



Analisis Perbandingan Kekuatan Bending, Tarik, dan Fraktografi pada Material Komposit Serat Eceng Gondok, Serat Bambu serta Epoxy sebagai Pengganti *Dashboard* Mobil

Latif Firdaus^{1*}, Jenni Ria Rajagukguk², Delpima Suhita³, Muhammad Khasbi⁴

¹²³⁴ Universitas Krisnadwipayana

*Corresponding Author's e-mail: latiffirdaus14@gmail.com

Article History:

Received: July 25, 2026

Revised: August 13, 2026

Accepted :August 23, 2026

Keywords:

Natural fiber composite, water hyacinth fiber, bamboo fiber, epoxy, tensile test, bending test, fractography.

Abstract: *The development of the automotive industry has increased the demand for materials with lightweight characteristics, good mechanical properties, and environmentally friendly features. Natural fiber-based composite materials have become one of the potential alternatives to replace synthetic materials due to their lightweight, sustainable, and biodegradable characteristics for vehicle interior components, including car dashboards. This study aims to analyze the mechanical characteristics of hybrid composite materials reinforced with water hyacinth fiber and bamboo fiber using an epoxy matrix through bending, tensile, and fractographic analysis to evaluate their potential application as an alternative dashboard material. The research was conducted using an experimental method by fabricating composite specimens with a composition of 15% water hyacinth fiber, 15% bamboo fiber, and 70% epoxy resin. The fibers were subjected to alkali treatment using NaOH solution before the molding process. Mechanical testing was performed based on ASTM D790 for bending tests and ASTM D638 for tensile tests, while fractographic analysis was conducted on the fracture surfaces after mechanical testing. The results showed that the highest bending strength was obtained at 4.18 kg/mm² from a specimen with a thickness of 5.42 mm, while the highest tensile strength reached 1.79 kg/mm² from a specimen with a thickness of 6.24 mm. Fractographic observations revealed several failure mechanisms, including fiber pull-out, matrix cracking, void formation, delamination, and fiber fracture, which were influenced by the quality of the fiber-matrix bonding and the composite fabrication process. Based on the results, the hybrid composite of water hyacinth fiber and bamboo fiber reinforced with epoxy matrix has potential for development as an alternative material for car dashboard components; however, further optimization of fiber composition and manufacturing processes is required to improve its mechanical performance.*

Copyright © 2026, The Author(s).

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



PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif saat ini mengalami perubahan signifikan menuju penggunaan material yang lebih ringan, memiliki performa mekanik yang baik, serta mendukung konsep keberlanjutan lingkungan. Peningkatan kebutuhan efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi karbon mendorong industri manufaktur untuk mengembangkan material alternatif yang mampu menggantikan sebagian material konvensional berbasis logam maupun serat sintetis. Material komposit berbasis serat alam (*natural fiber reinforced polymer composite*) menjadi salah satu material yang banyak dikembangkan karena memiliki karakteristik berupa densitas rendah, sifat ramah lingkungan, biaya produksi relatif rendah, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah. Pemanfaatan serat alam sebagai penguat komposit juga mendukung konsep *green material* karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap material sintetis yang sulit terdegradasi (Kurnia et al., 2023).

Material komposit merupakan material hasil kombinasi dua atau lebih material berbeda yang menghasilkan sifat unggul melalui mekanisme kerja antara matriks dan penguat. Pada komposit polimer, matriks berfungsi sebagai pengikat yang mentransfer beban menuju serat, sedangkan serat berperan sebagai elemen utama dalam meningkatkan kekuatan mekanik material. Performa suatu komposit sangat dipengaruhi oleh jenis serat, fraksi volume, orientasi serat, distribusi serat, serta kualitas ikatan antara serat dengan matriks. Penelitian mengenai komposit berbasis serat alam menunjukkan bahwa peningkatan jumlah serat tidak selalu menghasilkan peningkatan sifat mekanik karena diperlukan keseimbangan antara jumlah serat dan kemampuan matriks dalam melakukan proses impregnasi terhadap serat (Akhaina et al., 2025). Oleh karena itu, optimasi komposisi dan metode fabrikasi menjadi faktor penting dalam menghasilkan material komposit dengan performa yang sesuai untuk aplikasi teknik.

Salah satu serat alam yang memiliki potensi besar sebagai material penguat komposit adalah serat bambu. Bambu memiliki kandungan selulosa yang tinggi sehingga mampu memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik dan kekakuan material komposit. Selain itu, bambu memiliki keunggulan berupa pertumbuhan yang cepat dan kemampuan regenerasi yang baik sehingga menjadi salah satu sumber material berkelanjutan. Bangun et al. (2023) menjelaskan bahwa komposit berbasis serat bambu memiliki potensi mekanik yang baik apabila dikombinasikan dengan matriks polimer karena mampu meningkatkan kemampuan material dalam menerima beban. Namun, sifat alami serat bambu yang memiliki kandungan lignin dan hemiselulosa menyebabkan adhesi antara serat dan matriks masih menjadi tantangan utama sehingga diperlukan perlakuan awal seperti alkalisasi untuk meningkatkan kualitas permukaan serat.

Perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan performa serat alam. Proses alkalisasi bertujuan menghilangkan sebagian kandungan lignin, hemiselulosa, dan zat pengotor lainnya sehingga permukaan serat menjadi lebih kasar dan meningkatkan ikatan mekanik dengan matriks. Nayan et al. (2023) menunjukkan bahwa perlakuan NaOH pada serat bambu memberikan pengaruh terhadap peningkatan kemampuan transfer beban antara serat dan matriks sehingga berdampak terhadap perubahan nilai kekuatan tarik komposit. Selain itu, variasi orientasi dan susunan serat juga memiliki pengaruh terhadap distribusi tegangan dalam material komposit. Marunung (2022) menjelaskan bahwa susunan serat memanjang memiliki kecenderungan menghasilkan kemampuan mekanik yang lebih baik dibandingkan susunan acak karena orientasi serat yang lebih terarah mampu meningkatkan efektivitas transfer tegangan.

Selain serat bambu, serat eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) juga menjadi salah satu alternatif material penguat yang memiliki potensi untuk dikembangkan. Eceng gondok merupakan tanaman air yang pertumbuhannya sangat cepat dan sering dianggap sebagai permasalahan lingkungan karena dapat mengganggu keseimbangan ekosistem perairan. Pemanfaatan eceng gondok sebagai bahan baku komposit memberikan solusi terhadap permasalahan lingkungan sekaligus menghasilkan material bernilai tambah. Mansjur dan Kewas (2024) menyatakan bahwa penggunaan serat eceng gondok sebagai penguat komposit hybrid mampu memberikan karakteristik mekanik yang cukup baik melalui kombinasi dengan jenis serat lain. Pengembangan komposit hybrid memungkinkan penggabungan keunggulan beberapa jenis serat sehingga diperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik dan aspek keberlanjutan material.

Penggunaan matriks epoxy dalam penelitian ini dipilih karena epoxy memiliki kemampuan adhesi yang baik, stabilitas dimensi tinggi, serta mampu mempertahankan sifat mekanik pada kondisi lingkungan tertentu. Matriks epoxy berperan penting dalam mendistribusikan beban menuju serat sehingga kualitas hubungan antara epoxy dan serat menjadi faktor utama dalam menentukan kekuatan komposit. Penelitian mengenai material komposit berbasis resin menunjukkan bahwa karakteristik mekanik sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan antarmuka antara penguat dan matriks. Alajmi et al. (2024) menjelaskan bahwa mekanisme kegagalan pada komposit serat/polymer sangat berkaitan dengan kemampuan adhesi antara serat dan matriks, distribusi resin, serta keberadaan cacat internal seperti rongga (*void*) yang dapat menjadi titik awal terjadinya retakan.

Dalam aplikasi otomotif, dashboard mobil merupakan salah satu komponen interior yang membutuhkan material dengan karakteristik ringan, cukup kuat terhadap beban mekanik, serta memiliki kestabilan bentuk. Material dashboard konvensional seperti plastik ABS dan polimer sintetis memiliki keunggulan dalam proses manufaktur, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam aspek keberlanjutan

dan pengelolaan limbah. Oleh sebab itu, pengembangan komposit berbasis serat alam menjadi alternatif yang menarik untuk menghasilkan material interior kendaraan yang lebih ramah lingkungan. Pengujian sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan bending menjadi parameter penting untuk mengetahui kemampuan material dalam menerima pembebanan selama penggunaan.

Selain pengujian mekanik, analisis fraktografi diperlukan untuk memahami mekanisme kegagalan material komposit setelah mengalami pembebanan. Pengamatan permukaan patahan dapat memberikan informasi mengenai kualitas ikatan antara serat dan matriks melalui indikasi kegagalan seperti *fiber pull-out*, *matrix cracking*, *fiber fracture*, void, dan delaminasi. Asyrofi et al. (2023) menunjukkan bahwa analisis struktur mikro pada material komposit dapat memberikan informasi mengenai hubungan antara proses fabrikasi, distribusi material penyusun, dan perubahan sifat mekaniknya. Dengan demikian, kombinasi pengujian tarik, bending, dan analisis fraktografi dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai performa suatu material komposit.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penggunaan serat bambu maupun serat eceng gondok sebagai penguat komposit, tetapi sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis serat atau hanya mengevaluasi parameter mekanik tertentu. Penelitian mengenai komposit hybrid serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy yang dikaji secara bersamaan melalui pengujian bending, tarik, serta analisis fraktografi masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis karakteristik mekanik dan mekanisme kegagalan komposit hybrid berbasis serat eceng gondok dan bambu.

Penelitian ini menggunakan komposisi material sebesar 15% serat eceng gondok, 15% serat bambu, dan 70% resin epoxy dengan perlakuan alkalisasi sebelum proses fabrikasi. Pengujian dilakukan menggunakan standar ASTM D638 untuk uji tarik dan ASTM D790 untuk uji bending serta dilanjutkan dengan analisis fraktografi terhadap permukaan patahan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan bending, kekuatan tarik, serta karakteristik kegagalan material komposit serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy sebagai kandidat material alternatif pengganti dashboard mobil.

LANDASAN TEORI

Material Komposit

Material komposit merupakan material yang tersusun dari dua atau lebih material berbeda yang dikombinasikan untuk menghasilkan sifat material baru dengan performa yang lebih baik. Komposit terdiri atas matriks sebagai pengikat dan material penguat (*reinforcement*) yang berfungsi meningkatkan sifat mekanik material. Pada penelitian ini digunakan komposit berbasis resin epoxy dengan penguat serat alam berupa serat bambu dan serat eceng gondok.

