



Pemanfaatan Biomassa Enceng Gondok Sebagai Penguat Komposit Polimer Berkelanjutan: Tinjauan Kritis Potensi, Tantangan, dan Arah Pengembangan

UTILIZATION OF WATER HYACINTH BIOMASS AS A REINFORCEMENT FOR SUSTAINABLE POLYMER COMPOSITES: A CRITICAL REVIEW OF POTENTIAL, CHALLENGES, AND DEVELOPMENT DIRECTIONS

Agus Dwi Catur^{1*}, Ahmad Akromul Huda²,

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

*Co-author: agus.dc@unram.ac.id

Article History:

Received : 23-04-2026
Revised : 11-06-2026
Accepted : 16-06-2026
Online : 17-06-2026

Keywords:

Critical review;
Natural fiber;
Polymer-based composites;
Sustainable materials;
Water hyacinth;

Kata Kunci:

Enceng gondok;
Komposit berbasis polimer;
Material berkelanjutan;
Review kritis
Serat alam;



Abstract: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is an invasive aquatic weed that often disrupts irrigation channels, water quality, and agricultural water resource management, but also has the potential to be a source of lignocellulosic biomass for the development of sustainable materials. This article presents a critical review of the utilization of water hyacinth fiber as a reinforcement for polymer-based composites by evaluating fiber characteristics, composite mechanical performance, technical challenges, and development opportunities. The results of the study indicate that despite water hyacinth fiber's low density, abundant availability, and relatively low cost, the improvement in the resulting composite's mechanical properties is still inconsistent due to weak fiber-matrix interfacial bonding, high porosity, and variability in fiber properties influenced by biological conditions and extraction methods. This review confirms that water hyacinth is more prospective for non-structural and semi-structural applications than as a primary structural reinforcement. In addition, fiber surface treatment, hybrid composite development, and filler integration are identified as key strategies to improve material performance. From a biosystems and agricultural engineering perspective, the use of water hyacinth as a composite raw material offers a promising approach in the management of aquatic weed biomass, the implementation of a circular economy, and the development of environmentally friendly materials with added value for the agricultural sector and sustainable management of biological resources.

Abstrak: Enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan gulma perairan invasif yang sering mengganggu saluran irigasi, kualitas perairan, dan pengelolaan sumber daya air pertanian, namun sekaligus berpotensi menjadi sumber biomassa lignoselulosa untuk pengembangan material berkelanjutan. Artikel ini menyajikan tinjauan kritis mengenai pemanfaatan serat enceng gondok sebagai penguat komposit berbasis polimer dengan mengevaluasi karakteristik serat, performa mekanik komposit, tantangan teknis, serta peluang pengembangannya. Hasil kajian menunjukkan bahwa meskipun serat enceng gondok memiliki densitas rendah, ketersediaan melimpah, dan biaya yang relatif murah, peningkatan sifat mekanik komposit yang dihasilkan masih belum konsisten akibat lemahnya ikatan antarmuka serat-matriks, tingginya porositas, serta variabilitas sifat serat yang dipengaruhi oleh kondisi biologis dan metode ekstraksi. Tinjauan ini menegaskan bahwa enceng gondok lebih prospektif untuk aplikasi non-struktural dan semi-struktural dibandingkan sebagai penguat struktural utama. Selain itu, perlakuan permukaan serat, pengembangan komposit hibrid, dan integrasi filler diidentifikasi sebagai strategi utama untuk meningkatkan performa material. Dari perspektif biosistem dan rekayasa pertanian, pemanfaatan enceng gondok sebagai bahan baku komposit menawarkan pendekatan yang menjanjikan dalam pengelolaan biomassa gulma

perairan, penerapan ekonomi sirkular, serta pengembangan material ramah lingkungan bernilai tambah bagi sektor pertanian dan pengelolaan sumber daya hayati berkelanjutan.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

A. LATAR BELAKANG

Enceng gondok merupakan salah satu gulma air paling invasif di berbagai perairan dunia, dengan laju pertumbuhan yang sangat cepat sehingga mampu menutupi permukaan danau, sungai, waduk, maupun saluran irigasi. Dalam sistem pertanian, keberadaan enceng gondok sering menjadi masalah serius karena menghambat distribusi air irigasi, menurunkan efisiensi jaringan irigasi, meningkatkan biaya pemeliharaan saluran, serta mengganggu produktivitas lahan pertanian yang bergantung pada ketersediaan air. Selain itu, penyebaran enceng gondok secara masif juga menurunkan kualitas air, mengurangi oksigen terlarut, dan mengancam keseimbangan ekosistem perairan. Oleh karena itu, enceng gondok tidak hanya dipandang sebagai masalah ekologis, tetapi juga sebagai tantangan dalam pengelolaan biosistem dan sumber daya air pertanian di berbagai negara tropis dan subtropis (Khotsa et al., 2025)

