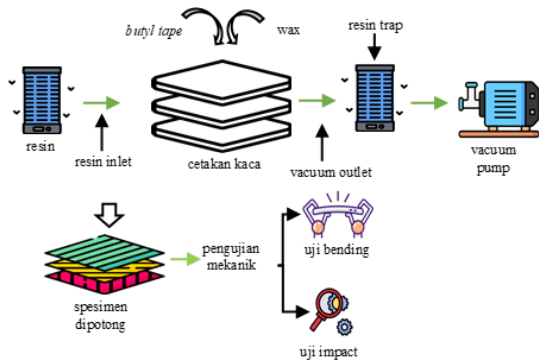
Permasalahan dan tujuan penelitian telah diidentifikasi sebelum pembahasan mengenai pendekatan serta desain eksperimen dilakukan. Pembuatan spesimen komposit sandwich, digunakan dua jenis inti berbahan polyurethane, yaitu lembaran padat dan busa (foam), yang diproses menggunakan metode vacuum infusion. Metode ini dipilih untuk memastikan resin tersebar merata dan menghindari terbentuknya rongga atau kekosongan dalam struktur komposit. Lapisan luar (skin) komposit menggunakan serat kaca jenis *chopped strand mat* (CSM), *woven roving*

(WR), dan kombinasi keduanya. Resin polyester digunakan sebagai matriks pengikat, dikatalisasi dengan hardener dan ditambahkan *styrene monomer* sebagai pengencer. Proses lengkap pembuatan spesimen komposit sandwich ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pembuatan spesimen komposit sandwich

Proses diawali dengan pembuatan cetakan dari serat kaca yang telah dilapisi wax dan diberi butyl tape sesuai ukuran. Serat kaca CSM dan WR serta kombinasi keduanya digunakan sebagai lapisan bawah, disusul material inti (lembaran atau busa polyurethane), lalu ditutup kembali dengan serat kaca. Seluruh susunan kemudian dibungkus dengan *vacuum bag* dan dihubungkan ke sistem infus menggunakan selang vakum, trap resin, dan botol serta mesin vakum. Resin *Polyester* yang telah dicampur katalis dan styrene monomer diinfuskan hingga merata ke seluruh bagian. Setelah proses *curing* selesai, spesimen dipotong sesuai dimensi pengujian. Foam polyurethane diperoleh dengan mencetak campuran komponen A dan B dalam rasio 1:1, lalu digunakan sebagai inti pada susunan laminasi yang sama seperti versi lembaran. Skema proses ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pembuatan material

Setelah material terbentuk, dilanjutkan dengan pengujian mekanik. Pengujian mekanik dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik bending dan pengaruh struktur komposit sandwich. Pengujian mekanik pada penelitian ini adalah uji bending dan uji impact. Uji bending menggunakan metode tiga titik yang mengacu pada standar ASTM C393. Spesimen yang digunakan berukuran 110 mm × 30 mm × 10 mm. Sementara itu, uji impact dilakukan berdasarkan standar ASTM D256 menggunakan metode Izod, dengan dimensi spesimen 65 mm × 12,7 mm × 12,7 mm. Nilai uji bending dapat dihitung dengan persamaan (1) sedangkan untuk menghitung nilai uji impact menggunakan persamaan (2).

- Perhitungan Uji Bending

$$\sigma = \frac{P \times L}{2t(d + c)b} \quad (1)$$

Keterangan :

σ = Kekuatan bending permukaan sandwich (Mpa)

- P : Beban (N)
- L : Panjang bentang (mm)
- t : Ketebalan skin (mm)
- d : Ketebalan spesimen (mm)
- c : Ketebalan pada core (mm)
- b : Lebar spesimen (mm)

- Perhitungan Uji Impact

$$\text{Nilai Impact} = \frac{W}{bi \times hi} \quad (2)$$

Keterangan :

W : energi yang terserap oleh material yang diuji (J)

bi : lebar material yang diuji (mm)

hi : tebal material yang diuji (mm)

Setelah nilai data diperoleh dilanjutkan dengan analisis data secara kuantitatif dan direkap dalam bentuk tabel serta grafik. Analisis dilakukan dengan membandingkan variasi jenis lapisan kulit dan material inti.

