

PENGARUH JUMLAH LAPISAN ANYAMAN *TWILL* SERAT BAMBUN DAN RESIN EPOKSI TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN KETANGGUHAN *IMPACT* KOMPOSIT UNTUK APLIKASI RANGKA SEPEDA LISTRIK

Agus Prasetyo¹, Muhammad Azziyadatur R², Baharudin Priwintoko³, Yusuf Subagyo⁴

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Universitas Al Hikmah, Jepara, Indonesia.

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia.

³Department of Manufacturing Engineering Technology, Akademi Inovasi Indonesia, Salatiga

⁴Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Semarang

*corresponding author¹: prasagus560@gmail.com

ABSTRAK

Pengembangan material komposit berkelanjutan telah menarik perhatian signifikan sebagai alternatif terhadap komposit berbasis serat sintetis konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu terhadap sifat tarik dan *impact* komposit berbasis epoksi untuk aplikasi struktur ringan. Serat bambu dipilih karena sifatnya yang terbarukan, densitas rendah, serta memiliki sifat mekanik yang kompetitif. Komposit difabrikasi menggunakan metode hand lay-up dengan variasi konfigurasi anyaman *twill* 1 lapis dan 2 lapis. Karakterisasi mekanik dilakukan melalui pengujian tarik (ASTM D3039) dan pengujian *impact* (ASTM D256). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan secara signifikan meningkatkan performa mekanik komposit. Kekuatan tarik meningkat dari 33,03 MPa (1 lapis) menjadi 53,86 MPa (2 lapis), sedangkan tegangan luluh meningkat dari 24,54 MPa menjadi 48,23 MPa. Selain itu, energi serap *impact* meningkat dari 0,9 J menjadi 1,29 J, dan kekuatan *impact* meningkat dari 0,0013 J/mm² menjadi 0,0019 J/mm². Peningkatan ini disebabkan oleh mekanisme transfer beban yang lebih efektif, peningkatan fraksi volume serat, serta mekanisme disipasi energi yang lebih kompleks seperti fiber pull-out, retak matriks (*matrix cracking*), dan delaminasi. Secara keseluruhan, komposit anyaman *twill* serat bambu dengan 2 lapisan menunjukkan keseimbangan paling optimal antara kekuatan dan ketangguhan. Penelitian ini menegaskan potensi komposit serat bambu sebagai material berkelanjutan untuk aplikasi struktur ringan yang membutuhkan kombinasi kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap beban *impact*.

Kata kunci: serat bambu, anyaman *twill*, komposit, kekuatan tarik, kekuatan *impact*, material berkelanjutan.

ABSTRACT

The development of sustainable composite materials has attracted significant attention as an alternative to conventional synthetic fiber composites. This study investigates the effect of the number of bamboo fiber twill weave layers on the tensile and impact properties of epoxy-based composites for lightweight structural applications. Bamboo fibers were selected due to their renewable nature, low density, and competitive mechanical properties. The composites were fabricated using the hand lay-up method with variations of 1-layer and 2-layer twill configurations. Mechanical characterization was carried out through tensile testing (ASTM D3039) and impact testing (ASTM D256). The results indicate that increasing the number of layers significantly enhances the mechanical performance of the composites. The tensile strength increased from 33.03 MPa (1 layer) to 53.86 MPa (2 layers), while the yield strength improved from 24.54 MPa to 48.23 MPa. Similarly, the impact energy absorption increased from 0.9 J to 1.29 J, and the impact strength rose from 0.0013 J/mm² to 0.0019 J/mm². These improvements are attributed to enhanced load transfer, increased fiber volume fraction, and more effective energy dissipation mechanisms such as fiber pull-out, matrix cracking, and delamination. Overall, the 2-layer bamboo twill composite exhibited the most optimal balance between strength and toughness. This study highlights the potential of bamboo fiber composites as a sustainable material for lightweight structural applications requiring both high strength and impact resistance.

Keyword : bamboo fiber, twill weave, composite, tensile strength, impact strength, sustainable materials.