Seiring meningkatnya kesadaran global terhadap isu keberlanjutan, ekonomi sirkular, pencemaran plastik, serta keterbatasan sumber daya fosil, pemanfaatan biomassa pertanian dan biomassa limbah menjadi material bernilai tambah semakin mendapat perhatian. Dalam konteks ini, komposit berbasis polimer yang diperkuat serat alam menjadi salah satu solusi yang menjanjikan karena menawarkan biodegradabilitas yang lebih baik, kebutuhan energi produksi yang lebih rendah, serta potensi pengurangan jejak karbon dibandingkan material berbasis serat sintetis (Zulkarnain et al., 2024). Pendekatan ini sejalan dengan konsep *sustainable agricultural materials* yang mendorong pemanfaatan biomassa lokal untuk menghasilkan produk yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomi.

Pemanfaatan serat alam sebagai penguat komposit telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Serat seperti kenaf, rami, sisal, dan serat daun nanas telah banyak diteliti karena kandungan selulosanya yang tinggi dan sifat mekanik yang relatif baik (Sulardjaka et al., 2022). Dalam konteks tersebut, enceng gondok menawarkan *dual value proposition*, yaitu sebagai gulma perairan yang perlu dikendalikan sekaligus sebagai sumber biomassa lignoselulosa yang melimpah dan berbiaya rendah. Pemanfaatan enceng gondok sebagai penguat komposit tidak hanya berpotensi menghasilkan material berkelanjutan, tetapi juga menjadi bagian dari strategi pengelolaan biomassa dalam sistem biosumber daya (*bio-resource management*) dan rekayasa proses hayati (*bioprocess engineering*) (Sindhu et al., 2017). Serat enceng gondok dapat diperoleh melalui berbagai metode ekstraksi dan perlakuan kimia yang bertujuan meningkatkan kualitas permukaan serat dan kompatibilitasnya dengan matriks polimer (Nguyen & Nguyen, 2022).

Meskipun demikian, berbagai penelitian yang telah dipublikasikan menunjukkan hasil yang beragam dan sering kali inkonsisten. Beberapa studi melaporkan peningkatan sifat mekanik setelah perlakuan serat tertentu atau optimasi fraksi volume penguat (Gnanadurai et al., 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa komposit berbasis enceng gondok masih memiliki performa yang relatif rendah dibandingkan komposit berbasis serat alam unggulan maupun serat sintetis (Aloka et al., 2024). Variasi tersebut dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk karakteristik biomassa awal, metode ekstraksi serat, perlakuan permukaan, jenis matriks polimer, serta parameter proses manufaktur komposit.

Selain itu, sebagian besar publikasi yang tersedia masih berfokus pada karakterisasi eksperimental secara parsial, seperti pengujian tarik, lentur, atau morfologi, tanpa mengintegrasikan hasil-hasil tersebut dalam suatu analisis kritis yang mampu menjelaskan hubungan antara karakteristik biomassa enceng gondok, mekanisme penguatan komposit, dan potensi aplikasinya dalam konteks biosistem dan material berkelanjutan. Hingga saat ini, masih terbatas kajian review yang secara khusus mengevaluasi secara kritis kelebihan, keterbatasan, mekanisme kegagalan, serta peluang pengembangan komposit berbasis enceng gondok dari perspektif rekayasa material dan pemanfaatan biomassa.

Berdasarkan kondisi tersebut, artikel ini memiliki kebaruan (*novelty*) berupa penyajian tinjauan kritis yang tidak hanya merangkum hasil-hasil penelitian terdahulu, tetapi juga mengevaluasi secara komprehensif hubungan antara karakteristik biomassa enceng gondok, performa komposit yang dihasilkan, tantangan teknis yang masih dihadapi, serta peluang pengembangannya dalam kerangka *bioprocess engineering*, *sustainable agricultural materials*, dan pengelolaan biomassa berkelanjutan. Dengan pendekatan ini, artikel diharapkan dapat memberikan perspektif yang lebih terintegrasi dibandingkan review-review sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada aspek karakterisasi material.

Tujuan utama artikel ini adalah menyajikan gambaran komprehensif dan kritis mengenai pemanfaatan enceng gondok sebagai biomassa penguat komposit berbasis polimer. Kajian difokuskan pada karakteristik fisik, dan mekanik serat enceng gondok, performa mekanik komposit yang dihasilkan, faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas komposit, serta berbagai tantangan yang menghambat implementasinya secara luas. Selain itu, artikel ini mengidentifikasi peluang riset dan arah pengembangan teknologi yang dapat mendukung pemanfaatan enceng gondok sebagai material berkelanjutan bernilai tambah dalam bidang biosistem, pertanian, dan rekayasa material masa depan.