Hasil dan Pembahasan

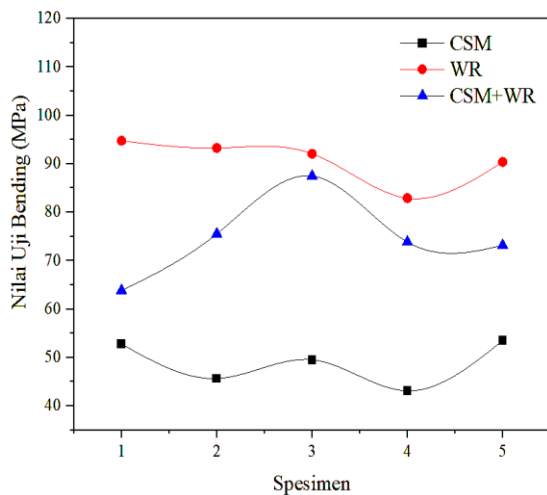
Hasil pengujian komposit sandwich yang dilakukan melalui uji bending dan uji impact dengan variasi lapisan penguat yang meliputi CSM, WR, dan kombinasi CSM+WR serta dua jenis material inti, yaitu polyurethane sheet dan polyurethane foam, dibahas secara rinci pada Subbab A dan B.

A. Uji Bending

Pengujian bending dilakukan untuk mengetahui kekuatan dan kekenyalan pada material. Uji bending dilakukan dengan menekuk material diantara dua penyangga pada alat uji bending. Pada pengujian bending berfokus pada kemampuan material untuk mengetahui nilai elastisitas. Kombinasi konfigurasi skin dan tipe inti pada komposit sandwich digunakan sebagai dasar untuk menganalisis karakteristik elastisitasnya. Oleh karena itu, pengujian dilakukan terhadap dua jenis material yaitu polyurethane lembaran dan foam. Masing-masing material dikombinasikan dengan tiga jenis kulit berbeda yaitu Chop Strand Mat (CSM), Woven Roving (WR), dan campuran (CSM+WR).

- Hasil Uji Bending pada Komposit Sandwich dengan Inti Polyurethane Lembaran

Hasil uji bending pada komposit sandwich menggunakan inti polyurethane lembaran pada berbagai lapisan penguat yang digunakan seperti serat CSM, WR, dan CSM + WR dapat diamati pada Gambar 4.

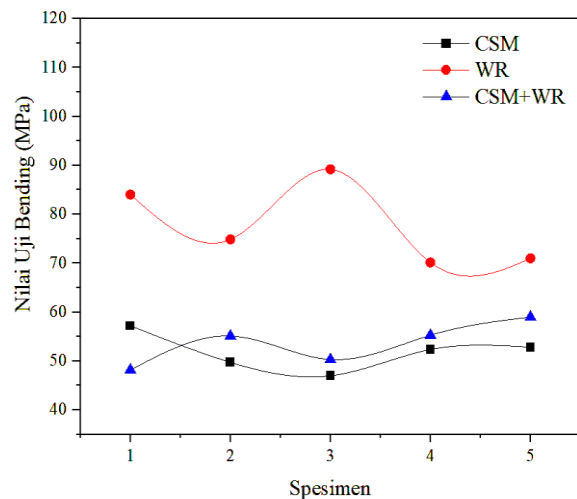


Gambar 4. Hasil Uji Bending pada Komposit Sandwich dengan Core Polyurethane Lembaran

