

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

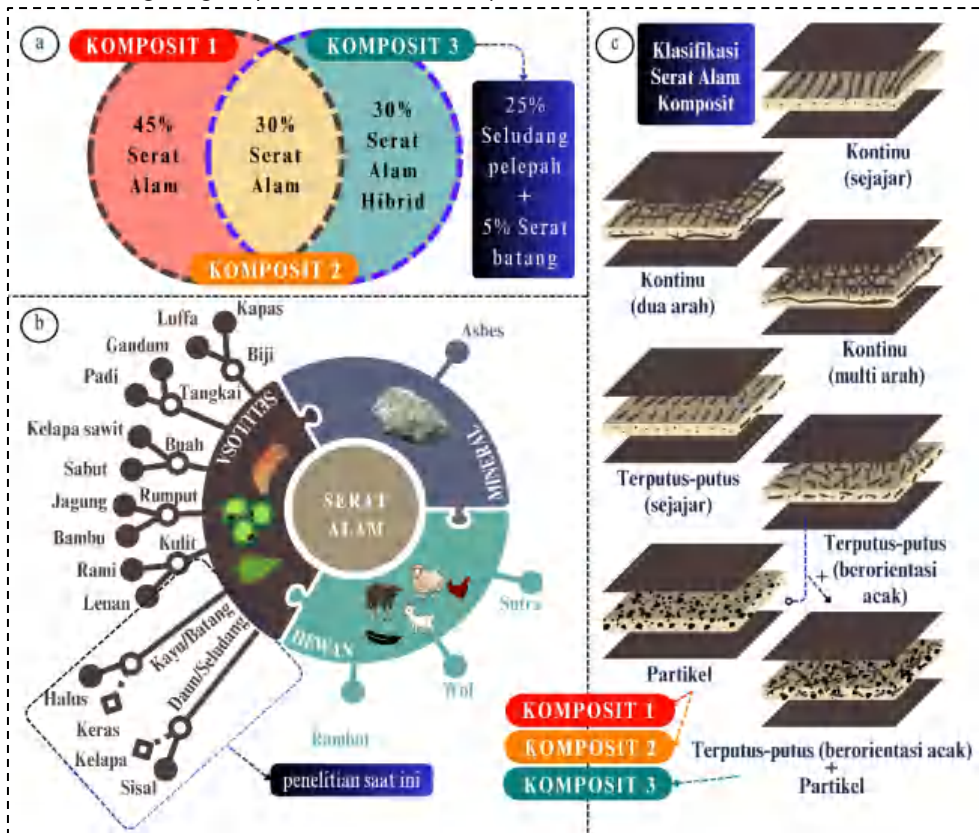
Di era kemajuan teknologi, komposit telah menjadi bahan unggul yang diakui untuk aplikasi di berbagai industri. Penggunaannya telah meningkat secara signifikan selama dua dekade terakhir karena komposit memiliki kekuatan spesifik gabungan dari material penyusunnya (Basavaraju et al., 2024a; Bhat et al., 2023a; Rashid et al., 2024a; Soni et al., 2024a). Terutama yang bahan penyusunnya terdiri dari serat sintetis, seperti serat karbon dan serat kaca, yang masih mendominasi dalam banyak proses manufaktur (Aduwenye et al., 2024a; Al-Furjan et al., 2022a), dan menguasai 62% pangsa pasar (Kwak et al., 2022). Serat sintetis memiliki keunggulan seperti sifat mekanik yang kuat, ketahanan aus yang tinggi, dan bobot yang ringan sebanding dengan material konvensional seperti baja, sehingga aplikasinya bermanfaat dalam hal masa pakai dan efisiensi energi (Elfaleh et al., 2023a; Wasti et al., 2024a). Namun, perlu dicatat bahwa serat sintetis memiliki kekurangan yang serius, termasuk tidak dapat terurai secara hayati, sulit untuk didaur ulang – hanya sekitar 10% yang dapat didaur ulang dan digunakan kembali, sementara sisanya tetap tidak terpakai selama ribuan tahun, kebutuhan energi yang tinggi dan kontribusi yang signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) pada siklus hidup produksi – berkisar antara 45 MJ/kg dan 2,0-3,0 kg CO₂ eq/kg untuk produksi serat kaca, dan berkisar antara 100-900 MJ/kg dan 24 kg CO₂ eq/kg untuk produksi serat karbon (Khayyam et al., 2021; Navaratnam et al., 2023; Zhang et al., 2024). Di balik dominasinya, alih-alih menyelesaikan beberapa masalah, hal ini justru menghadirkan masalah serius lainnya yang lebih mendesak untuk dipertimbangkan di era rencana pembangunan berkelanjutan.