B. METODE

Artikel ini disusun menggunakan pendekatan *narrative critical review* yang bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi secara kritis perkembangan penelitian terkait pemanfaatan serat enceng gondok sebagai penguat komposit berbasis polimer. Pengumpulan literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah utama, yaitu Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi: “*water hyacinth fiber composite*”, “*Eichhornia crassipes composite*”, “*natural fiber reinforced polymer*”, “*lignocellulosic fiber composite*”, serta kombinasi dengan istilah seperti *mechanical properties*, *interfacial bonding*, dan *surface treatment*.

Kriteria dalam pemilihan literatur meliputi:

1. Artikel yang membahas serat enceng gondok sebagai penguat komposit.
2. Studi yang melaporkan sifat mekanik, fisik, atau karakteristik mikrostruktur.
3. Publikasi pada jurnal ilmiah bereputasi atau prosiding internasional,
4. Artikel yang tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia.

Literatur yang terpilih kemudian dianalisis secara kualitatif dengan pendekatan komparatif untuk mengidentifikasi pola umum, inkonsistensi hasil, serta faktor-faktor utama yang mempengaruhi performa komposit. Analisis difokuskan pada hubungan antara karakteristik serat, parameter proses, dan sifat mekanik komposit yang dihasilkan. Pendekatan kritis diterapkan dengan tidak hanya merangkum hasil penelitian, tetapi juga mengevaluasi keterbatasan metodologis, potensi bias, serta kesenjangan penelitian yang masih terbuka. Hasil analisis ini digunakan untuk merumuskan tantangan utama dan arah pengembangan riset di masa depan.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Serat Enceng Gondok sebagai Penguat Komposit

Serat enceng gondok tergolong sebagai serat lignoselulosa yang tersusun dari tiga komponen utama: selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa merupakan fraksi dominan dalam struktur serat

ini dan bertanggung jawab terhadap kekuatan mekanik dasar karena sifat rantai polimernya yang kristalin dan berorientasi tinggi, sedangkan hemiselulosa berfungsi sebagai matriks pengikat dan berkontribusi pada kestabilan struktural sekunder, dan lignin memberikan kekakuan serta resistensi terhadap degradasi biologis. Kandungan relatif komponen-komponen ini dalam serat enceng gondok bervariasi menurut metode ekstraksi dan sumber tumbuhan, tetapi secara umum menunjukkan nilai selulosa yang tinggi dibandingkan hemiselulosa dan lignin yang lebih rendah yang secara kolektif mempengaruhi performa serat ketika menjadi penguat komposit (Ishaya et al., 2024).

Struktur fisik serat enceng gondok juga ditandai oleh porositas internal dan diameter serat yang relatif kecil, yang membentuk jaringan mikro berongga (Wembe et al., 2023). Porositas dan diameter ini memainkan peran penting dalam *stress transfer* antara serat dan matriks polimer: serat dengan diameter kecil dan permukaan berpori dapat meningkatkan luas interaksi antarmuka dengan matriks, namun porositas yang berlebihan dapat mengakibatkan pembentukan void dan konsentrasi tegangan yang mengurangi kekuatan mekanik komposit (Tahir et al., 2024). Oleh karena itu, pemahaman tentang mikrostruktur dan ukurannya sangat penting dalam merancang komposit enceng gondok untuk aplikasi tertentu.

Sifat mekanik serat enceng gondok mencerminkan kontribusi selulosa kristalin dalam struktur seratnya, termasuk kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan regangan putus. Beberapa studi karakterisasi menunjukkan bahwa modulus elastisitas serat enceng gondok berada dalam rentang beberapa gigapascal, mencerminkan kekakuan yang moderat dibandingkan serat alami lainnya, dengan variasi signifikan tergantung pada kondisi tumbuhan dan perlakuan pra-ekstraksi (Ishaya et al., 2024).

Jika dibandingkan dengan serat alam lain yang sudah lebih mapan seperti kenaf, rami, nanas, dan sisal, serat enceng gondok umumnya memiliki sifat mekanik yang lebih rendah. Hal ini terutama disebabkan oleh perbedaan kadar selulosa, orientasi mikrostruktur, serta aspek rasio serat. Misalnya, sisal dan rami yang sering dipakai sebagai penguat alami menunjukkan nilai modulus elastisitas dan kekuatan tarik yang lebih tinggi karena kandungan selulosa yang umumnya lebih tinggi dan struktur serat yang lebih teratur secara mikro (Kovuru & Schuster, 2025), dibandingkan dengan serat enceng gondok yang lebih heterogen secara mikro. Meski demikian, dalam konteks penggunaan sebagai komposit berbasis polimer, sifat mekanik serat enceng gondok tetap relevan karena kontribusinya terhadap peningkatan modulus elastisitas dan energi yang terserap sebelum patah, terutama bila rangkaian serat mendapatkan perlakuan permukaan yang sesuai atau dikombinasikan dalam bentuk hybrid (Tewelde et al., 2022).