Penggunaan serat alam sebagai penguat komposit semakin berkembang karena memiliki keunggulan berupa massa jenis rendah, ramah lingkungan, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah. Namun, sifat hidrofilik pada serat alam menyebabkan ikatan antara serat dan matriks menjadi kurang optimal sehingga diperlukan perlakuan tertentu untuk meningkatkan kualitas adhesi.

Serat Alam Bambu dan Eceng Gondok

Serat bambu merupakan salah satu serat alam yang memiliki kandungan selulosa tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai penguat pada material komposit. Kandungan selulosa tersebut memberikan kemampuan serat dalam menerima beban sehingga dapat meningkatkan kekuatan mekanik komposit.

Selain serat bambu, eceng gondok juga memiliki potensi sebagai material penguat karena mengandung serat selulosa dan memiliki karakteristik ringan. Pemanfaatan serat eceng gondok dalam komposit menjadi alternatif untuk mengurangi limbah biomassa sekaligus menghasilkan material yang lebih ramah lingkungan.

Kombinasi serat bambu dan eceng gondok sebagai komposit hybrid diharapkan mampu menghasilkan material dengan sifat mekanik yang lebih baik melalui perpaduan karakteristik kedua jenis serat.

Resin Epoxy sebagai Matriks Komposit

Epoxy merupakan salah satu jenis resin termoset yang banyak digunakan sebagai matriks pada material komposit karena memiliki sifat adhesi yang baik, kekuatan mekanik tinggi, serta stabilitas dimensi yang baik. Dalam komposit, epoxy berfungsi mengikat serat dan meneruskan beban yang diterima menuju material penguat.

Kualitas ikatan antara resin epoxy dan serat sangat memengaruhi karakteristik mekanik komposit. Ikatan antarmuka yang baik akan meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban, sedangkan ikatan yang kurang baik dapat menyebabkan kegagalan seperti pelepasan serat (*fiber pull-out*).

Sifat Mekanik Komposit

Sifat mekanik komposit dapat diketahui melalui beberapa metode pengujian, salah satunya adalah pengujian tarik dan bending. Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui kemampuan material dalam menerima beban tarik hingga mengalami kegagalan. Parameter yang diperoleh dari pengujian ini meliputi kekuatan tarik dan regangan material.

Pengujian bending digunakan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban lentur. Nilai kekuatan bending dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis serat, orientasi serat, distribusi resin, serta kualitas ikatan antara serat dan matriks.

Analisis Fraktografi

Fraktografi merupakan metode analisis permukaan patahan material yang bertujuan mengetahui mekanisme kegagalan setelah material mengalami pembebanan. Pada komposit serat alam, mekanisme kegagalan yang dapat diamati

antara lain retak matriks (*matrix cracking*), pelepasan serat (*fiber pull-out*), dan delaminasi.

Analisis fraktografi digunakan untuk memperkuat hasil pengujian mekanik dengan melihat hubungan antara struktur patahan dan kemampuan material dalam menerima beban.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain penelitian eksperimental (*experimental research*) berbasis pengujian laboratorium untuk menganalisis pengaruh penggunaan serat alam terhadap karakteristik mekanik material komposit sebagai alternatif material pengganti dashboard mobil. Pendekatan eksperimen dipilih karena penelitian dilakukan melalui proses fabrikasi spesimen komposit dengan variasi penyusun tertentu, kemudian dilakukan pengujian secara langsung untuk memperoleh data kuantitatif berupa nilai kekuatan tarik, kekuatan bending, serta karakteristik mekanisme kegagalan material. Metode eksperimen pada material komposit banyak digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara komposisi penyusun, kualitas ikatan serat-matriks, dan kemampuan material dalam menerima beban mekanik (Akinyemi et al., 2022; Saba et al., 2023). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengujian mekanik seperti tensile test dan flexural test menjadi parameter penting dalam menentukan kelayakan komposit serat alam untuk aplikasi teknik, termasuk komponen interior otomotif (Kumar et al., 2023).

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit hybrid berbasis serat eceng gondok dan serat bambu dengan resin epoxy sebagai matriks. Subjek penelitian berupa spesimen komposit yang dibuat dengan komposisi fraksi volume 15% serat eceng gondok, 15% serat bambu, dan 70% resin epoxy. Sebelum proses manufaktur, serat alam diberikan perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH untuk meningkatkan kualitas permukaan serat serta memperbaiki adhesi antara serat dan matriks epoxy. Perlakuan alkali pada serat alam diketahui mampu mengurangi kandungan lignin dan hemiselulosa sehingga meningkatkan kemampuan transfer beban antara serat dan matriks (Sabarinathan et al., 2022). Penelitian mengenai komposit serat eceng gondok berbasis epoxy juga menunjukkan bahwa perlakuan permukaan serat dapat meningkatkan sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan bending akibat peningkatan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara serat dan resin (Ayrilmis et al., 2022).

