

Pemanfaatan Limbah Kulit Kayu Kersen (*Muntingia Calabura*) Sebagai Penguat Komposit Matriks Polimer yang Ramah Lingkungan

¹Yoan Perima, ²Putri Nawangsari, ³Dedy Masnur

^{1,2,3}Teknik Mesin, Universitas Riau

Email: ¹yoanprimanusantara@gmail.com, ²putrinawangsari@lecturer.unri.ac.id,
³dedy.masnur@lecturer.unri.ac.id

³dedy.masnur@lecturer.unri.ac.id

Penulis Korespondens : Putri Nawangsari

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah kulit kayu kersen (*Muntingia Calabura*) sebagai penguat komposit matriks polimer yang ramah lingkungan. Serat kulit kayu diekstraksi dan diberi perlakuan alkalisasi dengan larutan NaOH 9% untuk meningkatkan ikatan antar muka serat dan matriks sehingga memberi peningkatan sifat mekanis komposit. Komposit difabrikasi dengan metode hand lay-up dengan fraksi volume serat 10%, 20%, 30%, dan 40%, kemudian diuji densitas, kekuatan tarik, dan ketangguhan impak. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan fraksi serat hingga 40% menurunkan densitas komposit dari 1,208 g/cm³ menjadi 1,173 g/cm³ dan meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, regangan patah, serta energi impak. Temuan ini menunjukkan bahwa limbah kulit kayu kersen dapat menjadi bahan penguat komposit yang ramah lingkungan sehingga dapat memberi kontribusi terhadap pengurangan limbah tidak terurai.

Kata Kunci— Komposit, Kersen, Matriks, Polimer, *Muntingia Calabura*, Serat Alam

Abstract— This study aims to utilize *Muntingia calabura* bark waste as a reinforcement for environmentally friendly polymer matrix composites. The bark fibers were extracted and subjected to alkaline treatment with a 9% NaOH solution to enhance fiber-matrix interfacial bonding, thereby improving the mechanical properties of the composite. The composites were fabricated using the hand lay-up method with fiber volume fractions of 10%, 20%, 30%, and 40%, and subsequently tested for density, tensile strength, and impact toughness. The results indicate that increasing the fiber content up to 40% reduced the composite density from 1.208 g/cm³ to 1.173 g/cm³ while enhancing tensile strength, elastic modulus, elongation at break, and impact energy. These findings demonstrate that *Muntingia calabura* bark waste can serve as an eco-friendly composite reinforcement, thereby contributing to the reduction of non-biodegradable waste

Keywords— Composite, Kersen, Matriks, Polymer, *Muntingia Callabura*, Natural Fiber

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Komposit adalah material yang terdiri dari dua atau lebih komponen pendukung yang digabungkan untuk memperoleh sifat fisis dan mekanis yang lebih baik dibandingkan komponen tunggalnya. Persaingan global dalam pengembangan teknologi telah mendorong komposit menjadi material masa depan pengganti material konvensional seperti logam, keramik, kayu, dan polimer [1]. Keunggulan komposit meliputi bobot ringan, ketahanan terhadap korosi, kemampuan fabrikasi dalam bentuk yang kompleks, dan biaya produksi yang relatif rendah [2]. Komposit

matriks polimer merupakan jenis komposit dengan penguat serat alam atau sintetis yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari mainan anak hingga industri penerbangan [3].

Dalam beberapa dekade terakhir, kesadaran terhadap isu lingkungan semakin meningkat, sehingga mendorong penggunaan material terbarukan, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Salah satu material yang berpotensi memberikan kontribusi positif adalah biokomposit dengan penguat serat alam. Penggunaan komposit serat alam kian hari semakin berkembang untuk menggantikan komposit berbasis serat sintetis yang bersifat *non-biodegradable* yang berdampak negatif terhadap lingkungan [4].

Salah satu sumber serat alam yang potensial tetapi belum banyak dimanfaatkan adalah limbah kulit kayu kersen (*Muntingia calabura*). Pohon kersen yang banyak tumbuh di wilayah Indonesia, umumnya hanya dimanfaatkan sebagai tanaman peneduh atau tumbuh liar. Kulit kayunya sering menjadi limbah dari aktivitas pemangkasan atau penebangan, sehingga belum memiliki nilai guna yang optimal. Padahal, kulit kayu kersen berpotensi mengandung komponen lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan penguat komposit matriks polimer [5].