Salah satu keunggulan utama serat enceng gondok adalah ketersediaannya yang melimpah dan biaya produksi yang rendah. Enceng gondok tumbuh secara cepat di perairan tropis dan subtropis, menjadikannya biomassa yang mudah diakses secara lokal di banyak wilayah tropis tanpa bersaing langsung dengan tanaman pangan atau serat berharga lainnya. Karena pertumbuhan yang cepat ini sering kali mengganggu ekosistem perairan, pemanfaatan enceng gondok untuk aplikasi material menawarkan nilai tambah ganda: mengurangi beban gulma air sekaligus menyediakan sumber penguat serat untuk material komposit berkelanjutan (Nastia et al., 2025).

Dalam kerangka *circular economy*, penggunaan serat enceng gondok dapat berkontribusi pada strategi nilai tambah dari limbah biomassa serta memperpanjang siklus hidup material dengan memanfaatkan sumber yang dapat diperbarui. Kontribusi ini menjadi semakin menarik karena serat enceng gondok memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan serat sintetis, sehingga komposit yang dihasilkan berpotensi menawarkan jejak lingkungan yang lebih baik sepanjang siklus pemakaiannya (Nastia et al., 2025).

Tabel 1 merupakan komparatif karakteristik serat alam enceng gondok vs (kenaf, sisal, rami) yang mencakup komposisi kimia (selulosa, hemiselulosa, lignin) serta sifat mekanik (kekuatan tarik dan modulus elastisitas). Data enceng gondok relatif kurang lengkap dibandingkan serat alam lain pada literatur yang tersedia ini adalah fenomena umum di bidang penelitian. Banyak studi masih fokus pada uji komposit dan bukan karakterisasi serat individual.

Tabel 1. Perbandingan karakteristik serat alam enceng gondok vs (kenaf, sisal, rami)

Serat	Selulosa (%)	Hemicellulosa (%)	Lignin (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)
Enceng Gondok (Wembe et al., 2023)	50–60	19–21	2–17	115	7.7
Kenaf (Wembe et al., 2023)	44–57	21	15–19	930	53
Sisal (Kovuru & Schuster, 2025)	47–78	10–24	7–11	507–855	9.4–22
Rami (Kovuru & Schuster, 2025)	68.6–91	5–16	0.6–1	400–938	44–128

Serat enceng gondok memiliki komposisi selulosa yang relatif tinggi dan hemiselulosa moderat, tetapi tingkat ligninnya bervariasi tajam antar studi, hal ini dipengaruhi oleh metode persiapan serat dan analisis. Komposisi ini mempengaruhi interaksi serat-matriks dalam komposit serta respons mekanik akhir. Kekuatan tarik enceng gondok sangat bervariasi tergantung cara ekstraksi, tetapi literatur sering melaporkan angka kekuatan relatif rendah. Modulus 7.7 GPa dilaporkan dari studi mekanik serat individual enceng gondok (Wembe et al., 2023). Data untuk enceng gondok menunjukkan variasi yang besar antar studi, hal ini menggaris bawahi kebutuhan akan standarisasi karakterisasi untuk benar-benar bisa memahami potensi mekaniknya. Data yang terstandarisasi juga penting untuk membandingkan performa relatif terhadap serat alam lain yang lebih umum. Komposisi kimia serat alam kenaf, sisal, rami bersumber pada literatur umum yang membandingkan komposisi kimia struktural serat alam. Nilai kekuatan tarik dan modulus untuk serat alam lainnya umumnya diambil dari studi mekanik serat alam yang dikompilasi di literatur dengan kata kunci *natural fiber reinforced polymer composites*.

Serat enceng gondok menunjukkan kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan serat kenaf, sisal, rami, yang menegaskan keterbatasan kemampuan menahan bebannya dalam bentuk yang tidak diolah. Perbedaan ini menyoroti bahwa kontribusi utama serat enceng gondok dalam komposit lebih selaras dengan peningkatan kekakuan, pengurangan berat, dan manfaat keberlanjutan daripada kekuatan struktural yang tinggi, kecuali jika diterapkan perlakuan permukaan tingkat lanjut atau strategi hibridisasi. Sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan kenaf, sisal, ramie, enceng gondok secara umum menunjukkan nilai kekuatan tarik dan modulus yang lebih rendah, yang menunjukkan potensi yang lebih terbatas sebagai penguat untuk aplikasi struktural tanpa perlakuan tambahan atau kombinasi hibrid.