Hasil pengujian secara keseluruhan menunjukkan bahwa variasi komposisi WR memiliki tegangan lentur (bending stress) tertinggi dari semua variasi spesimen yang digunakan. Nilai tegangan lentur pada spesimen WR memiliki nilai rata-rata 90,69 MPa, kemudian diikuti oleh spesimen CSM + WR dengan nilai sebesar 74,79 MPa dan spesimen CSM dengan nilai sebesar 48,93 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa struktur anyaman WR sangat membantu meningkatkan kekuatan lentur. Serat WR, dengan pola penyusunan yang sistematis dan kerapatan tinggi, memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan beban lentur dibandingkan serat acak pada CSM. Spesimen campuran CSM+WR menghasilkan nilai menengah, dan memiliki performa lebih rendah dari WR, namun lebih baik daripada CSM. Nilai maksimum spesimen CSM+WR pada pengujian bending sebesar 87,50 MPa pada spesimen 3 dan nilai terendah sebesar 63,86 MPa pada spesimen 1. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi dua jenis serat dapat menciptakan sinergi kekuatan, meskipun tidak seoptimal dengan WR tunggal. Hal ini disebabkan oleh struktur acak serat CSM yang lebih rendah.

- Hasil Uji Bending pada Komposit Sandwich dengan Inti Polyurethane Foam

Hasil pengujian bending pada komposit sandwich dengan inti polyurethane foam ditunjukkan pada Gambar 5. Variasi spesimen yang digunakan saat penelitian terdiri dari jenis CSM, WR, dan CSM + WR sesuai dengan metode penelitian yang telah dijelaskan pada metode penelitian.



Gambar 5. Hasil Uji Bending pada Komposit Sandwich dengan Core Polyurethane Foam

Hasil pengujian bending dengan menggunakan komposit sandwich polyurethane foam menunjukkan bahwa WR tetap memiliki nilai tegangan lentur tertinggi dari spesimen yang diuji pada penelitian ini. Nilai rata-rata pada masing-masing komposit sandwich polyurethane foam dengan spesimen WR, CSM dan CSM+WR masing-masing sebesar 77,86 MPa; 51,83 MPa dan 53,59 MPa. Nilai tertinggi pada pengujian bending terletak pada spesimen WR 3 sebesar 89,22 MPa. Sedangkan nilai tegangan terendah sebesar 70,16 MPa pada spesimen WR 4. Jika ditinjau nilai tegangan menghasilkan nilai yang beragam pada inti foam polyurethane. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi kepadatan struktur foam tidak sehomogen dengan core polyurethane lembaran, yang dapat mempengaruhi distribusi tegangan pada kulit. Penggabungan CSM dengan WR, inti foam menghasilkan nilai maksimum sebesar 59,00 MPa yang terjadi pada spesimen 5 dan nilai terendah sebesar 48,21 MPa pada spesimen 1.

- Perbandingan Performansi Inti Polyurethane Lembaran dan Polyurethane Foam

Perbandingan performansi inti polyurethane lembaran dan polyurethane foam dengan pengujian bending menunjukkan bahwa inti polyurethane lembaran lentur lebih baik daripada foam polyurethane pada berbagai jenis kulit (skin). Hal ini disebabkan salah satunya dari sifat fisik lembaran polyurethane yang memiliki sifat lebih rapat dan mampu mendistribusikan beban secara merata ke kulit. Hasil pengujian dapat diamati nilai rata-rata yang dihasilkan melalui uji bending dari ketiga spesimen yang di uji dan dua perbandingan pada variasi kulit (skin). Nilai rata-rata hasil pengujian dapat diamati pada Tabel 1 dengan menunjukkan nilai tegangan lentur untuk masing-masing konfigurasi.

Tabel 1. Nilai Rata-Rata Tegangan Lentur Untuk Masing-Masing Konfigurasi

Variasi Skin	Polyurethane Lembaran (MPa)	Polyurethane Foam (MPa)
CSM	48,93	51,83
WR	90,69	77,86
CSM + WR	74,79	53,59

Nilai rata-rata tegangan lentur untuk masing-masing konfigurasi pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kulit WR dengan core polyurethane memiliki nilai kekuatan lentur tertinggi dari semua spesimen yang telah dilakukan pengujian. Selain itu, dapat diamati bahwa penggunaan kulit WR meningkatkan kekuatan struktur komposit sandwich.