Tahapan penelitian meliputi persiapan bahan, perlakuan serat, proses pencampuran resin epoxy dengan penguat serat, proses pencetakan spesimen, serta pengujian karakteristik mekanik. Proses fabrikasi spesimen dilakukan menggunakan metode *hand lay-up* dengan memastikan distribusi serat dan resin berlangsung secara merata. Spesimen hasil fabrikasi kemudian diuji menggunakan standar ASTM, yaitu pengujian tarik berdasarkan ASTM D638 dan pengujian bending berdasarkan ASTM D790. Pengujian tarik dilakukan untuk

mengetahui kemampuan material dalam menerima beban tarik hingga mengalami kegagalan, sedangkan pengujian bending dilakukan untuk mengetahui kemampuan material menahan deformasi akibat pembebanan lentur. Penggunaan standar ASTM pada pengujian komposit serat alam juga banyak diterapkan dalam penelitian sebelumnya untuk memperoleh hasil karakterisasi mekanik yang dapat dibandingkan secara ilmiah (Venkatesh et al., 2023; Chenrayan et al., 2023).

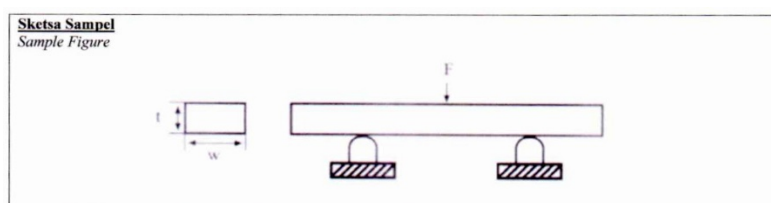
Data penelitian diperoleh dari hasil pengujian eksperimental berupa nilai tegangan tarik, tegangan bending, serta dokumentasi permukaan patahan spesimen setelah mengalami pembebanan. Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan nilai kekuatan mekanik dari material komposit yang diuji, kemudian dilakukan analisis kualitatif melalui pengamatan fraktografi untuk mengidentifikasi mekanisme kegagalan material. Pengamatan fraktografi dilakukan terhadap permukaan patahan untuk mengetahui fenomena seperti *fiber pull-out*, *matrix cracking*, *void*, delaminasi, dan patah serat yang menunjukkan kualitas ikatan antara serat dan matriks. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, analisis morfologi patahan mampu memberikan informasi mengenai mekanisme kerusakan komposit serta hubungan antara struktur internal material dengan performa mekaniknya (Harsha & Satish, 2023).

Alat analisis data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat pengujian mekanik Universal Testing Machine (UTM) untuk memperoleh data kekuatan tarik dan bending, serta perangkat dokumentasi mikroskopis untuk melakukan analisis fraktografi permukaan patahan. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif untuk menentukan karakteristik mekanik terbaik dari komposit serat eceng gondok, serat bambu, dan epoxy sebagai kandidat material dashboard kendaraan. Pendekatan analisis komparatif pada material komposit digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi material terhadap perubahan sifat mekanik serta menentukan potensi aplikasinya pada bidang otomotif (Rajesh et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Bending

Hasil pengujian bending material komposit serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy ditunjukkan pada Tabel 1. Pengujian bending dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menerima beban lentur serta mengetahui pengaruh variasi ketebalan spesimen terhadap nilai kekuatan bending.



Gambar 1. Sketsa Sampel Bending

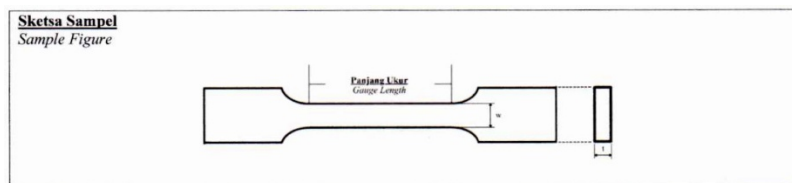
Tabel 1. Hasil Pengujian Bending Material Komposit Serat Eceng Gondok dan Serat Bambu dengan Matriks Epoxy

No	Dimensi Ukur (mm)	Luas (mm)	Panjang Ukur (mm)	Beban Maksimal (kgF)	Lentur Maksimum (kg/mm ²)	Deviasi
1	t = 3.33	101,23	53.28	16.12	3.82	0.26
	w = 30.40					
2	t = 4.64	130.15	74.24	14.54	2.68	0.88
	w = 28.05					
3	t = 5.42	149.81	86.72	26.21	4.18	0.62
	w = 27.64					

Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai kekuatan bending tertinggi diperoleh pada spesimen dengan ketebalan 5,42 mm dengan nilai tegangan lentur sebesar 4,18 kg/mm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketebalan spesimen memberikan pengaruh terhadap kemampuan material dalam menerima beban lentur. Peningkatan ketebalan menyebabkan distribusi tegangan menjadi lebih baik sehingga material mampu menahan beban yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan.

Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik material komposit ditunjukkan pada Tabel 2. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menerima pembebanan aksial hingga mengalami deformasi dan patah.



Gambar 2. Sketsa Sampel Tarik

Tabel 2. Hasil Pengujian Tarik Material Komposit Serat Eceng Gondok dan Serat Bambu dengan Matriks Epoxy

No	Dimensi Ukur (mm)	Luas (mm)	Panjang Ukur (mm)	Tensile Stress (kgf)	Regangan (%)	Deviasi
1	t = 3.77 w = 12.58	47.43	50	1.49	10.02	1.73
2	t = 2.84 w = 12.66	35.95	50	0.51	14.3	2.55

3	t = 6.24 w = 12.53	78.19	50	1.79	10.92	0.83
---	-----------------------	-------	----	------	-------	------

Berdasarkan Tabel 2, nilai kekuatan tarik maksimum diperoleh pada spesimen dengan ketebalan 6,24 mm yaitu sebesar 1,79 kg/mm². Nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi ketebalan spesimen berpengaruh terhadap kemampuan material dalam menerima gaya tarik. Semakin besar dimensi spesimen, maka kemampuan material dalam menahan beban sebelum mengalami kegagalan cenderung meningkat.