PENDAHULUAN

Perkembangan material komposit dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan tren menuju penggunaan material yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Komposit berbasis serat sintetis seperti fiberglass dan karbon memang memiliki sifat mekanik yang unggul, namun menimbulkan permasalahan lingkungan karena sulit terurai dan membutuhkan energi tinggi dalam proses produksinya. Oleh karena itu, pemanfaatan serat alam sebagai penguat komposit menjadi alternatif yang semakin menarik, sejalan dengan konsep *green materials* dan *sustainable engineering*. Serat alam memiliki keunggulan berupa ketersediaan yang melimpah, densitas rendah, biaya relatif murah, serta sifat biodegradabilitas yang lebih baik dibandingkan serat sintetis (Calvino et al., 2020a; Kurien et al., 2023).

Salah satu serat alam yang memiliki potensi besar adalah serat bambu. Bambu dikenal sebagai material yang tumbuh cepat, dapat diperbaharui (*renewable*), serta memiliki kemampuan penyerapan karbon dioksida yang tinggi sehingga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Selain itu, serat bambu memiliki sifat mekanik yang kompetitif, seperti kekuatan tarik yang tinggi dan fleksibilitas yang baik, sehingga berpotensi digunakan sebagai penguat komposit struktural. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa komposit berbasis serat bambu mampu memberikan performa mekanik yang baik sekaligus meningkatkan aspek keberlanjutan material (Chin et al., 2020; Lokesh et al., 2020; Mousavi et al., 2022).

Dalam aplikasi teknik, khususnya pada struktur ringan seperti rangka sepeda listrik, material yang digunakan harus memiliki kombinasi sifat ringan, kuat, serta tahan terhadap beban dinamis dan *impact*. Komposit serat bambu dengan matriks epoksi menjadi salah satu kandidat material yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Selain itu, penggunaan anyaman *twill* sebagai bentuk penguatan dapat meningkatkan distribusi beban serta ketahanan terhadap deformasi dibandingkan dengan orientasi serat acak (A et al., 2022; Karthik et al., 2023; Yang et al., 2023a). Namun demikian, performa komposit tidak hanya dipengaruhi oleh jenis material, tetapi juga oleh parameter struktur, salah satunya adalah jumlah lapisan (*layer*), yang berperan penting dalam menentukan kekuatan tarik dan ketangguhan *impact*.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji komposit berbasis serat alam, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan pengaruh jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu terhadap kombinasi kekuatan tarik dan ketangguhan *impact* masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menyajikan evaluasi sistematis terhadap konfigurasi jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu pada komposit epoksi untuk mengoptimalkan secara simultan kedua sifat mekanik tersebut. Studi ini tidak hanya mengungkap hubungan antara struktur dan sifat mekanik, tetapi juga mengidentifikasi konfigurasi lapisan optimum yang berpotensi meningkatkan performa komposit. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material komposit berbasis serat bambu sebagai solusi berkelanjutan untuk aplikasi struktur ringan.

1. MATERIAL DAN METODE

1.1. Material

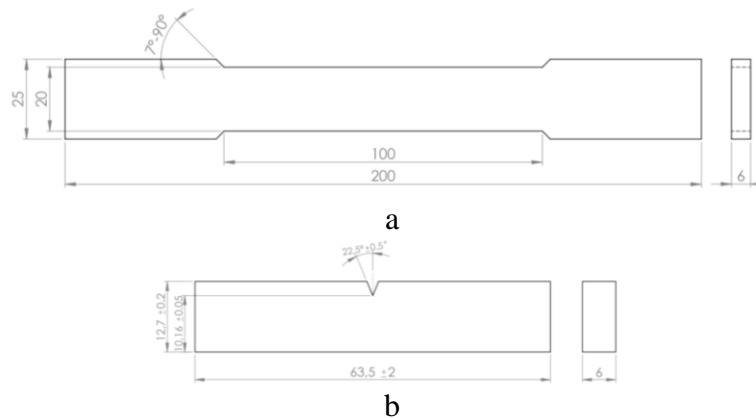
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serat bambu yang diolah menjadi anyaman *twill* sebagai penguat komposit dan resin epoksi sebagai matriks. Serat bambu dipilih karena memiliki sifat mekanik yang baik serta bersifat ramah lingkungan dan terbarukan. Resin epoksi digunakan sebagai matriks karena memiliki kemampuan adhesi yang tinggi, ketahanan kimia yang baik, serta mampu mentransfer beban secara efektif dari matriks ke serat. Selain itu, digunakan hardener sebagai bahan pengeras untuk memicu proses polimerisasi resin epoksi. Seluruh bahan digunakan tanpa perlakuan kimia tambahan untuk mempertahankan karakteristik alami serat bambu.