- Analisis Mekanisme Struktur Komposit
Terdapat tiga komponen utama yang memengaruhi kinerja lentur (bending) pada komposit sandwich, antara lain jenis serat penguat pada lapisan kulit, struktur matriks, dan karakteristik inti. Pada penelitian ini, jenis resin sebagai matriks dijaga tetap, sehingga perbedaan kekuatan lebih banyak

dipengaruhi oleh variasi pada lapisan kulit dan material inti (core). Konfigurasi tenunan pada serat WR memungkinkan material ini menahan deformasi lentur secara efektif, sehingga memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan keseluruhan komposit. Selama pengujian lentur, WR mampu menahan gaya tarik dan tekan dengan baik. Sebaliknya, serat CSM yang memiliki orientasi acak cenderung kurang optimal dalam mendistribusikan gaya, yang berdampak pada performa lentur yang lebih rendah. Sisi inti (core), lembaran polyurethane menunjukkan modulus elastisitas dan kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan busa (foam), sehingga lebih mampu menopang beban dari lapisan kulit. Sementara itu, inti berbahan busa memang ringan, tetapi rentan terhadap ketidakstabilan saat menerima beban lentur besar karena struktur pori yang terbuka dan kemungkinan adanya rongga (void) di dalamnya.

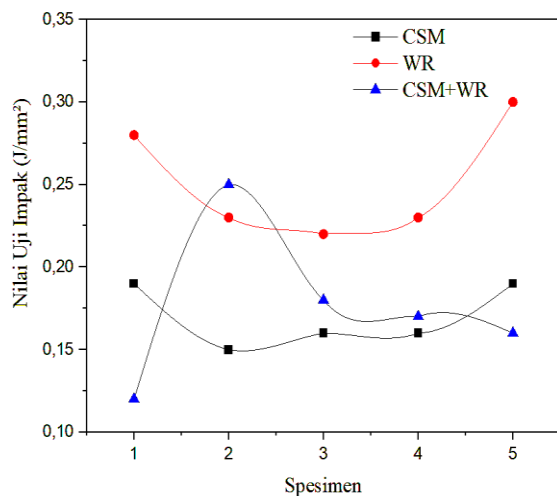
B. Uji Impact

Pengujian impak merupakan salah satu cara untuk mengetahui nilai performa atau kinerja mekanik pada suatu material terhadap beban dinamis. Pada pengujian impact yang dilakukan pada penelitian ini berfokus pada kemampuan material untuk menyerap energi yang dihasilkan oleh tumbukan mendadak. Hal ini dikarenakan konfigurasi lapisan luar (kulit) dan jenis inti yang digunakan dalam material sandwich sangat memengaruhi sifat impact material. Oleh karena itu, uji coba dilakukan terhadap dua jenis inti polyurethane, yaitu polyurethane lembaran dan foam. Pada masing-masing material dikombinasikan dengan tiga jenis kulit berbeda yaitu CSM, WR, dan campuran CSM + WR.

- Hasil Uji Impact pada Komposit Sandwich dengan Lembaran

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 6 menghasilkan nilai uji impak dengan spesimen CSM, WR, dan campuran CSM + WR. Nilai uji impak pada spesimen WR memberikan kontribusi terbesar

terhadap peningkatan energi serap dan nilai impak. Hal ini dapat diamati pada nilai spesimen WR yang memiliki nilai rata-rata uji impak pada spesimen WR sebesar 0,25 J/mm². Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kulit CSM sebesar 0,17 J/mm² dan spesimen campuran CSM + WR dengan nilai rata-rata sebesar 0,18 J/mm². Pada spesimen WR 5 menunjukkan nilai performa rata-rata terbaik diantara spesimen yang lain.