Dalam pemanfaatan serat kulit kayu kersen sebagai penguat komposit matriks polimer terdapat beberapa kendala seperti sifat serat yang hidrofilik dan matriks bersifat hidrofilik, perbedaan karakter ini dapat menyebabkan ikatan antar muka serat dan matriks menjadi kurang optimal, sehingga beban yang diterima komposit tidak dapat ditransfer dengan baik dari matriks ke serat [6]. Oleh karena itu, pada penelitian ini kulit kayu yang telah di ekstraksi untuk mendapatkan serat akan diberikan proses alkalisasi dengan larutan NaOH sebelum difabrikasi menjadi komposit. Dengan perlakuan alkalisasi, serat diharapkan memiliki kemampuan ikatan antar muka yang lebih baik dengan matriks sehingga dapat mengoptimalkan kekuatan mekanis komposit yang dihasilkan [7].

Untuk mengevaluasi sifat fisis dan mekanis komposit yang dihasilkan agar dapat diketahui kualitas dan kelayakan komposit untuk aplikasi yang tepat, maka perlu dilakukan beberapa tahapan pengujian. pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian densitas komposit, pengujian kekuatan tarik komposit dan pengujian impact charphy [8].

Melalui rangkaian tahapan penelitian mengenai pemanfaatan limbah kulit kayu kersen (*Muntingia calabura*) sebagai penguat komposit matriks polimer diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material komposit berbasis serat alam yang ringan, ekonomis, dan ramah lingkungan [9], [10].

II. METODE

2.1. Object penelitian

Kulit kayu kersen (*Muntingia Calabura*) yang digunakan sebagai objek penelitian diambil dari wilayah kota Pekanbaru provinsi Riau dengan diameter dahan 10 cm sampai 30 cm.

2.2. Ekstraksi kulit kayu

Dahan pohon kersen yang telah dikumpulkan lalu dipotong sepanjang 50cm untuk dikikis kulit luarnya agar lapisan keras dan pengotor terlepas. Kulit kayu yang telah bersih, direndam didalam air selama 15 hari agar terjadi pembusukan untuk mempermudah pengelupasan. Kulit kayu yang telah mengalami pembusukan lalu dikelupaskan dan dijemur selama 24 jam dibawah

matahari. Setelah dijemur dan kering, Kulit kayu disisir dengan sisir besi sehingga didapat serat untuk proses selanjutnya [11]. Proses ekstraksi ditampilkan pada gambar 1.



Gambar 1. Proses Ekstraksi Serat Kulit Kayu Kersen

2.3. Perlakuan alkalisasi

Perlakuan alkalisasi dilakukan dengan merendam serat selama 2 jam pada larutan NaOH dengan konsentrasi 9% [11]. Perlakuan alkalisasi bertujuan untuk mengurangi kandungan hemiselulosa, lignin, dan lilin pada serat, sehingga permukaan serat menjadi lebih bersih dan kasar. Dengan perlakuan alkalisasi, akan memberikan pengaruh positif terhadap ikatan antar muka serat dan matriks, sehingga menghasilkan transfer beban dari matriks ke serat lebih efektif. Selain itu, alkalisasi dapat meningkatkan kristalinitas selulosa dan stabilitas dimensi serat, sehingga komposit yang dihasilkan memiliki sifat mekanik yang lebih baik. Perlakuan NaOH merupakan langkah penting untuk memastikan serat alam dapat berfungsi optimal sebagai penguat pada komposit matriks polimer [12].

2.4. Pengujian Densitas Serat

Serat kulit kayu kersen yang telah kering setelah perlakuan alkalisasi dihaluskan menjadi serbuk, kemudian pengujian densitas serat dilakukan dengan metode piknometer. Pengujian densitas serat bertujuan untuk mendapatkan volume serat per satuan berat, sehingga nilai densitas dapat digunakan sebagai acuan fraksi volume serat saat pembuatan komposit. Untuk menghitung densitas serat dengan metode piknometer digunakan persamaan 1 [13].

$$\rho_p = \rho_w(W_s - W_a) / [(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)] \quad (1)$$

Keterangan:

- ρ_p : Densitas serbuk (g/cm^3)
- ρ_w : Densitas air (g/cm^3)
- W_s : Berat piknometer dan serbuk (g)
- W_a : Berat piknometer kosong (g)
- W_{sw} : Berat piknometer, serbuk dan air (g)
- W_w : Berat piknometer dan air (g)

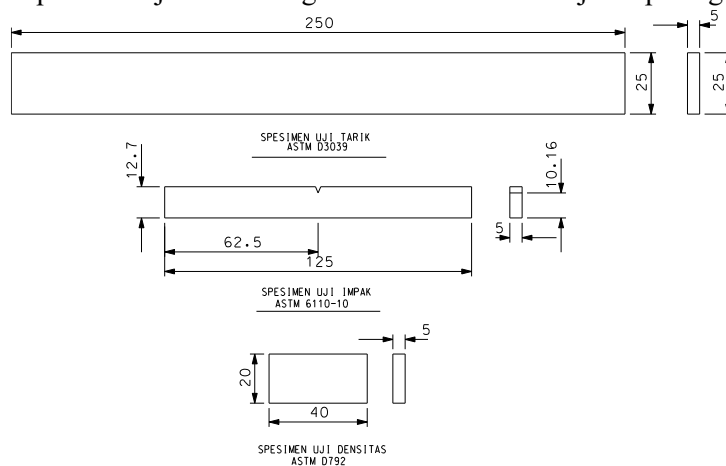
2.5. Fabrikasi komposit

Fabrikasi komposit diawali dengan pembuatan cetakan lembaran komposit sesuai ukuran yang dibutuhkan. Cetakan yang telah selesai dibuat kemudian dibersihkan untuk menghilangkan kotoran, debu, atau sisa material yang dapat memengaruhi kualitas permukaan komposit.

Selanjutnya, permukaan cetakan dilapisi release agent agar lembaran komposit mudah dilepaskan setelah proses pengerasan.

Komposit difabrikasi menggunakan metode hand lay-up dengan matriks resin poliester dengan variasi fraksi serat sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40%. Pembuatan komposit dilakukan dengan mencampurkan serat dan resin dituangkan ke dalam cetakan, kemudian diratakan dan dipadatkan agar mengisi seluruh permukaan cetakan secara merata. Setelah itu, komposit ditekan menggunakan pemberat seberat 20 kg selama proses curing untuk meningkatkan kepadatan serta meminimalkan terbentuknya rongga atau void pada komposit [14].

Setelah proses pencetakan selesai, lembaran komposit dilepaskan dari cetakan dan dipotong menjadi spesimen uji sesuai standar yang digunakan. Spesimen uji tarik dibuat mengacu pada ASTM D3039, spesimen uji densitas mengacu pada ASTM D792, dan spesimen uji impact Charpy mengacu pada ASTM D6110-10. Setiap variasi fraksi serat dibuat sebanyak 5 spesimen untuk masing-masing pengujian, sehingga hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh fraksi serat terhadap densitas, kekuatan tarik, dan ketangguhan impact komposit. Ukuran spesimen uji sesuai dengan standar ASTM disajikan pada gambar 2 [15].



Gambar 2. Ukuran spesimen uji tarik, uji impact, dan uji densitas

2.6. Pengujian Densitas Komposit

Uji densitas komposit dilakukan berdasarkan standar ASTM D792 untuk mengetahui massa jenis komposit pada setiap variasi fraksi serat. Untuk menghitung densitas komposit dilakukan dengan metode archimedes menggunakan persamaan 2 [16].

$$\rho_{actual} = \frac{W_{udara}}{W_{udara} - W_{fluida}} \quad (2)$$

Keterangan

- ρ_{actual} : Densitas aktual (g/cm³)
- W_{udara} : Berat spesimen di udara (g)
- W_{fluida} : Berat spesimen di dalam air (g)

Pengujian densitas komposit bertujuan untuk mengetahui tingkat kepadatan material serta mengevaluasi kemungkinan adanya rongga atau void yang terbentuk selama proses fabrikasi. Nilai densitas yang diperoleh digunakan sebagai parameter untuk membandingkan pengaruh

peningkatan fraksi serat terhadap densitas komposit. Gambar spesimen uji densitas komposit disajikan pada gambar 3.