Di sisi lain, hal ini juga menjadi tantangan yang signifikan bagi para perancang dan pengambil keputusan akhir untuk mengidentifikasi material yang dibutuhkan untuk mencapai keberlanjutan dalam industri, seperti yang dinyatakan oleh Faris M. AL-Oqla dalam studinya (AL-Oqla, 2023). Tantangan ini menyoroti pentingnya pengembangan metode yang efektif dalam mengidentifikasi elemen-elemen material untuk mencapai kinerja yang optimal dalam berbagai kegiatan industri (Mahmud et al., 2024; You et al., 2024). Dalam konteks saat ini, ada kebutuhan untuk penelitian yang berfokus pada pengembangan material baru dan mengevaluasi kelayakannya dalam hal kinerja mekanik dan sifat struktural-kimia. Mengidentifikasi sifat material melalui analisis mendalam dengan menggunakan pendekatan berbasis data untuk mengembangkan profil kinerja yang terukur. Studi ini dimaksudkan untuk menjadi referensi bagi para perancang, pengambil keputusan akhir, dan pemangku kepentingan industri, yang menawarkan wawasan tentang kinerja mekanis komposit yang diuji dan mengklarifikasi aling sesuai untuk penggunaan industri, dan mendukung tujuan



at alam (SA) merupakan material strategis yang tepat untuk
tersebut. SA sebagai penguat pada material komposit dapat
olusi transisi energi rendah karbon karena sifatnya yang ramah
daur ulang dengan baik, proses produksi yang rendah energi, dan
Palanisamy et al., 2024; Shadhin et al., 2023; Soni et al., 2024b).

Selain itu, SA menawarkan kekuatan spesifik yang baik dengan rasio kekuatan terhadap berat yang kompetitif, dan bahkan dapat menyebabkan penurunan berat hingga 25% (Wong et al., 2024). Menjadikannya tidak kalah menjanjikan sebagai alternatif yang potensial untuk digunakan, terutama jika kita fokus pada biaya rendah dan ketersediaan yang mudah, karena sumbernya yang melimpah dan dapat diperbaharui (Bekele et al., 2024; M. Li et al., 2020; Wasti et al., 2024b). Oleh karena itu, hal ini menarik banyak perhatian sebagai bahan penguat yang efisien secara ekonomi yang mendukung kelestarian lingkungan (Srisuk et al., 2023a).



Gambar 1. Desain eksperimen dan klasifikasi SA, (a) Pendekatan lingkaran berpotongan dalam desain eksperimen, (b) Klasifikasi SA berdasarkan asal, dan (c) Klasifikasi penyebaran SA dalam matriks (Elfaleh et al., 2023b; Yadav et al., 2025a).

Meskipun SA masih menghadapi tantangan seperti penyerapan air yang tinggi dan sifat mekanik yang kurang optimal, keterbatasan ini dapat diatasi dengan or-faktor seperti rasio aspek, jenis serat, orientasi, dan ikatan antar (Basavaraju et al., 2024b). Pada komposit a merupakan komponen utama yang memberikan kekuatan dan ial (Agumba et al., 2024; L. Ma et al., 2022). Struktur selulosa dari panjang dan kaku membantu meningkatkan sifat mekanik serat tan tarik (KT), kekuatan lentur (KL), dan ketahanan terhadap



deformasi (Mulla et al., 2025; Yadav et al., 2025). Seperti yang dijelaskan dalam tabel oleh T. Khan dkk., seludang pelepah (SP) *Cocos nucifera L.* (CNL) (Malaysia) mengandung 22,25% selulosa, 33,32% lignin, dan 42,01% hemiselulosa. Dengan massa jenis $1,37 \text{ g/cm}^3$, SP CNL (India) mengandung lebih banyak selulosa yaitu 68%, 20,6% lignin, dan 22% hemiselulosa, yang berkontribusi terhadap KT hingga 88,63 MPa (Khan et al., 2024). Dengan kandungan selulosa yang tinggi, serat CNL SP memiliki potensi yang sangat baik sebagai penguat alami pada komposit, sehingga memberikan kekuatan dan daya tahan mekanik yang handal untuk memenuhi kebutuhan berbagai aplikasi industri.