Gambar 6. Hasil Pengujian Impak Core Polyurethane Lembaran

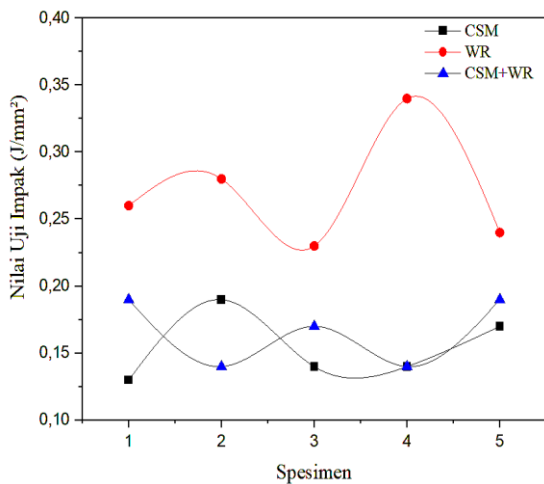
Spesimen dengan lapisan WR menunjukkan nilai impak yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Keunggulan ini disebabkan oleh karakteristik struktur geometris WR, yang terdiri atas pola anyaman teratur dan orientasi serat sejajar dalam dua arah utama, yaitu *warp* dan *weft*. Konfigurasi ini memungkinkan distribusi tegangan yang lebih merata saat terjadi tumbukan dalam pengujian impak, sehingga transfer tegangan berlangsung lebih efisien di sepanjang struktur komposit. Energi yang diterima saat terjadi tumbukan tidak terkonsentrasi pada titik tumbukan, tetapi tersebar di area yang lebih luas. Hal ini tentunya pada kulit WR dapat menahan deformasi lokal yang ekstrim dan mencegah delaminasi awal sehingga nilai impak pada spesimen WR memiliki nilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang lain. Namun, kulit CSM yang terdiri dari serat

pendek acak memiliki kemampuan menyerap energi yang lebih rendah karena orientasi acak mengganggu distribusi beban, menyebabkan titik lemah lokal yang rentan mengalami kegagalan saat menerima beban benturan. Akibatnya, kulit CSM lebih cepat rusak dan tidak mampu mendukung inti untuk menyerap energi.

Menariknya, kombinasi antara serat CSM dan WR tidak menunjukkan efek sinergis seperti yang diharapkan. Dibandingkan dengan penggunaan lapisan WR tunggal, konfigurasi gabungan ini justru menghasilkan nilai yang lebih rendah, menunjukkan bahwa penambahan CSM tidak memberikan kontribusi positif terhadap performa mekanik keseluruhan. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan CSM di atas atau di bawah WR dapat mengganggu distribusi tegangan yang seharusnya ditangani secara merata oleh WR. Selain itu, ketidakselarasan mekanis di zona antarmuka juga dikenal sebagai ketidakselarasan antarmuka dapat disebabkan oleh perbedaan ketebalan, karakter permukaan, dan sifat mekanik kedua jenis serat ini. Ketidakselarasan antarmuka ini dapat menyebabkan delaminasi dini.

- Hasil Uji Impact pada Komposit Sandwich dengan Inti Foam

Nilai uji impak dengan variasi komposisi CSM, WR, dan CSM + WR ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai rata-rata pada masing-masing komposisi CSM, WR, dan CSM+WR sebesar 0,15 J/mm²; 0,27 J/mm²; dan 0,17 J/mm². Performa kinerja terbaik pada masing-masing spesimen terjadi pada komposisi WR, hal ini menunjukkan bahwa komposisi WR memiliki kapasitas material yang baik untuk menahan tumbukan.



Gambar 7. Hasil Pengujian Impak Core Polyurethane Foam

Gambar 7 menunjukkan bahwa spesimen dengan lapisan WR memiliki nilai impak tertinggi dibandingkan spesimen uji lainnya. Hal ini disebabkan oleh kulit WR yang kaku dan inti busa (foam) yang elastis, sehingga mampu meredam energi tumbukan secara efektif dan menghasilkan performa impak yang optimal. Sinergi ini meningkatkan ketahanan struktural dan daya serap energi. Hasil pengujian impak menunjukkan bahwa komposisi WR memiliki kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan komposisi lain pada penelitian ini. Namun, ketika dikombinasikan dengan CSM yaitu kombinasi CSM + WR, performanya cenderung setara atau sedikit lebih rendah. Hal ini berkaitan dengan sifat viskoelastik inti polyurethane yang mampu menyerap deformasi dinamis dengan baik, namun memerlukan lapisan kulit yang efektif dalam menahan dan mendistribusikan tegangan secara merata.