Gambar 3. Spesimen uji densitas serat

2.7. Pengujian Kekuatan tarik komposit

Pengujian tarik komposit mengacu kepada standar ASTM D3039, pengujian tarik bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan mekanis komposit terkait kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas dan regangan, sehingga dapat disimpulkan pengaruh fraksi serat dan metode yang digunakan saat fabrikasi terhadap hasil akhir kekuatan mekanis komposit [17]. Dengan mengetahui kekuatan mekanis komposit, material komposit yang dihasilkan dapat dipilih dan digunakan pada aplikasi yang tepat sesuai dengan kemampuan mekanisnya. Gambar spesimen uji tarik disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Spesimen uji tarik

2.8. Pengujian Kekuatan *Impact Charpy* Komposit

Uji *impact Charpy* dilakukan berdasarkan standar ASTM D6110-10 untuk mengetahui ketangguhan komposit terhadap beban kejut. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kemampuan material dalam menyerap energi benturan sebelum mengalami patah. Nilai energi impak yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi pengaruh fraksi serat terhadap ketahanan komposit saat mendapatkan beban mendadak [18]. Gambar spesimen uji *impact* disajikan pada gambar 5.



Gambar 5. Spesimen uji impact charphy

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Densitas Serat

Serat kersen yang diberi perlakuan alkalisasi dengan larutan NaOH 9% setelah dilakukan pengujian densitas dengan metode piknometer dan dihitung menggunakan persamaan 1 didapatlah nilai densitas serat sebesar $0,820 \text{ g/cm}^3$. Nilai densitas serat digunakan untuk menghitung kebutuhan serat berdasarkan fraksi volume saat fabrikasi komposit.

3.2. Hasil Pengujian Densitas Komposit

Dari hasil pengujian densitas komposit, diperoleh nilai rata-rata dan standard deviasi pada setiap variasi fraksi volume serat. komposit dengan fraksi volume serat 40% memiliki densitas terendah dan fraksi volume serat 10% memiliki densitas tertinggi. Nilia rata-rata densitas komposit pada setiap fraksi volume disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Rata- Rata Densitas Komposit

No	Komposisi Serat	Rata -rata Densitas	STDV
1	10%	1,208	0,009
2	20%	1,198	0,017
3	30%	1,191	0,013
4	40%	1,173	0,014

Dari tabel dapat dilihat terjadi penurunan densitas komposit seiring dengan penambahan komposisi serat, fraksi volume serat 10% memiliki densitas $1,208 \text{ g/cm}^3$ kemudian menurun sebanyak 0,83% pada fraksi volume serat 20% menjadi $1,198 \text{ g/cm}^3$, Penurunan densitas terus terjadi pada fraksi volume serat 30% sebanyak 0,58% menjadi $1,191 \text{ g/cm}^2$ dan puncaknya pada fraksi volume serat 40% sebagai densitas terbaik, penurunan densitas sebanyak 1,51% menjadi $1,173 \text{ g/cm}^2$.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa densitas menurun seiring dengan peningkatan fraksi volume serat. Penurunan densitas ini disebabkan oleh penggantian material matriks yang berdensitas lebih tinggi dengan serat yang memiliki densitas lebih rendah [19]. Temuan ini sesuai dengan teori *rule of mixture* bahwasannya peningkatan fraksi volume material penyusun komposit dengan densitas lebih rendah akan menghasilkan densitas komposit yang lebih rendah [20]. Selain itu, kemungkinan terbentuknya void akibat proses fabrikasi juga dapat berkontribusi terhadap penurunan densitas.

3.3. Hasil Pengujian Tarik Komposit

Pengujian kekuatan tarik komposit bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh komposisi fraksi serat terhadap kekuatan mekanik komposit terkait kekuatan tarik, regagan dan modulus elastisitas, serta menilai potensi serat sebagai penguat komposit. Rata- rata nilai hasil pengujian kekuatan tarik pada empat varisi fraksi serat disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji tarik komposit

Komposisi Serat	σ (MPa)		ϵ (saat patah)		E (MPa)	
	Rata-rata	STDV	Rata-rata	STDV	Rata-rata	STDV
10%	10,655	3,675	1,186	0,383	664,973	152,839
20%	11,052	4,309	1,172	0,422	668,299	135,334
30%	11,492	2,267	1,238	0,312	679,366	151,170
40%	12,287	3,251	1,459	0,155	720,150	194,636