2. Performa Komposit Berbasis Polimer Diperkuat Enceng Gondok

Pemanfaatan serat enceng gondok sebagai penguat komposit paling banyak dilaporkan pada sistem matriks *polyester* tak jenuh, *epoxy*, dan *polyethylene* (Tabel 2). Matriks polyester menjadi pilihan dominan karena kemudahan proses, biaya rendah, dan kompatibilitasnya dengan berbagai serat alam, sehingga sering digunakan sebagai *baseline material* dalam studi awal pengembangan komposit berbasis enceng gondok. *Epoxy* juga dilaporkan dalam beberapa penelitian karena kemampuan adhesinya yang lebih baik dan sifat mekanik yang lebih stabil, meskipun biayanya relatif lebih tinggi. *Vinylester*, meskipun memiliki ketahanan kimia dan sifat mekanik yang unggul dibanding *polyester*, belum dikaji secara sistematis dalam konteks serat enceng gondok.

Tabel 2 Sifat mekanik komposit enceng gondok dengan berbagai jenis matrik

Komposit	<i>Flexural Strength</i> (MPa)	<i>Flexural Module</i> (MPa)	<i>Compressive Strength</i> (MPa)	<i>Compressive Module</i> (MPa)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Toughness</i> (J/cm ²)
Polyester - enceng gondok tanpa alkalisasi (Nguyen & Nguyen, 2022)	3,27 – 11,05	125,22 – 344,16	234,67 – 288,12	215,72 – 281,35	-	-
Polyester- enceng gondok dengan alkalisasi (Nguyen & Nguyen, 2022)	7,16 – 31,11	550,27 – 1304,54	320,49 – 420,75	466,92 – 526,81	-	-
Epoxy – enceng gondok (Edrin et al., 2024)	14,8	-	37,33	-	-	-
Epoxy - enceng gondok – fiberglass (Edrin et al., 2024)	16,7 – 37,67	-	93,33 -97,33	-	-	-
Epoxy – enceng gondok (Sulardjaka et al., 2022)	-	-	-	-	15 – 60	0,5 -0,8
Polyethylene -enceng gondok (Gnanadurai et al., 2021)	28 -36	-	-	-	25 – 29	-
Polyethylene -enceng gondok (Aloka et al., 2024)	8,3-10,35	139-210,5	-	-	6,7 - 8,6	-

Penggunaan matriks termoplastik, seperti *polypropylene* (PP), belum pernah dilaporkan dalam konteks sebagai matriks pada komposit enceng gondok. Hal ini terutama disebabkan oleh tantangan kompatibilitas antara sifat hidrofobik matriks termoplastik dan sifat hidrofilik serat tumbuhan, yang memerlukan *compatibilizer* atau perlakuan khusus untuk mencapai ikatan antarmuka yang memadai. Beberapa studi awal menunjukkan bahwa tanpa modifikasi antarmuka yang efektif, komposit PE yang diperkuat serat tumbuhan cenderung menunjukkan performa mekanik yang inferior dibandingkan sistem termoset (Janez, 2024).

Evaluasi sifat mekanik komposit berbasis enceng gondok umumnya mencakup sifat tarik, lentur, dan dampak, yang masing-masing menunjukkan tren yang tidak selalu konsisten antar penelitian. Peningkatan fraksi berat serat tenun enceng gondok menyebabkan penurunan kekuatan tarik komposit, sementara kekuatan dampak komposit meningkat seiring dengan peningkatan fraksi berat serat tenun enceng gondok. Jumlah pori antara serat dan matriks berbanding lurus dengan fraksi berat serat tenun enceng gondok, yang menyebabkan fraktur mode delaminasi. Kekuatan tarik dan dampak komposit serat enceng gondok yang disusun searah meningkat seiring dengan peningkatan fraksi berat serat enceng gondok (Sulardjaka et al., 2022). Hasil penelitian yang lain menunjukkan komposit enceng gondok memiliki kekuatan tekan tinggi yang hampir sama dengan komposit fiberglass, memiliki peningkatan yang signifikan dalam kekuatan lentur dan tekan, dan ini membuktikan bahwa komposit ramah lingkungan tersebut memenuhi persyaratan untuk berbagai aplikasi (Nguyen & Nguyen, 2022).

Sejumlah studi melaporkan adanya peningkatan modulus elastisitas komposit dengan penambahan serat tumbuhan pada fraksi volume rendah hingga menengah, yang dikaitkan dengan kontribusi kekakuan serat lignoselulosa terhadap matriks polimer. Namun, peningkatan ini sering kali tidak diikuti oleh peningkatan kekuatan tarik atau lentur, bahkan pada beberapa kasus justru terjadi penurunan kekuatan dibandingkan matriks murni (Sgriccia et al., 2008; Thakur & Thakur, 2014).