- Implikasi Struktural

Secara keseluruhan, hasil penelitian komposit sandwich dengan berbagai jenis lapisan penguat, termasuk serat CSM, WR, dan CSM + WR, serta jenis inti (core), yaitu penggunaan polyurethane foam menunjukkan pentingnya pemilihan konfigurasi struktur sandwich yang tepat guna menghasilkan material dengan performa yang optimal. Spesimen WR

memiliki ketahanan tertinggi terhadap tumbukan. Hasil pengujian menjadi informasi untuk proses perancangan komposit sandwich, terutama untuk aplikasi struktural seperti panel kapal yang ringan, atau elemen perlindungan dalam industri perkapalan. Dari hasil pengujian menginformasikan bahwa untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap tumbukan tinggi, dapat menggunakan spesimen WR. Namun, untuk spesimen kombinasi, perlu diperhatikan area antarmuka dan pengolahan manufaktur untuk mencegah delaminasi dan kegagalan prematur. Struktur inti juga memegang peranan penting, di mana polyurethane foam menunjukkan ketahanan tumbukan yang lebih baik pada beberapa konfigurasi karena kemampuannya menyerap energi melalui deformasi internal yang tinggi. Nilai rata-rata hasil pengujian impak dapat diamati pada Tabel 2 untuk masing-masing konfigurasi.

Tabel 2. Nilai Rata-Rata Hasil Pengujian Impak Untuk Masing-Masing Konfigurasi

Variasi Skin	Polyurethane Lembaran (J/mm²)	Polyurethane Foam (J/mm²)
CSM	0,17	0,15
WR	0,25	0,27
CSM + WR	0,18	0,17

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja mekanik material sandwich dengan dua jenis inti, yakni polyurethane lembaran dan polyurethane foam, melalui pengujian kekuatan lentur dan ketahanan impak. Hasil menunjukkan bahwa jenis lapisan luar (skin) berpengaruh signifikan terhadap performa struktural. Skin berbasis woven roving (WR) konsisten memberikan hasil terbaik dibandingkan chopped strand mat (CSM) maupun kombinasi WR + CSM. Pada uji lentur, konfigurasi WR dengan inti polyurethane lembaran menghasilkan tegangan

maksimum 94,78 MPa, menandakan kekakuan yang superior. Sebaliknya, skin CSM hanya mencapai 53,53 MPa akibat orientasi serat acak yang kurang efektif dalam mendistribusikan beban. Uji dampak memperkuat temuan ini, hasil WR menunjukkan nilai tertinggi sebesar 0,34 J/mm² pada inti polyurethane foam. Kombinasi CSM + WR tidak memberikan peningkatan performa yang berarti dan berisiko menyebabkan delaminasi antarlapisan. Secara keseluruhan, skin WR terbukti unggul dalam kedua aspek mekanik, menjadikannya pilihan optimal untuk aplikasi material sandwich yang menuntut kekakuan tinggi dan ketahanan terhadap tumbukan.