Berdasarkan hasil pengujian tarik komposit, dapat dilihat terjadi peningkatan kekuatan mekanis komposit terkait kekuatan tegangan tarik, regangan saat patah dan modulus elastisitas. Tegangan tarik rata-rata meningkat dari 10,655 MPa pada komposisi serat 10% menjadi 12,287 MPa pada komposisi serat 40%, sedangkan modulus elastisitas naik secara konsisten dari 664,973 MPa menjadi 720,150 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan fraksi serat berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan komposit dalam menahan beban tarik sekaligus meningkatkan kekakuan material, hal ini terjadi karena serat berperan sebagai penguat yang menahan dan mendistribusikan beban dari matriks. Namun, peningkatan tegangan tarik yang hanya sekitar 1,632 MPa mengindikasikan bahwa efektivitas penguatan belum sepenuhnya optimal dan masih dipengaruhi oleh kualitas ikatan antarmuka serat-matriks, distribusi serat, orientasi serat, serta kemungkinan terbentuknya void atau cacat internal [21].

Nilai rata-rata regangan saat patah meningkat dari 1,186 pada komposisi serat 10% menjadi 1,459 pada komposisi serat 40%, hal ini menunjukkan bahwa komposit dengan fraksi serat lebih tinggi memiliki kemampuan deformasi lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa serat kersen membantu menunda perambatan retak melalui mekanisme penahanan retak, bridging, dan distribusi beban yang lebih merata. Meskipun demikian, komposisi serat 20% menunjukkan regangan sedikit lebih rendah, yaitu 1,172, yang kemungkinan disebabkan oleh mikrostruktur yang kurang teratur seperti penumpukan serat, orientasi yang kurang seragam, atau cacat internal [22].

Dari nilai kekuatan tarik sebesar tertinggi yaitu 12,287 MPa, komposit serat kersen relatif sebanding dengan komposit serat bambu petung bermatriks poliester yang dilaporkan memiliki kekuatan tarik sekitar 1,25 kgf/mm² atau 12,26 MPa [23]. Namun, nilai kekuatan tarik komposit serat kersen masih lebih rendah dibandingkan komposit serat rami 40% dengan matriks poliester yang mencapai 15,08 MPa [24] dan komposit sabut kelapa matriks poliester mencapai 19,4 MPa [25].

3.4. Hasil Pengujian *Impact* Komposit

Peningkatan komposisi serat kersen dari 10% hingga 40% cenderung meningkatkan ketangguhan impact komposit. Nilai energi impact rata-rata naik dari 1,610 kJ/m² pada serat 10%, menjadi 1,970 kJ/m² pada 20%, 2,080 kJ/m² pada 30%, dan mencapai 2,360 kJ/m² pada 40%. Hasil pengujian impact komposit disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Nilai Uji Impact Charpy Komposit

No	Komposisi Serat	Rata-rata (Kj/m ²)	STDV
1	10%	1,610	0,680
3	20%	1,970	0,368

2	30%	2,080	1,132
4	40%	2,360	0,479

Pada fraksi serat 10%, matriks masih mendominasi sehingga kemampuan menyerap energi benturan rendah dan retak mudah terbentuk. Peningkatan serat pada 20–30% mulai memperkuat komposit melalui penghambatan perambatan retak dan distribusi energi benturan, meskipun kenaikannya relatif kecil akibat kemungkinan distribusi serat, ikatan antarmuka, atau homogenitas campuran yang belum optimal. Nilai *impact* tertinggi pada fraksi serat 40% karena mekanisme seperti *fiber bridging*, *fiber pull out*, dan penahanan retak bekerja lebih efektif [26].

Dari sisi konsistensi data, komposisi 30% memiliki standar deviasi tertinggi sebesar 1,132 kJ/m², menunjukkan variasi hasil yang besar dan kemungkinan ketidakhomogenan spesimen, seperti distribusi serat tidak merata, void, penumpukan serat, atau perbedaan kualitas ikatan serat-matriks. Sebaliknya, komposisi 20% memiliki standar deviasi terendah sebesar 0,368 kJ/m², sehingga hasilnya lebih stabil.