1.2. Preparation of Bamboo Fiber Twill Composite

Proses pembuatan komposit diawali dengan persiapan serat bambu yang telah dianyam dalam pola twill. Anyaman ini dipotong sesuai dengan ukuran cetakan yang digunakan. Variasi jumlah lapisan anyaman twill serat bambu yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 lapis, dan 2 lapis guna menganalisis pengaruh jumlah lapisan terhadap sifat mekanik komposit.

Resin epoksi dicampur dengan hardener hingga homogen. Selanjutnya, proses fabrikasi komposit dilakukan menggunakan metode *hand lay-up*. Setiap lapisan anyaman serat bambu disusun secara bertahap di dalam cetakan, kemudian dilapisi resin epoksi secara merata hingga seluruh permukaan serat terimpregnasi dengan baik. Proses ini dilakukan secara berulang sesuai dengan jumlah lapisan yang telah ditentukan.

Setelah proses pelapisan selesai, dilakukan proses pengepresan ringan untuk mengurangi rongga udara (*void*) dan meningkatkan ikatan antara serat dan matriks. Sampel kemudian didiamkan pada suhu ruang selama proses curing awal, dilanjutkan dengan proses curing lanjutan selama 24 jam untuk memastikan pengerasan komposit berlangsung sempurna. Setelah curing selesai, komposit dilepaskan dari cetakan dan dipotong sesuai dengan standar pengujian seperti yang ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. (a) Spesimen pengujian Tarik, (b) Spesimen pengujian *impact*.

1.3. Mechanical Testing

1.3.1. Tensile Test

Pengujian kekuatan tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menahan beban tarik maksimum. Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik sesuai dengan standar ASTM D3039. Spesimen dipotong dengan dimensi tertentu sesuai standar, kemudian diberi beban tarik hingga mengalami kegagalan. Data yang diperoleh berupa tegangan tarik maksimum, regangan, serta modulus elastisitas.

1.3.2. Impact Test

Pengujian *impact* dilakukan untuk mengukur ketangguhan material terhadap beban kejut menggunakan metode Charpy atau Izod sesuai standar ASTM (misalnya ASTM D256). Spesimen dipersiapkan dengan takikan (*notch*) dan diuji menggunakan mesin *impact tester*. Energi yang diserap oleh spesimen saat patah digunakan sebagai indikator ketangguhan *impact* material.

1.4. Data Analysis

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan pengaruh jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu terhadap sifat mekanik komposit. Nilai rata-rata dari setiap variasi dihitung dan dibandingkan untuk mengidentifikasi tren perubahan kekuatan tarik dan ketangguhan *impact*. Selain itu, analisis hubungan antara struktur lapisan dan performa mekanik dilakukan untuk menentukan konfigurasi optimum komposit.

2. HASIL DAN DISKUSI

Pengujian tarik dilakukan terhadap 6 spesimen, di mana setiap variasi terdiri atas 3 spesimen. Prosedur pengujian mengacu pada standar ASTM D3039. Parameter yang diperoleh dari pengujian meliputi beban maksimum, kekuatan tarik, tegangan luluh, dan elongasi. Seluruh hasil pengujian disajikan secara sistematis pada Tabel 1.

Tabel1. Hasil uji tarik anyaman *twill*.