Banyak yang telah melaporkan penggunaan SA dengan fraksi volume dan orientasi serat yang berbeda. Namun, khusus untuk serat CNL, belum ada yang melaporkan hal yang sama seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1(a)** dan **1(b)**, terkait fraksi volume dan orientasi serat yang digunakan. Di sini, kami memperkenalkan penelitian yang menggunakan pendekatan lingkaran berpotongan dalam desain eksperimen untuk meningkatkan kinerja komposit berbasis SA dengan membandingkan fraksi volume 45% dengan 30% serat monolitik dan 30% serat monolitik dengan 30% serat hibrida. Metode karakterisasi material yang digunakan, seperti uji tarik, uji lentur, uji penyerapan air, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier Transform Infrared* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD), akan memberikan data kuantitatif dan kualitatif yang mendalam untuk mengembangkan hirarki kinerja material dan memberikan gambaran umum tentang aplikasi potensial untuk memfasilitasi proses pemilihan material berdasarkan kebutuhan industri yang berorientasi pada keberlanjutan.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Mengembangkan material dari serat CNL sebagai bahan terdispersi penguat komposit polimer untuk optimasi aplikasi berkelanjutan.
2. Menganalisis pengaruh variasi fraksi volume serat alami terhadap kinerja mekanik dan perilaku higroskopis komposit polimer.
3. Mengkaji hubungan antara hasil karakterisasi fisika (morfologi dan kristalinitas) dan kimia (gugus fungsi) terhadap mekanisme kegagalan material berbasis serat alam.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang material komposit berbasis material dengan mengkaji potensi serat SP dan serat batang kelapa (BK) CNL sebagai penguat alami. Kajian ini menambah referensi literatur terkait pengaruh variasi fraksi volume dan orientasi serat terhadap sifat mekanik dan higroskopis komposit. Selain itu, pendekatan karakterisasi multimetode (mekanik, fisika, dan kimia) memperkaya hubungan struktur-fungsi material, serta memperkuat landasan riil terbaru dalam upaya mendukung sains berkelanjutan.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ini dapat dijadikan sebagai acuan teknis bagi para perancang dan praktisi industri dalam memilih dan memodifikasi serat alam komposit ramah lingkungan. Temuan ini juga berguna dalam untuk komposit ringan yang tahan terhadap beban mekanik dan

kelembapan, terutama untuk aplikasi semi struktural dalam sektor otomotif, konstruksi ringan, barang konsumsi yang membutuhkan efisiensi bobot dan durabilitas tinggi.

3. Manfaat Ekonomi dan Lingkungan

Pemanfaatan serat alam dari limbah pertanian seperti seludang pelepah kelapa memberikan nilai tambah ekonomi, khususnya bagi masyarakat lokal di daerah penghasil kelapa, melalui konsep ekonomi sirkular. Selain itu, penggunaan material dapat mengurangi ketergantungan terhadap serat sintetis yang berdampak buruk pada lingkungan, sehingga mendorong transisi industri menuju sistem produksi rendah karbon dan berkelanjutan.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

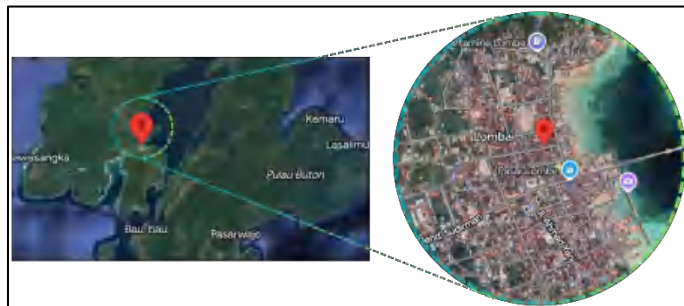
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2024 hingga Mei 2025, di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.2 Bahan dan Alat

2.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

1. Serat seludang pelepah kelapa (*Cocos nucifera L.*)
2. Serat batang kelapa (*Cocos nucifera L.*)
3. Resin Epoksi
4. Pengeras
5. Air suling
6. Natrium hidroksida 5%



Gambar 2. Lokasi pengumpulan serat alami, Lombe, Buton Tengah ($5^{\circ}15'3.3''$ Lintang Selatan dan $112^{\circ}34'34.6''$ Bujur Timur), Sulawesi Tenggara, Indonesia.