Secara keseluruhan, penambahan serat kersen meningkatkan ketangguhan impact komposit dari 1,610 kJ/m² menjadi 2,360 kJ/m², dengan kenaikan total 0,750 kJ/m². Namun, standar deviasi yang cukup tinggi pada beberapa variasi menunjukkan bahwa struktur internal komposit belum sepenuhnya seragam dan masih perlu dikaji lebih lanjut.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan penelitian mengenai pemanfaatan limbah kulit kayu kersen (*Muntingia calabura*) sebagai penguat komposit matriks polimer yang ramah lingkungan, dapat disimpulkan bahwa serat kulit kayu kersen berpotensi digunakan sebagai bahan penguat komposit. Perlakuan alkalisasi NaOH 9% menghasilkan serat dengan densitas 0,820 g/cm³, sedangkan peningkatan fraksi serat dari 10% hingga 40% menurunkan densitas komposit dari 1,208 g/cm³ menjadi 1,173 g/cm³ serta meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, regangan patah, dan ketangguhan impak. Fraksi serat 40% memberikan hasil terbaik dengan kekuatan tarik 12,287 MPa, modulus elastisitas 720,150 MPa, regangan patah 1,459, dan ketangguhan impak 2,360 kJ/m². Temuan ini menunjukkan bahwa limbah kulit kayu kersen dapat ditingkatkan nilai gunanya menjadi material komposit polimer yang lebih ringan dan ramah lingkungan, sehingga berkontribusi pada pengembangan material berbasis alam. Untuk memperoleh sifat mekanis yang lebih stabil dan optimal, proses fabrikasi perlu diperbaiki melalui pengendalian distribusi serat, orientasi serat, ikatan antarmuka serat dan matriks, serta pembentukan void, dan penelitian lanjutan disarankan mengkaji variasi perlakuan alkalisasi, metode pencetakan, tekanan curing, karakterisasi mikrostruktur, serta ketahanan lingkungan material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. makhboubizadeh, A. Sadeq, Z. Arzaqi, O. Ashkani, and M. Samadoghli, “Advancements in fiber-reinforced polymer (FRP) composites: an extensive review,” *Discov. Mater.*, vol. 4, no. 1, p. 22, Jun. 2024, doi: 10.1007/s43939-024-00091-9.

- [2] L. Wijewickrama, J. Jeewantha, G. I. P. Perera, O. Alajarmeh, and J. Epaarachchi, "Fiber-Reinforced Composites Used in the Manufacture of Marine Decks: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 17, p. 2345, Aug. 2025, doi: 10.3390/polym17172345.
- [3] A. Kumar Sharma, R. Bhandari, C. Sharma, S. Krishna Dhakad, and C. Pinca-Bretotean, "Polymer matrix composites: A state of art review," *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 2330–2333, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.592.
- [4] A. Munimathan, K. Muthu, S. Subramani, and S. Rajendran, "Environmental behaviour of synthetic and natural fibre reinforced composites: A review," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.1177/16878132241286020.
- [5] S. Palanisamy, M. Kalimuthu, R. Nagarajan, J. M. Fernandes Marlet, and C. Santulli, "Physical, Chemical, and Mechanical Characterization of Natural Bark Fibers (NBFs) Reinforced Polymer Composites: A Bibliographic Review," *Fibers*, vol. 11, no. 2, p. 13, Jan. 2023, doi: 10.3390/fib11020013.
- [6] D. Verma and K. L. Goh, "Effect of Mercerization/Alkali Surface Treatment of Natural Fibres and Their Utilization in Polymer Composites: Mechanical and Morphological Studies," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 7, p. 175, Jul. 2021, doi: 10.3390/jcs5070175.
- [7] H.-W. Chien, C.-H. Yang, Y.-T. Shih, and T.-L. Wang, "Upconversion Nanoparticles Encapsulated with Molecularly Imprinted Amphiphilic Copolymer as a Fluorescent Probe for Specific Biorecognition," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 20, p. 3522, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13203522.
- [8] M. K. A. Raj *et al.*, "Study on the mechanical characteristics of a natural Fiber-based hybrid polymer composite," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 45247, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-29459-4.
- [9] S. H. Kamarudin *et al.*, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 3698, Sep. 2022, doi: 10.3390/polym14173698.
- [10] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoo, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Compos. B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 856–873, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010.
- [11] F. Gapsari, A. Purnowidodo, S. Hidayatullah, and S. Suteja, "Characterization of Timoho Fiber as a reinforcement in green composite," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 13, pp. 1305–1315, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.049.
- [12] D. Verma and K. L. Goh, "Effect of Mercerization/Alkali Surface Treatment of Natural Fibres and Their Utilization in Polymer Composites: Mechanical and Morphological Studies," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 7, p. 175, Jul. 2021, doi: 10.3390/jcs5070175.
- [13] M. Abisha *et al.*, "Comparative experimental analysis on an eco-friendly sodium carbonate- and alkali treated butea parviflora fibers for green composites: Unveiling of mechanical, microstructural morphological, chemical, thermal, and acoustical properties," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 39, pp. 5955–5965, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.10.157.
- [14] G. Gebremichael, S. Tesfaye Mekonone, T. Mucheye Baye, and A. Asratie Ejigu, "Mechanical and microstructural characterization of sisal fiber-reinforced polyester laminate composites for improved durability in automotive applications," *Journal of*