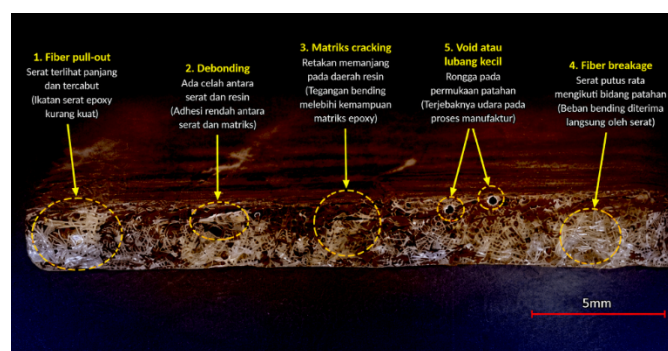
Analisis Fraktografi

Hasil pengamatan struktur makro pada permukaan patahan spesimen uji bending dilakukan untuk mengetahui mekanisme kegagalan yang terjadi pada komposit hybrid serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy. Permukaan patahan menunjukkan karakteristik tidak rata dengan sebagian serat masih melekat pada matriks, sedangkan sebagian lainnya mengalami pelepasan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya beberapa mekanisme kegagalan, yaitu *fiber pull-out*, *void*, *matrix cracking*, dan *fiber-matrix debonding*.

Fenomena *fiber pull-out* menunjukkan adanya serat eceng gondok dan bambu yang tertarik keluar dari matriks akibat ikatan antarmuka serat–epoxy yang belum optimal. Selain itu, keberadaan *void* pada permukaan patahan mengindikasikan adanya udara yang terperangkap selama proses pencetakan atau proses impregnasi resin yang kurang sempurna, sehingga dapat menjadi titik konsentrasi tegangan. Retakan pada matriks epoxy menunjukkan bahwa matriks mengalami kegagalan terlebih dahulu sebelum serat mengalami patah.

Berdasarkan hasil pengujian bending dan analisis struktur makro, mekanisme kegagalan komposit hybrid terjadi secara kombinasi berupa retak matriks epoxy, pelepasan ikatan serat–matriks, *fiber pull-out*, dan patahnya sebagian serat. Performa bending komposit dipengaruhi oleh kualitas ikatan serat–matriks, orientasi serat, kadar serat, serta proses impregnasi resin epoxy. Ikatan antarmuka yang baik mampu meningkatkan proses transfer beban sehingga menghasilkan kekuatan mekanik komposit yang lebih optimal.

Gambar Hasil Uji Bending
Hasil Uji makro tebal 3 mm

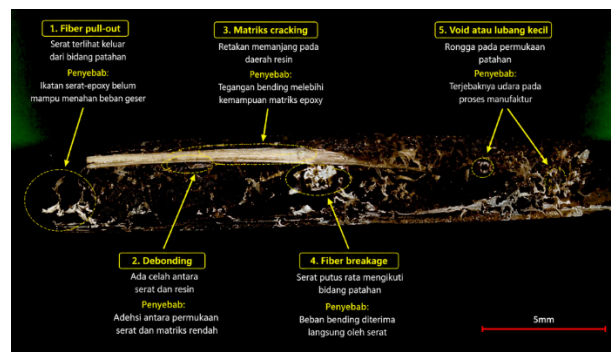


Gambar 3. Uji makro (fraktografi) epoxy tipe 1 (serat eceng gondok) tebal 3mm pembesaran 6x

Berdasarkan hasil pengamatan makro pada permukaan patahan spesimen uji bending, ditemukan beberapa mekanisme kegagalan yang terjadi pada komposit hybrid serat bambu dan serat eceng gondok dengan matriks epoxy. Permukaan patahan menunjukkan adanya retakan pada matriks epoxy (*matrix cracking*) yang terjadi akibat kemampuan matriks dalam menahan tegangan telah mencapai batas maksimum selama pembebanan lentur. Selain itu, ditemukan fenomena *fiber pull-out* yang ditandai dengan adanya serat bambu dan serat eceng gondok yang terlepas dari matriks. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ikatan antarmuka antara serat dan epoxy belum sepenuhnya mampu mentransfer beban secara optimal.

Mekanisme kegagalan lainnya berupa *fiber-matrix debonding*, yaitu terjadinya pemisahan antara permukaan serat dan matriks akibat rendahnya adhesi pada daerah antarmuka. Keberadaan rongga (*void*) pada permukaan patahan juga menunjukkan adanya ketidaksempurnaan selama proses manufaktur, seperti distribusi resin yang kurang merata atau udara yang terperangkap saat proses pencetakan. Secara umum, karakteristik patahan menunjukkan bahwa kegagalan komposit terjadi melalui kombinasi antara kerusakan matriks, pelepasan serat dari matriks, serta patahnya sebagian serat akibat pembebanan bending.