2.2.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

1. Wadah perendaman
2. Sarung tangan
3. Tumbukan
4. Pisau pemotong
5. Gunting
6. Oven



14. Cetakan silikon fabrikasi anti lengket 180×180×10 mm
15. Gergaji tangan
16. Kertas amplas kasar grit nomor 60
17. Mistar
18. Spatula
19. Kain kering
20. Desikator
21. UTM (*Universal Testing Machine*)
22. SEM (*Scanning Electron Microscope*)
23. FTIR (*Fourier Transform Infrared*)
24. XRD (*X-Ray Diffraction*)

2.3 Metode Penelitian

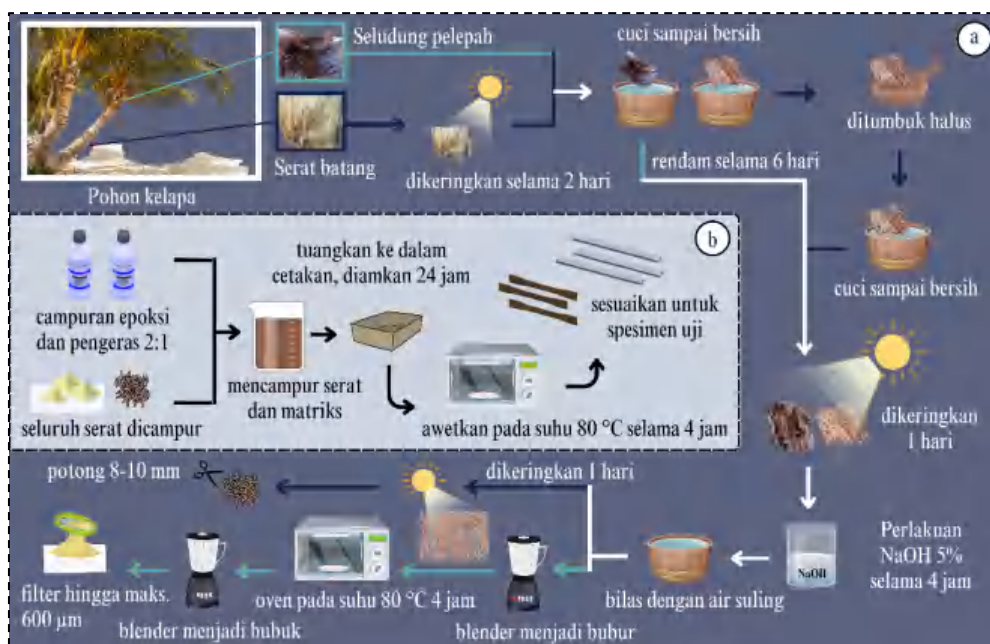
2.3.1 Ekstraksi Serat dan Perlakuan Kimia

Serat CNL SP dan BK pertama-tama dikeluarkan dari pohon. Serat kemudian direndam selama 6 hari. Proses perendaman melembutkan serat dan membuatnya lebih mudah dibersihkan. Pada hari terakhir, serat CNL BK dipukul-pukul dengan balok dan dikikis dengan pisau untuk memudahkan penghilangan komponen lunak yang terlihat seperti gabus di antara serat. Setelah serat diekstraksi, serat dijemur di bawah sinar matahari selama satu hari atau sampai kering sempurna. Setelah kering, serat direndam dalam larutan NaOH dengan konsentrasi 5% selama 4 jam untuk menghilangkan material yang tidak diinginkan seperti lignin, hemiselulosa, pektin, dan material yang larut dalam air (Gashawtena et al., 2024a; Marichelvam et al., 2023a; Mkilima et al., 2024). Serat-serat tersebut dikeluarkan dari larutan dan dibilas berulang kali dengan air suling sampai pH-nya normal. Proses ini juga menghilangkan kandungan NaOH pada serat. Untuk CNL SP, setelah dibilas, di-*blender* dengan air suling untuk membuat serat sedikit halus, kemudian diperas dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 4 jam untuk menghilangkan kadar air. Setelah kering sempurna, serat SP digiling menjadi bubuk dan diayak. Berdasarkan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) E11, ayakan No. 30 mesh digunakan dengan ukuran partikel maksimum 600 µm. Serat BK, setelah dibilas, dijemur secara alami di bawah sinar matahari hingga kering sempurna. Kemudian, serat BK dipotong kecil dengan ukuran 8-10 mm. **Gambar 3(a)** menunjukkan proses ekstraksi dan perlakuan kimiawi serat. Serat diekstraksi dan siap untuk difabrikasi.