- Materials Science: Composites*, vol. 6, no. 1, p. 1, Jan. 2025, doi: 10.1186/s42252-024-00064-4.
- [15] M. Shams and F. Cakir, "Determination of Mechanical Properties of Single and Double-Layer Intraply Hybrid Composites Manufactured by Hand Lay-Up Method," *Polymers (Basel)*, vol. 18, no. 2, p. 188, Jan. 2026, doi: 10.3390/polym18020188.
 - [16] G. Anbuechziyan, S. S. Mahesan, S. Babu, S. Thirumalai Kumaran, O. Das, and V. Shanmugam, "Experimental mechanical characterisation, regression-based modelling and life cycle assessment of surface-modified jute fibre reinforced recycled PET composites," *Discov. Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 164, May 2026, doi: 10.1007/s43939-026-00676-6.
 - [17] P. Siva Sankar and S. B. Singh, "Effect of Fiber Volume Fraction on the Mechanical Properties of NFRP Composites," 2024, pp. 249–254. doi: 10.1007/978-981-97-0472-9_33.
 - [18] N. M. Z. Abidin, M. T. H. Sultan, A. U. M. Shah, and S. N. A. Safri, "Charpy and Izod impact properties of natural fibre composites," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 670, no. 1, p. 012031, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/670/1/012031.
 - [19] N. M. Nurazzi *et al.*, "A Review on Mechanical Performance of Hybrid Natural Fiber Polymer Composites for Structural Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 13, p. 2170, Jun. 2021, doi: 10.3390/polym13132170.
 - [20] M. W. Tham *et al.*, "Tensile properties prediction of natural fibre composites using rule of mixtures: A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 38, no. 5, pp. 211–248, Mar. 2019, doi: 10.1177/0731684418813650.
 - [21] Z.-M. Huang, W.-J. Guo, H.-B. Huang, and C.-C. Zhang, "Tensile Strength Prediction of Short Fiber Reinforced Composites," *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 2708, May 2021, doi: 10.3390/ma14112708.
 - [22] A. R. Bhat, R. Kumar, and P. K. S. Mural, "Natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review of Tribo-Mechanical properties," *Tribol. Int.*, vol. 189, p. 108978, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108978.
 - [23] K. U. Umam, A. N. setyo H.D, and R. F. Listyanda, "PENGARUH PANJANG SERAT BAMBU PETUNG TERHADAP KEKUATAN MEKANIK DAN SIFAT FISIS KOMPOSIT YANG DISUSUN SECARA ACAK," *ELEMEN: JURNAL TEKNIK MESIN*, vol. 11, no. 2, pp. 98–104, Dec. 2024, doi: 10.34128/je.v11i2.288.
 - [24] Ricco Zulvikal, "Analisis Kekuatan Tarik dan Impak Material Komposit Serat Rami dengan Menggunakan Metode Hand Lay Up," *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, vol. 3, no. 3, pp. 01–17, May 2025, doi: 10.61132/mars.v3i3.773.
 - [25] Ricco Zulvikal, "Analisis Kekuatan Tarik dan Impak Material Komposit Serat Rami dengan Menggunakan Metode Hand Lay Up," *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, vol. 3, no. 3, pp. 01–17, May 2025, doi: 10.61132/mars.v3i3.773.
 - [26] S. H. Kamarudin *et al.*, "A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 3698, Sep. 2022, doi: 10.3390/polym14173698.