Hasil uji makro tebal 4mm

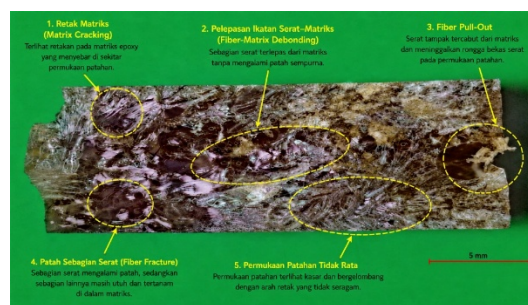


Gambar 4. Uji makro fraktografi epoxy tipe 2 (serat bambu+resin epoxy) tebal 4mm pembesaran 6x

Berdasarkan hasil pengamatan makro pada permukaan patahan spesimen uji bending, terlihat bahwa karakteristik patahan memiliki permukaan yang kasar (*rough fracture surface*), yang menunjukkan adanya mekanisme kegagalan secara bertahap akibat interaksi antara kerusakan matriks dan serat selama proses pembebanan. Daerah yang diperkuat serat bambu menunjukkan permukaan patahan yang relatif lebih kasar dibandingkan daerah dengan penguat serat eceng gondok. Hal tersebut berkaitan dengan karakteristik serat bambu yang memiliki kekakuan lebih tinggi sehingga membutuhkan energi lebih besar untuk mengalami kerusakan.

Selain itu, beberapa bagian permukaan patahan menunjukkan adanya fenomena *fiber pull-out*, terutama pada serat eceng gondok, yang ditandai dengan serat masih dalam kondisi relatif utuh namun mengalami pelepasan dari matriks epoxy. Fenomena ini menunjukkan bahwa ikatan antarmuka antara serat dan matriks belum sepenuhnya optimal dalam mentransfer beban selama proses pembebanan bending. Ketika tegangan yang diterima melebihi kemampuan adhesi antara serat dan resin, serat cenderung terlepas dari matriks sebelum mengalami patah. Selain *fiber pull-out*, ditemukan pula mekanisme kegagalan berupa *debonding*, *matrix cracking*, *fiber breakage*, dan keberadaan *void* yang menunjukkan adanya pengaruh kualitas manufaktur terhadap karakteristik patahan komposit.

Hasil uji makro tebal 5mm



Gambar 5. Uji makro fraktografi epoxy tipe 3 (serat bambu+resin epoxy) tebal 5mm pembesaran 6x

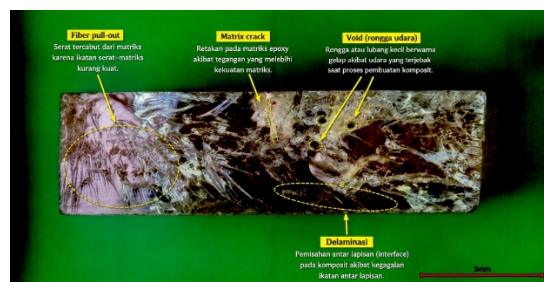
Berdasarkan hasil pengamatan makro pada permukaan patahan spesimen uji bending dengan ketebalan 5 mm, terlihat karakteristik patahan yang tidak homogen dengan sebagian serat masih melekat pada matriks epoxy, sedangkan sebagian lainnya mengalami pelepasan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kegagalan material terjadi melalui beberapa mekanisme yang melibatkan kerusakan matriks, kegagalan antarmuka serat–matriks, serta kerusakan pada serat penguat. Mekanisme kegagalan yang teridentifikasi meliputi *matrix cracking*, *fiber-matrix debonding*, *fiber pull-out*, dan *fiber fracture*.

Retakan pada matriks epoxy (*matrix cracking*) menunjukkan bahwa bagian matriks mengalami kegagalan akibat tegangan yang diterima selama pembebanan bending. Retakan yang terbentuk dapat menjadi jalur awal perambatan retak (*crack propagation*) yang menyebabkan penurunan kemampuan komposit dalam menahan beban. Selain itu, ditemukan fenomena pelepasan ikatan antara serat dan matriks (*fiber-matrix debonding*) yang menunjukkan bahwa adhesi pada daerah antarmuka belum sepenuhnya optimal sehingga proses transfer beban dari matriks menuju serat menjadi kurang efektif.

Fenomena *fiber pull-out* juga terlihat pada beberapa area patahan, ditandai dengan adanya serat yang tercabut dari matriks dan meninggalkan bekas rongga pada permukaan patahan. Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya kegagalan

ikatan antarmuka antara serat dan epoxy. Sementara itu, adanya sebagian serat yang mengalami patah (*fiber fracture*) menunjukkan bahwa beban telah berhasil ditransfer ke serat penguat hingga mencapai batas kekuatannya sebelum mengalami kerusakan. Secara keseluruhan, permukaan patahan yang kasar dan tidak beraturan menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan komposit terjadi secara kompleks akibat kombinasi antara kegagalan matriks, antarmuka, dan serat.