Tabel 1. ID komposit dan parameternya yang berbeda

Komposit	Fraksi volume dari bahan komposit yang difabrikasi
Komposit 1	45% SP + 55% Matriks resin epoxy (RE) dan pengeras
	30% SP + 70% Matriks RE dan pengeras
	25% SP + 5% BK + 70% Matriks RE dan pengeras





Gambar 3. Metodologi, (a) mengekstraksi, (b) fabrikasi komposit matriks polimer yang diperkuat serat CNL.

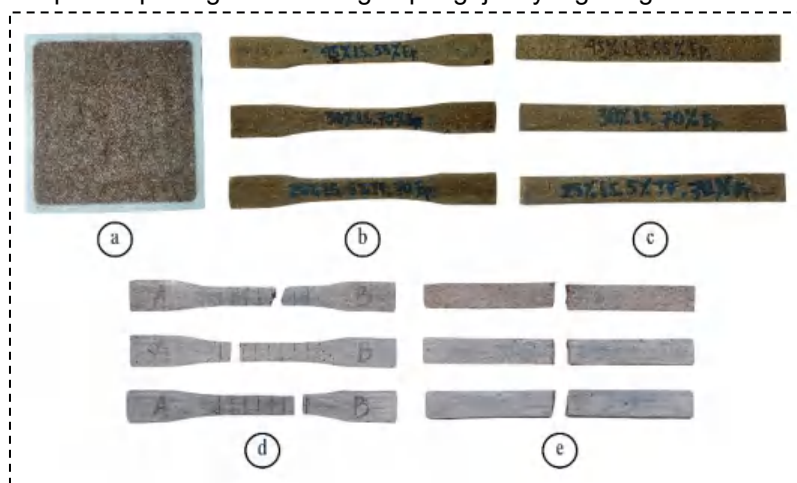
2.3.2 Proses Fabrikasi

Untuk mencapai dimensi panel komposit dan untuk menyesuaikan fraksi volume resin, cetakan dengan luas 180×180 mm disiapkan dari silikon anti lengket dengan kedalaman 10 mm. Proses fabrikasi komposit ditunjukkan pada **Gambar 3(b)**. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh M. Y. M. Zaghloul dkk., ditemukan bahwa fraksi volume 40% tidak direkomendasikan dalam proses fabrikasi; melebihi 40% akan mengurangi kekuatan karena dispersi serat yang buruk dan penyerapan serat yang rendah ke dalam matriks (Mahmoud Zaghloul et al., 2021). Namun, B. N. Sandeep dkk baru-baru ini melakukan percobaan terhadap serbuk kulit jeruk limetta dengan variasi volume 60%, 50%, dan 40%, dimana hasilnya menunjukkan bahwa fraksi 60% lebih unggul (Sandeep et al., 2024). *Trial and error* dilakukan dalam penelitian ini, dan akhirnya, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**, fraksi volume 45% (Komposit 1) dan 30% (Komposit 2 dan 3) digunakan dalam proses fabrikasi. Kemudian, pada **Gambar 11(a)**, implikasi hipotetis dari kinerja mekanis pada efektivitas fraksi volume diterapkan. Fraksi serat 60% dan 50% gagal karena matriks tidak dapat membasahi serat secara menyeluruh. Massa dan densitas setiap material diukur sebelum fabrikasi untuk memfasilitasi pencapaian dimensi panel yang ditentukan. Massa dan densitas masing-



ikan pada **Tabel 2**. Matriks RE dibuat dengan mencampurkan RE 1 perbandingan 2:1, karena fabrikasi dengan RE dan pengeras pada memungkinkan komposit mengering. Fabrikasi dimulai dengan uk SP ke dalam campuran matriks resin hingga tercampur rata. sit 3, serat BK dipotong dengan ukuran 8-10 mm dan digabungkan campuran serbuk SP dan matriks resin seperti pada komposit 1 dan diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanik material komposit

(Basavaraju et al., 2024c; Khalid et al., 2021). **Gambar 1(c)** menunjukkan bentuk dispersi serat. Kemudian, serat tersebut dituangkan ke dalam cetakan hingga mencapai fraksi volume yang tepat seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4(a)**. Setelah dikeringkan selama 24 jam, semua komposit diawetkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 4 jam. Terakhir, komposit dipotong sesuai dengan pengujian yang diinginkan.



Gambar 4. Spesimen komposit, (a) Komposit setelah dicetak, (b) Spesimen uji tarik ASTM D638 Tipe I, (c) Spesimen uji lentur ASTM D790, (d) Fraktur spesimen uji tarik, dan (e) Fraktur spesimen uji lentur.