Pengaruh fraksi volume serat merupakan faktor kunci yang menentukan performa komposit. Pada fraksi volume rendah, serat tumbuhan dapat berfungsi sebagai *stiffness enhancer* tanpa secara signifikan mengganggu kontinuitas matriks (Pickering et al., 2016). Sebaliknya, pada fraksi volume yang lebih tinggi, kecenderungan terbentuknya aglomerasi serat, peningkatan porositas, dan ketidakmerataan distribusi serat sering dilaporkan, yang berujung pada penurunan sifat mekanik, khususnya kekuatan tarik dan lentur. Fenomena ini menunjukkan bahwa enceng gondok tidak dapat diperlakukan sebagai penguat struktural konvensional tanpa optimasi desain komposit yang matang. Sifat kekuatan tarik dan lentur optimal dari komposit HDPE-enceng gondok diperoleh ketika

komposit dibuat dengan kombinasi 30% fraksi volume serat enceng gondok yang diolah dengan larutan NaOH 5% selama 12 jam dan dicampur dengan 15% agen pengikat (Gnanadurai et al., 2021).

Pada uji impact, beberapa penelitian melaporkan peningkatan kemampuan penyerapan energi akibat mekanisme *fiber pull-out* dan deformasi lokal serat, namun hasil ini sangat bergantung pada kualitas ikatan antarmuka. Dalam banyak kasus, peningkatan ketangguhan impact terjadi bersamaan dengan penurunan kekuatan statik, sehingga menegaskan adanya *trade-off* antara kekuatan dan ketangguhan pada komposit berbasis serat enceng gondok (Sulardjaka et al., 2022). Kekuatan lentur dan kekuatan impak menunjukkan peningkatan positif ketika serat enceng gondok digunakan sebagai penguat dalam komposit *polyethylene*, namun terjadi tren penurunan kekuatan tarik seiring peningkatan kandungan serat enceng gondok. Komposit *polyethylene*-serat enceng gondok memiliki sifat yang sebanding dengan papan partikel komersial, ini menggarisbawahi potensi menjanjikan (Aloka et al., 2024)

Analisis mekanisme kegagalan pada komposit berbasis enceng gondok secara konsisten menunjukkan bahwa *poor interfacial bonding* merupakan faktor dominan yang membatasi performa mekanik. Ketidakcocokan sifat kimia antara serat yang bersifat hidrofilik dan matriks polimer yang umumnya hidrofobik menghambat transfer tegangan yang efisien dari matriks ke serat. Akibatnya, kegagalan sering diawali pada antarmuka serat–matriks, bukan pada serat atau matriks itu sendiri. Pengamatan mikroskopis pasca patah menunjukkan fenomena *fiber pull-out*, pembentukan *void*, dan delaminasi, terutama pada komposit dengan fraksi volume serat tinggi atau distribusi serat yang tidak homogen (Sulardjaka et al., 2022). Tercabutnya serat dari matrik yang ekstensif menandakan *adhesi* antarmuka yang lemah, sementara keberadaan void berperan sebagai titik konsentrasi tegangan yang mempercepat inisiasi retak. Mekanisme-mekanisme ini menjelaskan mengapa peningkatan kandungan serat enceng gondok tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan komposit.

3. Tantangan Utama dalam Pemanfaatan Enceng Gondok

Penelitian yang dilakukan oleh Pickering et al., (2016) juga menunjukkan bahwa kegagalan komposit sering diawali pada daerah antarmuka serat–matriks yang ditandai oleh fenomena *fiber pull-out*, delaminasi, dan pembentukan void yang menurunkan kekuatan tarik maupun lentur komposit. Perbedaan karakteristik matrik dan serat enceng gondok menyebabkan terbentuknya ikatan antarmuka yang lemah sehingga transfer tegangan dari matriks ke serat menjadi kurang efektif. Akibatnya, peningkatan fraksi volume serat tidak selalu diikuti oleh peningkatan sifat mekanik.

Tantangan berikutnya adalah tingginya variabilitas sifat serat enceng gondok. Karakteristik fisik, kimia, dan mekanik serat dipengaruhi oleh umur tanaman, kondisi lingkungan tumbuh, kualitas perairan, serta bagian tanaman yang digunakan (Khotsa et al., 2025). Metode ekstraksi dan perlakuan awal serat juga menghasilkan variasi struktur permukaan dan mikrostruktur serat yang cukup besar (Nguyen & Nguyen, 2022). Kondisi ini menyebabkan hasil penelitian sering menunjukkan performa yang berbeda-beda sehingga menyulitkan perbandingan antar studi dan menghambat upaya standarisasi material.

Kombinasi antara lemahnya ikatan antarmuka dan variabilitas sifat serat menyebabkan komposit berbasis enceng gondok masih memiliki keterbatasan untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan dan keandalan tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatannya saat ini lebih realistis diarahkan pada aplikasi non-struktural dan semi-struktural, seperti panel interior, material insulasi, komponen ringan, serta berbagai produk berbasis biomassa dan material berkelanjutan yang tidak menuntut performa mekanik tinggi.