Anyaman	Jumlah Lapisan	No. Spesimen	F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_t (MPa)	e (%)
<i>Twill</i>	1 lapis	1	4252,7	35,44	33,21	8,63
		2	4521,7	37,68	35,03	7,42
		3	4062,6	33,85	13,38	7,97
		Rata-rata	3964,43	33,03	24,54	8,06
	2 lapis	1	7089,9	59,08	50,39	11
		2	7199,3	59,90	55,79	13,37
		3	5111,6	42,60	38,52	11,29
		Rata-rata	6466,93	53,86	48,23	8,28

Hasil pengujian tarik komposit serat bambu anyaman *twill* dengan variasi jumlah lapisan ditunjukkan pada Tabel 3. Secara umum, peningkatan jumlah lapisan memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik material. Pada komposit dengan 1 lapisan, diperoleh nilai rata-rata beban maksimum sebesar 3964,43 N, kekuatan tarik sebesar 33,03 MPa, tegangan luluh sebesar 24,54 MPa, dan elongasi sebesar 8,06%. Sementara itu, pada komposit dengan 2 lapisan, nilai rata-rata beban maksimum meningkat menjadi 6466,93 N, kekuatan tarik sebesar 53,86 MPa, tegangan luluh sebesar 48,23 MPa, dan elongasi sebesar 8,28%.

Peningkatan kekuatan tarik yang signifikan menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapisan serat bambu meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban tarik. Hal ini berkaitan dengan peningkatan fraksi volume serat yang berperan sebagai elemen penahan beban utama, sehingga distribusi tegangan menjadi lebih merata dalam matriks komposit. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan kandungan serat dalam komposit berbasis serat alam dapat meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas akibat mekanisme transfer beban yang lebih efektif antara matriks dan serat (Calvino et al., 2020b).

Nilai tegangan luluh juga mengalami peningkatan yang signifikan pada variasi 2 lapisan, yang mengindikasikan bahwa material memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi plastis sebelum mengalami kegagalan. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan interaksi antar lapisan serta adhesi yang lebih baik antara serat bambu dan matriks epoksi. Selain itu, konfigurasi anyaman *twill* berkontribusi terhadap distribusi tegangan yang lebih seragam dibandingkan orientasi serat acak, sehingga meningkatkan performa mekanik komposit (Yang et al., 2023b).

Sementara itu, nilai elongasi tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, yang mengindikasikan bahwa penambahan jumlah lapisan lebih berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan dibandingkan keuletan material. Fenomena ini juga dilaporkan dalam penelitian komposit serat alam, di mana peningkatan fraksi serat cenderung meningkatkan kekuatan tanpa perubahan signifikan pada deformasi maksimum (Khare et al., 2021).

Variasi nilai antar spesimen kemungkinan disebabkan oleh ketidaksempurnaan proses fabrikasi, seperti distribusi resin yang tidak merata atau terbentuknya void. Hal ini umum terjadi pada metode *hand lay-up*, yang dapat mempengaruhi performa mekanik komposit secara keseluruhan (Pickering et al., 2016).

Pada pengujian *impact* spesimen yang diuji berjumlah 6 di mana setiap variasi ada 3 buah spesimen. Pengujian kekuatan *impact* menggunakan metode charpy dengan ukuran

spesimen standar ASTM D256. Terdapat beberapa data hasil pengujian *impact* yakni energi serap (Es), Sudut setelah patah (β) dan harga kekuatan *impact* (HI). Data hasil pengujian *impact* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji *impact* anyaman *twill*.

Anyaman	Jumlah Lapisan	No. Spesimen	Es (J)	β	HI (J/mm ²)
<i>Twill</i>	1 lapis	1	0,76	143,65°	0.0011
		2	0,84	143,05°	0.0012
		3	1,1	141,25°	0.0016
		Rata-rata	0,9		0.0013
	2 lapis	1	1,14	140,95°	0.0017
		2	1,16	140,08°	0.0017
		3	1,57	138,10°	0.0024
		Rata-rata	1,29		0.0019

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian *impact* komposit serat bambu anyaman *twill* dengan variasi jumlah lapisan menunjukkan adanya peningkatan kemampuan penyerapan energi seiring bertambahnya jumlah lapisan. Pada komposit dengan 1 lapis, diperoleh nilai rata-rata energi serap (Es) sebesar 0,9 J dengan nilai *impact* (HI) sebesar 0,0013 J/mm², sedangkan pada 2 lapis meningkat menjadi 1,29 J dan 0,0019 J/mm². Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapisan berkontribusi signifikan terhadap peningkatan ketangguhan material. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan ketebalan atau jumlah lapisan pada komposit berpenguat serat dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energi akibat peningkatan jalur disipasi energi selama pembebanan *impact* (Pickering et al., 2016).