Gambar Hasil Uji Tarik Hasil uji makro tebal 3,2mm



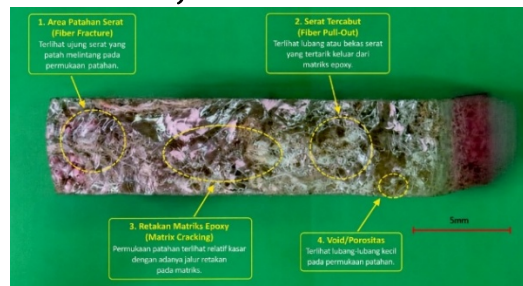
Gambar 6. Uji makro fraktografi epoxy tipe 1 (serat bambu+resin epoxy) tebal 3,2mm pembesaran 6x

Berdasarkan hasil pengamatan permukaan patahan, terlihat adanya perbedaan karakteristik kegagalan antara serat bambu dan serat eceng gondok dalam komposit hybrid epoxy. Serat bambu menunjukkan kecenderungan mengalami *fiber fracture* yang ditandai dengan patahan serat yang lebih tajam. Hal tersebut berkaitan dengan karakteristik serat bambu yang memiliki kekakuan lebih tinggi sehingga mampu menahan beban lebih besar sebelum mengalami kerusakan. Sebaliknya, serat eceng gondok yang memiliki struktur lebih berpori dan sifat mekanik relatif lebih rendah cenderung mengalami *fiber pull-out*, yaitu pelepasan serat dari matriks epoxy ketika ikatan antarmuka serat–matriks belum mampu mentransfer beban secara optimal.

Perbedaan mekanisme kegagalan tersebut menunjukkan bahwa kualitas adhesi antara serat dan matriks menjadi faktor penting dalam menentukan performa komposit. Ikatan antarmuka yang kuat memungkinkan distribusi tegangan berlangsung lebih efektif dari matriks menuju serat penguat, sedangkan ikatan yang kurang baik dapat menyebabkan terjadinya pelepasan serat sebelum mencapai kekuatan maksimum material.

Selain itu, hasil pengamatan juga menunjukkan adanya *void* atau rongga pada beberapa bagian permukaan patahan. Keberadaan *void* tersebut diduga terbentuk akibat udara yang terperangkap selama proses fabrikasi atau proses impregnasi resin yang belum sempurna. Rongga pada material komposit dapat berperan sebagai daerah konsentrasi tegangan yang mempercepat terjadinya inisiasi retak (*crack initiation*) dan perambatan retak (*crack propagation*). Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kemampuan komposit dalam menerima beban mekanik dan mempercepat terjadinya kegagalan material.

Hasil uji makro tebal 4mm



Gambar 7. Uji makro fraktografi epoxy tipe 1 (serat bambu+resin epoxy) tebal 3,2mm pembesaran 6x

Berdasarkan hasil pengamatan permukaan patahan spesimen uji tarik, ditemukan beberapa mekanisme kegagalan yang terjadi pada komposit hybrid serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy. Beberapa area menunjukkan adanya *fiber fracture* yang ditandai dengan ujung serat mengalami patahan melintang. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa sebagian beban telah berhasil ditransfer dari matriks epoxy menuju serat penguat sebelum material mengalami kegagalan. Selain itu, ditemukan mekanisme *fiber pull-out* berupa adanya bekas serat yang tertarik keluar dari matriks. Kondisi ini mengindikasikan bahwa ikatan antarmuka antara serat dan epoxy belum sepenuhnya optimal sehingga transfer tegangan dari matriks menuju serat masih terbatas.

Pada permukaan matriks juga terlihat adanya retakan (*matrix cracking*) yang ditunjukkan oleh karakteristik patahan yang relatif kasar. Retakan tersebut dapat berkembang akibat adanya konsentrasi tegangan pada area tertentu, terutama pada bagian yang memiliki ketidaksempurnaan struktur seperti *void* atau porositas. Keberadaan *void* berupa rongga kecil pada permukaan patahan menunjukkan adanya udara yang terperangkap selama proses fabrikasi komposit atau distribusi resin yang kurang sempurna. Rongga tersebut dapat menjadi titik awal terjadinya inisiasi dan perambatan retak (*crack initiation* dan *crack propagation*) sehingga menurunkan kemampuan material dalam menahan beban tarik. Secara keseluruhan, mekanisme kegagalan yang diamati menunjukkan bahwa performa komposit sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan serat–matriks, distribusi resin, serta keberadaan cacat internal pada material.

Hasil uji makro tebal 6mm



Gambar 8. Uji makro fraktografi epoxy tipe 1 (serat bambu+resin epoxy) tebal 3,2mm pembesaran 6x

Berdasarkan hasil pengamatan permukaan patahan spesimen uji tarik, ditemukan beberapa mekanisme kegagalan yang terjadi pada komposit hybrid serat eceng gondok dan serat bambu dengan matriks epoxy. Mekanisme yang dominan terlihat berupa *fiber pull-out*, yang ditandai dengan adanya serat yang tertarik keluar dari permukaan patahan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa ikatan antarmuka antara serat dan matriks epoxy belum sepenuhnya optimal, sehingga proses transfer tegangan dari matriks menuju serat penguat mengalami keterbatasan.

Selain itu, ditemukan mekanisme *fiber fracture* terutama pada serat bambu yang memiliki karakteristik kekakuan lebih tinggi. Patahnya serat menunjukkan bahwa beban tarik telah berhasil diteruskan dari matriks menuju serat hingga mencapai batas kekuatan tarik serat sebelum mengalami kegagalan. Pada bagian matriks juga terlihat adanya *matrix cracking* berupa retakan pada resin epoxy akibat tegangan tarik yang diterima selama proses pembebanan. Retakan pada matriks dapat berkembang menuju area antarmuka serat–matriks dan mempercepat terjadinya kegagalan komposit.