4. Arah Pengembangan dan Peluang Riset Masa Depan

Secara keseluruhan, arah pengembangan riset ke depan perlu mengintegrasikan aspek rekayasa material, pengolahan biomassa (*bioprocess*), dan kebutuhan aplikasi pada sistem pertanian berkelanjutan. Dengan pendekatan tersebut, enceng gondok tidak lagi dipandang semata sebagai limbah atau gulma perairan, melainkan sebagai sumber biomassa terbarukan yang dapat mendukung

pengembangan material ramah lingkungan dan meningkatkan nilai tambah dalam sistem biosumber daya yang berkelanjutan.

Tahap pertama yang paling mendasar adalah peningkatan kualitas antarmuka serat–matriks melalui modifikasi permukaan serat. Perlakuan alkali mampu menghilangkan sebagian hemiselulosa, lignin, dan pengotor permukaan sehingga meningkatkan kekasaran serat dan memperbaiki *mechanical interlocking* dengan matriks polimer (Dharanendra et al., 2025). Penggunaan agen silane dapat menghasilkan ikatan kimia yang lebih kuat antara serat hidrofilik dan matriks hidrofobik sehingga meningkatkan efisiensi transfer tegangan (Xie et al., 2010). Penelitian di masa depan perlu difokuskan pada optimasi kombinasi perlakuan kimia, standarisasi proses ekstraksi serat, serta evaluasi ketahanan jangka panjang komposit untuk mengurangi variabilitas sifat yang selama ini menjadi salah satu kelemahan utama biomassa enceng gondok.

Tahap berikutnya adalah peningkatan performa komposit melalui pendekatan hibridisasi. Penggabungan serat enceng gondok dengan serat alam lain atau serat sintetis dapat menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan sifat mekanik intrinsiknya. Pemanfaatan filler mikro dan nanopartikel seperti nanoselulosa, nanoclay, maupun partikel anorganik berpotensi meningkatkan kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan ketahanan lingkungan komposit (Premnath et al., 2024; Yadav et al., 2023). Kajian diperlukan untuk memahami interaksi antara serat, matriks, dan filler sehingga diperoleh komposit yang memiliki performa lebih baik, ekonomis dan berkelanjutan.

Tahap yang tidak kalah penting adalah pengembangan aplikasi pemanfaatan biomassa dan kebutuhan sektor pertanian. Sebagai gulma yang sering mengganggu saluran irigasi dan ekosistem perairan pertanian, pemanfaatan enceng gondok sebagai bahan baku komposit memberikan peluang penerapan konsep ekonomi sirkular dalam pengelolaan biomassa. Komposit berbasis enceng gondok berpotensi digunakan untuk panel ringan, bahan insulasi, wadah penyimpanan hasil pertanian, komponen rumah tanaman (*greenhouse*), panel pelindung peralatan pertanian, serta berbagai produk non-struktural lainnya yang tidak memerlukan kekuatan mekanik tinggi (Li et al., 2021). Pendekatan ini tidak hanya menghasilkan material bernilai tambah, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan biomassa gulma perairan yang selama ini menjadi masalah dalam sistem irigasi dan pengelolaan sumber daya air.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Enceng gondok memiliki potensi sebagai sumber biomassa lignoselulosa untuk penguat komposit berbasis polimer karena ketersediaannya yang melimpah, biaya rendah, dan karakteristik yang mendukung pengembangan material berkelanjutan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa serat enceng gondok dapat digunakan pada matriks termoset maupun termoplastik, sehingga berpeluang mendukung pengembangan komposit ramah lingkungan dan berbasis ekonomi sirkular. Pemanfaatan enceng gondok masih menghadapi beberapa kendala utama, yaitu lemahnya ikatan antarmuka serat–matriks, tingginya variabilitas sifat serat, dan keterbatasan sifat mekanik dibandingkan serat alam unggulan lainnya. Oleh karena itu, peningkatan kualitas serat melalui perlakuan permukaan, pengembangan komposit hibrid, dan optimasi proses manufaktur menjadi fokus penting penelitian selanjutnya. Dari perspektif biosistem dan rekayasa pertanian, pemanfaatan enceng gondok sebagai bahan baku komposit dapat menjadi alternatif pengelolaan biomassa gulma perairan yang selama ini mengganggu sistem irigasi dan sumber daya air. Dengan pengembangan yang tepat, material berbasis enceng gondok berpotensi diaplikasikan pada berbagai produk non-struktural yang mendukung sistem pertanian berkelanjutan sekaligus meningkatkan nilai tambah biomassa lokal.