Peningkatan nilai *impact* tersebut berkaitan dengan kemampuan struktur multilayer dalam mendistribusikan energi benturan secara lebih efektif. Pada komposit dengan jumlah lapisan yang lebih banyak, energi tidak hanya diserap oleh satu lapisan, tetapi juga disebarkan ke lapisan lainnya melalui mekanisme seperti *delamination*, *matrix cracking*, dan *fiber pull-out*. Mekanisme ini memperpanjang jalur propagasi retak (*crack propagation path*), sehingga membutuhkan energi yang lebih besar untuk menyebabkan kegagalan total. Fenomena ini telah dilaporkan secara luas pada komposit serat alam, di mana peningkatan jumlah lapisan meningkatkan mekanisme disipasi energi dan ketangguhan material (Zhou et al., 2020).

Selain itu, sudut patahan (β) menunjukkan kecenderungan menurun dari sekitar 143° pada 1 lapis menjadi 138° pada 2 lapis, yang mengindikasikan bahwa material mengalami deformasi yang lebih kompleks sebelum patah. Penurunan sudut ini mencerminkan peningkatan kemampuan material dalam menyerap energi melalui deformasi progresif. Struktur anyaman *twill* juga berperan dalam meningkatkan ketahanan *impact* karena orientasi serat yang saling bersilangan memungkinkan distribusi tegangan yang lebih merata dan mengurangi konsentrasi tegangan lokal, sebagaimana dilaporkan pada studi komposit berbasis anyaman (*woven composites*) (Rekayasa et al., 2025).

Meskipun demikian, variasi nilai antar spesimen masih terlihat, yang kemungkinan disebabkan oleh faktor fabrikasi seperti distribusi resin yang tidak merata atau adanya void. Ketidaktepatan ini dapat menjadi titik awal retak dan menurunkan kemampuan material dalam menyerap energi. Hal ini konsisten dengan laporan Pickering KL yang menyatakan bahwa keberadaan void dan ketidakhomogenan matriks-serat dapat secara signifikan mempengaruhi performa mekanik komposit (Zhang et al., 2022).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu secara signifikan meningkatkan ketangguhan *impact* komposit, sehingga memberikan potensi yang lebih baik untuk aplikasi struktur ringan yang memerlukan ketahanan terhadap beban kejut.

3. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh jumlah lapisan anyaman *twill* serat bambu terhadap sifat mekanik komposit berbasis epoksi, khususnya kekuatan tarik dan ketangguhan *impact*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan dari 1 lapis menjadi 2 lapis memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan tarik, dari 33,03 MPa menjadi 53,86 MPa, serta tegangan luluh dari 24,54 MPa menjadi 48,23 MPa. Sejalan dengan itu, hasil pengujian *impact* juga menunjukkan peningkatan energi serap dari 0,9 J menjadi 1,29 J dan nilai *impact* dari 0,0013 J/mm² menjadi 0,0019 J/mm². Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapisan secara efektif meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban statik maupun dinamik. Peningkatan performa mekanik tersebut dipengaruhi oleh bertambahnya fraksi serat yang berperan sebagai penahan beban utama serta meningkatnya efektivitas distribusi tegangan dalam struktur komposit. Selain itu, struktur multilayer memungkinkan terjadinya mekanisme disipasi energi yang lebih kompleks, seperti *fiber pull-out*, *matrix cracking*, dan *delamination*, sehingga meningkatkan ketangguhan material. Namun demikian, nilai elongasi tidak menunjukkan perubahan signifikan, yang mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah lapisan lebih berpengaruh terhadap kekuatan dan ketangguhan dibandingkan keuletan material. Secara keseluruhan, komposit serat bambu dengan konfigurasi 2 lapisan menunjukkan performa mekanik yang lebih optimal dibandingkan 1 lapisan, sehingga berpotensi diaplikasikan pada struktur ringan yang membutuhkan kombinasi kekuatan tarik dan ketahanan *impact*. Penelitian ini juga menegaskan bahwa serat bambu merupakan alternatif material berkelanjutan yang menjanjikan untuk pengembangan komposit ramah lingkungan dalam aplikasi teknik.