Referensi

- [1] S. Hastuti, C. *et al.*, “Peningkatan Kekuatan Mekanik Komposit Sandwich Serat Kenaf dengan Core Kayu Albizzia Falcataria untuk Material Dinding Komposit,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 2, p. 249, 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i2.3216.
- [2] A. Ismail, “Kajian Teknis Penerapan Material Sandwich Pada Struktur Lambung Kapal Tanker,” *Arika*, vol. 15, no. 2, pp. 125–132, 2021, doi: 10.30598/arika.2021.15.2.125.
- [3] M. Z. Al-Syachri *et al.*, “Identifikasi Kerusakan Berbasis Getaran,” *J. Tek. ITS Vol. X, No. Y, ISSN 2337-3539 (2301-9271 Print)*, vol. X, 2019.
- [4] B. Castanie, C. Bouvet, and M. Ginot, “Review of composite sandwich structure in aeronautic applications,” *Compos. Part C Open Access*, vol. 1, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100004.
- [5] J. Chen, *et al.*, “Improving the electrochemical performance of ultrahigh-nickel-based layered LiNi_{0.95}Mn_{0.05}O₂ cathode through cobalt modification for next-generation high-energy Li-ion batteries,” *Electrochem. commun.*, vol. 152, no. April, p. 107514, 2023, doi: 10.1016/j.elecom.2023.107514.
- [6] D. Chen, *et al.*, “Study on the influence factors of the bearing characteristics of the ship with an integrated glass fiber sandwich composite superstructure,” 2021.
- [7] N. Baroiu, E. F. Beznea, *et al.*, “Static and thermal behaviour of ship structure sandwich panels,” *Therm. Sci.*, vol. 25, no. 2 Part A, pp. 1109–1121, 2021, doi: 10.2298/TSCI190531463B.
- [8] Nazaruddin *et al.*, “Pembuatan Boat Ikan 2 Gt (Gross Tonnage) Bagi Nelayan Aceh Untuk Peningkatan Tangkapan Ikan Menuju Ketahanan Pangan Selama Pandemi Covid 19,” vol. 5, pp. 75–84, 2021.
- [9] M. Marsono, *et al.*, “Pembuatan dan Pengujian Panel Honeycomb Sandwich dengan Inti Berbentuk Gelombang Berbahan Komposit Serat Bambu,” *J. Rekayasa Hijau*, vol. 5, no. 2, pp. 165–177, 2021, doi: 10.26760/jrh.v5i2.165-177.
- [10] M. S. Fadly, “Ketahanan balistik plat aluminum berlubang – komposit serat kevlar akibat dampak proyektil bentuk hemispherical,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 2, p. 137, 2023, doi: 10.29303/dtm.v13i2.653.
- [11] H. M. C. C. Somarathna *et al.*, “The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 995–1014, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166.
- [12] A. Nurudin, “Potensi Pengembangan Komposit Berpenguat Serat Kulit Waru (*Hibiscus Tiliaceus*) Kontinyu Laminat Sebagai Material Pengganti Fiberglass Pada Pembuatan Lambung Kapal,” *Info Tek.*, vol. 12, no. 2, pp. 1–9, 2011.
- [13] H. Safari, M. Karevan, and H. Nahvi, *Mechanical characterization of natural nano-structured zeolite/polyurethane filled 3D woven glass fiber composite sandwich panels*, vol. 67. Elsevier Ltd, 2018. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.03.018.

- [14] A. Rusminanda, "Analisis Kekuatan Material Fiber Carbon Dengan Variasi Core Terhadap Kekuatan Impak pada Tulangan Bodi Mobil Garnesa Racing Team," *Jtm*, vol. 09, no. 2, pp. 93–100, 2021.
- [15] A. F. Nejad *et al.*, "Mechanical behaviour of pin-reinforced foam core sandwich panels subjected to low impact loading," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 21, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/polym13213627.
- [16] R. Hidayanto, *et al.* "Compressive Strength and Elastic Modulus of a 3D Woven Glass/Polyester Fire-Retardant Sandwich Composite," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 10981–10992, 2024, doi: 10.15282/ijame.21.1.2024.03.0849.
- [17] B. Ma'Ruf, *et al.*, "Strength analysis of marine biaxial warp-knitted glass fabrics as composite laminations for ship material," *Curved Layer. Struct.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1515/cls-2022-0209.
- [18] B. K. Dejene and A. D. Gudayu, "Exploring the potential of 3D woven and knitted spacer fabrics in technical textiles: A critical review," *J. Ind. Text.*, vol. 54, pp. 1–55, 2024, doi: 10.1177/15280837241253614.
- [19] J. Xiong *et al.*, "Design, fabrication, and dynamic mechanical responses of fiber-reinforced composite lattice materials," *Int. J. Mech. Syst. Dyn.*, vol. 3, no. 3, pp. 213–228, 2023, doi: 10.1002/msd2.12085.
- [20] T. Silva *et al.*, "Flexural Creep Response of Hybrid GFRP–FRC Sandwich Panels," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 7, 2022, doi: 10.3390/ma15072536.