Hasil pengamatan juga menunjukkan adanya *void* atau porositas berupa rongga kecil pada permukaan patahan. Keberadaan *void* diduga berasal dari udara yang terperangkap selama proses fabrikasi atau distribusi resin yang kurang sempurna. Rongga tersebut berperan sebagai titik konsentrasi tegangan yang dapat mempercepat proses inisiasi dan propagasi retak (*crack initiation* dan *crack propagation*), sehingga menurunkan kemampuan komposit dalam menahan beban tarik. Secara keseluruhan, mekanisme kegagalan menunjukkan bahwa performa tarik komposit sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan serat–matriks, distribusi resin, serta keberadaan cacat internal pada material.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan serat alam sebagai penguat pada matriks epoxy mampu menghasilkan material komposit dengan karakteristik mekanik yang dipengaruhi oleh kemampuan transfer beban antara serat dan matriks. Variasi penguat serat memberikan pengaruh terhadap kemampuan komposit dalam menerima beban tarik, di mana keberadaan serat dengan kekakuan lebih tinggi berperan dalam meningkatkan kemampuan menahan tegangan. Hasil pengamatan permukaan patahan menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan yang terjadi meliputi *fiber pull-out*, *fiber fracture*, *matrix cracking*, dan pembentukan *void*, yang menunjukkan bahwa kualitas ikatan antarmuka serat–epoxy menjadi faktor penting dalam menentukan performa komposit.

Secara keseluruhan, karakteristik patahan memperlihatkan bahwa kegagalan komposit terjadi akibat kombinasi antara kegagalan serat, matriks, serta

antarmuka serat–matriks. Peningkatan kualitas adhesi antara serat dan epoxy serta pengurangan cacat internal selama proses fabrikasi menjadi aspek penting untuk menghasilkan komposit serat alam dengan kekuatan dan ketahanan mekanik yang lebih baik.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi perlakuan permukaan serat, seperti perlakuan alkali atau metode modifikasi lainnya, guna meningkatkan ikatan antara serat dan matriks epoxy. Selain itu, pengendalian proses fabrikasi perlu diperhatikan untuk mengurangi terbentuknya *void* sehingga kualitas komposit menjadi lebih homogen. Pengujian lanjutan seperti analisis struktur mikro, pengujian impak, dan pengujian ketahanan lingkungan juga dapat dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik dan potensi aplikasi komposit serat alam.

DAFTAR NOTASI

σ	= Tegangan tarik (kg/mm ²)
F	= Gaya tarik maksimum (kg)
A	= Luas Penampang (mm ²)
ε	= Regangan
ΔL	= Pertambahan panjang (mm)
L_0	= Panjang awal (mm)
$\sigma_{\max}$	= Tegangan maksimum (kg/mm ²)
$F_{\max}$	= Gaya maksimum (kg)
A	= Luas penampang awal (mm ²)
σ	= Tegangan lentur (kg/mm ²)
F	= Beban maksimum (kg)
L	= Panjang bentang (mm)
b	= Lebar spesimen (mm)
d	= Tebal spesimen (mm)

DAFTAR REFERENSI

1. Akhaina, A. P., Mawardi, M., & Amalia, I. (2025). Pembuatan komposit berpenguat serat bambu untuk melihat pengaruh variasi volume terhadap sifat mekanis menggunakan matriks styrofoam dan polyester. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 9(2), 76. <https://doi.org/10.30811/jmst.v9i2.7844>
2. Alajmi, A., Abousnina, R., Shalwan, A., Alajmi, S., & Alipour, G. (2024). An experimental and numerical investigation into the durability of fibre/polymer composites with synthetic and natural reinforcement.
3. Asyrofi, I. M., Putra, W. T., & Winardi, Y. (2023). Pengaruh campuran plastik waste LDPE dan PET bermatrik resin polyester terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro.
4. Bangun, R. H., Siregar, J. P., Bachtiar, D., & Rejab, M. R. M. (2023). Mechanical performance of bamboo fiber reinforced polymer composites: A review.

- Materials Today Communications*, 35, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105802>
5. Kumar, R., Kumar, K., & Sahoo, S. (2023). Water hyacinth fiber reinforced polymer composites: Processing, characterization and potential applications. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136033. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136033>
 6. Kurnia, H., Wahyuni, A. D., & Adistyani, N. (2023). Penggunaan material logam di berbagai industri manufaktur Indonesia: Sistematis kajian literatur.
 7. Mansjur, Z., & Kewas, J. C. (2024). Karakterisasi mekanik komposit serat hybrid serat lidah mertua dan serat eceng gondok, 3(2), 243–254.
 8. Marunung, A. (2022). Improvement of bamboo fiber properties through delignification treatment for polymer composite applications. *Journal of Renewable Materials*, 10(8), 2105–2118. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021543>
 9. Marunung, T. (2022). Analisis perbandingan kekuatan bahan komposit dengan variasi susunan acak dan lurus memanjang berbasis serat bambu dan resin polyester. *Jurnal Kolaborasi Sains dan Ilmu Terapan*, 1, 19–30.
 10. Nayan, A., Yusuf, M., & Siska, D. (2023). Tensile strength comparison of polymer composite materials reinforced by three types of bamboo fiber treated with 5% aq. NaOH solution, 3(2), 37–45.
 11. Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., & Paridah, M. T. (2021). Recent advances in natural fiber reinforced polymer composites: Processing, characterization and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1794–1812. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.135>