DAFTAR PUSTAKA

- A, K., R, J., P S, S., & R, S. (2022, December 23). *Mechanical Properties of Twill Weave of Bamboo Fabric Epoxy Composite Materials*. <https://doi.org/10.4271/2022-28-0532>
- Calvino, C., Macke, N., Kato, R., & Rowan, S. J. (2020a). Development, processing and applications of bio-sourced cellulose nanocrystal composites. *Progress in Polymer Science*, *103*, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101221>
- Calvino, C., Macke, N., Kato, R., & Rowan, S. J. (2020b). Development, processing and applications of bio-sourced cellulose nanocrystal composites. *Progress in Polymer Science*, *103*, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101221>
- Chin, S. C., Tee, K. F., Tong, F. S., Ong, H. R., & Gimbut, J. (2020). Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites. *Materials Today Communications*, *23*, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100876>
- Karthik, A., James D, J. D., Vijayan, V., Ahmad, Z., Rajkumar, S., Sharma, S., Sharma, K. P., Singh, R., Li, C., & Eldin, S. M. (2023). Study on the physicomechanical, fracture-deformation, interface-adhesion, and water-absorption properties of twill fabric cotton-bamboo/epoxy composites. *Journal of Materials Research and Technology*, *24*, 8429–8442. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.102>
- Khare, D., Singh, A., & Dubey, A. K. (2021). Influence of Na and K contents on the antibacterial response of piezoelectric biocompatible $\text{Na}_x\text{K}_{1-x}\text{NbO}_3$ ($x = 0.2-0.8$). *Materials Today Communications*, *27*, 102317. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102317>
- Kurien, R. A., Maria Anil, M., Sharan Mohan, S. L., & Anna Thomas, J. (2023). Natural fiber composites as sustainable resources for emerging applications- a review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.363>

- Lokesh, P., Surya Kumari, T. S. A., Gopi, R., & Babu Loganathan, G. (2020). A study on mechanical properties of bamboo fiber reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 22, 897–903. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.100>
- Mousavi, S. R., Zamani, M. H., Estaji, S., Tayouri, M. I., Arjmand, M., Jafari, S. H., Nouranian, S., & Khonakdar, H. A. (2022). Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies. *Journal of Materials Science*, 57(5), 3143–3167. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06854-6>
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Rekayasa, J., Energi, D., Fajril Jamil, K., & Aritonang, S. (2025). *Perbandingan Analisis Struktur Dan Sifat Mekanik Material Komposit Dari Weave Carbon Fiber dan Chopped Carbon Fiber*. 8(2). <https://doi.org/10.30596/rmme.v8i2.25155>
- Yang, J., Li, P., Zhang, Y., Hui, Y., Xu, L., Damil, N., & Hu, H. (2023a). Unified functional based data-model-coupling computing for composite materials and structures. *Composite Structures*, 312, 116840. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116840>
- Yang, J., Li, P., Zhang, Y., Hui, Y., Xu, L., Damil, N., & Hu, H. (2023b). Unified functional based data-model-coupling computing for composite materials and structures. *Composite Structures*, 312, 116840. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116840>
- Zhang, S., Liu, C., Sun, X., & Huang, W. (2022). Current development of materials science and engineering towards epidermal sensors. *Progress in Materials Science*, 128, 100962. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100962>
- Zhou, Y., Wen, W., & Cui, H. (2020). Spatial modelling of 3D woven variable thickness composite plate at the mesoscopic scale. *Composite Structures*, 239, 111946. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111946>