DAFTAR RUJUKAN

- Aloka, K. N. A., Jayasinghe, R. A., Priyadarshana, G., & Nilmini, A. H. L. R. (2024). Influence of Fibre Loading on the Physico-Mechanical Properties of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Fibre Reinforced Polyethylene Composites. *Asian Journal of Chemistry*, 36(8). <https://doi.org/10.14233/ajchem.2024.31699>
- Dharanendra, Y. T., Hindi, J., Gurumurthy, B. M., & Muralishwara, K. (2025). Influence of alkali treatment in enhancing crystallinity and breaking force of pineapple leaf fiber. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19991-8>

- Edrin, D. B., Maryam, G. A. E., Kaye, A. A. J., Myron, I. R. M., Juliuz, M. F. M., Miuki, F. C. R., & John, P. D. V. (2024). DLSU Senior High School Research Congress: Sustainability, Environment, and Energy (SEE), No. 8. *DLSU Senior High School Research Congress*.
- Gnanadurai, R., Guadie, T., & Mesfin, S. (2021). Study on the Mechanical Properties of Water Hyacinth Fiber Reinforced High Density Polyethylene Composite. *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 10(3).
- Ishaya, A. A., Elinwa, A. U., & Mohammed, I. Y. (2024). Water Hyacinth Plant Fibre Characterization. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, XI(IX). <https://doi.org/10.51244/ijrsi.2024.1109098>
- Janez, S. (2024). *Thermoplastic Matrix Composites Based on Engineering Polymers and Renewable Fibres*. Montanuniversität Leoben.
- Khotsa, M. D., Mkolo, N. M., Motshudi, M. C., Mphephu, M. M., Makhafola, M. A., & Naidoo, C. M. (2025). A Comprehensive Review of the Biology, Ecological Impacts, and Control Strategies of Eichhornia crassipes. In *Diversity* (Vol. 17, Number 8). <https://doi.org/10.3390/d17080564>
- Kovuru, R., & Schuster, J. (2025). Enhancing Mechanical Properties of Hemp and Sisal Fiber-Reinforced Composites Through Alkali and Fungal Treatments for Sustainable Applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/jmmp9060191>
- Li, F., He, X., Srishti, A., Song, S., Tan, H. T. W., Sweeney, D. J., Ghosh, S., & Wang, C. H. (2021). Water hyacinth for energy and environmental applications: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 327). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124809>
- Nastia, G. I. P., N. E. D., Pratama, Y. A., Habibie, S., Suhendra, N., & Gustiani, S. (2025). From Invasive to Inventive Aquatic Plants: A Review of Water Hyacinth Fibers for Fashion Applications. *Journal Article / Preprint (Zenodo Repository)*, 1–10.
- Nguyen, H. T., & Nguyen, T. B. H. (2022). Treatment of Water Hyacinth Fibers to Improve Mechanical and Microstructural Properties of Green Composite Materials. *Nano Hybrids and Composites*, 35. <https://doi.org/10.4028/p-30xboe>
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 83). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Premnath, K., Arunprasath, K., Sanjeevi, R., Elilvanan, R., & Ramesh, M. (2024). Natural/synthetic fiber reinforced hybrid composites on their mechanical behaviors– a review. *Interactions*, 245(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-024-01924-y>
- Sgriccia, N., Hawley, M. C., & Misra, M. (2008). Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.007>
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Madhavan, A., Alphonsa, J. A., Vivek, N., Gnansounou, E., Castro, E., & Faraco, V. (2017). Water hyacinth a potential source for value addition: An overview. In *Bioresource Technology* (Vol. 230). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.035>
- Sulardjaka, S., Iskandar, N., Nugroho, S., Alamsyah, A., & Prasetya, M. Y. (2022). The characterization of unidirectional and woven water hyacinth fiber reinforced with epoxy resin composites. *Heliyon*, 8(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10484>
- Tahir, D., Karim, M. R., Wu, S., Rehan, M., Tahir, M., Zaigham, S. B., & Riaz, N. (2024). Impact of fiber diameter on mechanical and water absorption properties of short bamboo fiber-reinforced polyester composites. *International Polymer Processing*, 39(3). <https://doi.org/10.1515/ipp-2023-4458>
- Tewelde, S. A., Lemu, H. G., & Dawit, J. B. (2022). Mechanical property characterization of water hyacinth and glass fiber reinforced hybrid composite. *Materials Today: Proceedings*, 62(P12). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.115>
- Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2014). Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 109). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>
- Wembe, B. D., Wiryikfu, N. C., Ntamack, G. E., Kenmeugne, B., Tchotang, T., Rolland, D., & Stanislas, T. T. (2023). Extraction and Physicochemical and Thermomechanical Characterizations of Water Hyacinth Fibers Eichhornia crassipes. *International Journal of Polymer Science*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6652978>
- Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Militz, H., & Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 41, Number 7). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- Yadav, R., Singh, M., Shekhawat, D., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2023). The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 175). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107775>
- Zulkarnain, A., Wibowo, H., Wirawan, W. A., & Dwipayana, A. D. (2024). A REVIEW OF THE ENVIRONMENTAL BENEFITS OF NATURAL FIBER COMPOSITES (NFCs): A STEP TOWARD SUSTAINABLE MANUFACTURING. *Community Practitioner*, 21(7), 584–591. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12704388>