Tabel 2. Bahan komposit yang digunakan dalam cetakan

Material	Massa jenis (g/cm ³)	Komposit 1 (g)	Komposit 2 (g)	Komposit 3 (g)
RE	1,28	60,82	77,41	77,41
Pengeras	1,09	25,89	32,96	32,96
SP	0,90	52,48	34,99	29,16
BK	1,09	-	-	6,48

2.4 Pengamatan dan Pengukuran

2.4.1 Kinerja Tarik Komposit

Pengujian tarik digunakan untuk menentukan kemampuan komposit dalam menahan beban tarik sebelum mengalami kegagalan. Pengujian ini memberikan informasi penting tentang sifat mekanik material, termasuk kekuatan tarik, modulus Young, dan elongasi saat putus, yang merupakan indikator utama kinerja mekanik komposit. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) model Autograph 5 kN. Bentuk spesimen disesuaikan dengan standar ASTM D638 ditunjukkan pada **Gambar 4(b)** dan diuji pada suhu kamar dengan nit. Kurva tegangan-regangan direkam selama pengujian. **Gambar** ktur spesimen tarik, yang digunakan untuk mengukur panjang akhir , hasilnya akan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh adhesi tribusi komposisi material terhadap kinerja mekanik komposit.



KT (σ_t), regangan (ε_t) dan modulus Young (E_t) komposit dinyatakan dalam persamaan (1-3) sebagai berikut (Shin et al., 2024; Wodag et al., 2025):

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{(L_n - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{F_t L_0}{A_0 (L_n - L_0)} \quad (3)$$

Dengan F_t mewakili beban maksimum, A_0 adalah luas penampang awal komposit sebelum penerapan beban apa pun, L_0 adalah panjang asli komposit, dan L_n adalah panjang komposit setelah deformasi.

2.4.2 Kinerja Lentur Komposit

Pengujian lentur digunakan untuk menilai kemampuan material dalam menahan beban lentur hingga gagal, yang mencerminkan kinerja mekanis material dalam kondisi nyata. Pengujian dilakukan dengan menggunakan UTM yang sama dengan model uji tarik, dengan spesimen yang disesuaikan dengan ASTM D790 seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4(c)**. Spesimen ditempatkan dalam konfigurasi tiga titik lentur dengan laju kompresi 1 mm/menit pada suhu kamar. **Gambar 4(e)** menunjukkan patahan spesimen lentur, yang digunakan untuk mengukur panjang akhir spesimen. Hasil yang diamati meliputi KL, regangan lentur dan modulus lentur. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi kualitas material dalam hal distribusi gaya tekuk dan mendeteksi potensi kegagalan struktural.

Kekuatan lentur (σ_l), regangan (ε_f) dan modulus lentur (E_f) ditentukan dengan menggunakan persamaan (4-6) (Dou et al., 2025; Xu et al., 2025).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6h\Delta S}{L^2} \quad (5)$$

$$E_t = \frac{\Delta FL^3}{4bh^3\Delta S} \quad (6)$$

Dengan F adalah beban maksimum, L adalah panjang rentang spesimen, b dan h masing-masing adalah lebar dan tebal spesimen. ΔF adalah gaya pembebanan, dan ΔS adalah defleksi komposit yang mengalami ΔF .

2.4.3 Karakterisasi Penyerapan Kelembapan

Uji penyerapan air mengukur jumlah air atau kelembapan yang diserap oleh komposit matriks polimer (KMP) yang diperkuat serat alami dalam kondisi lingkungan penyerapan air pada komposit berbasis SA dilakukan menurut ASTM pengujian, sampel dikondisikan dengan cara dikeringkan dalam oven selama satu jam untuk menghilangkan kelembapan awal. Setelah didinginkan pada suhu ruang dalam desikator dan ditimbang untuk awal. Sampel komposit kemudian direndam dalam air suling pada durasi berat dilakukan secara berkala setelah 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 jam perendaman. Setelah setiap periode, sampel dikeluarkan



dari air distilasi dan dikeringkan dengan kain atau tisu bersih sebelum ditimbang. Pengujian dilanjutkan hingga sampel mencapai kondisi di mana tidak ada perubahan berat yang signifikan.

Persentase penyerapan air dihitung dari selisih antara massa sampel sebelum dan sesudah perendaman. Menggunakan rumus yang diberikan (Jeong et al., 2023; Wang et al., 2022):

$$\text{Penyerapan air (\%)} = \frac{(\text{Massa Akhir} - \text{Massa Awal})}{\text{Massa Awal}} \times 100 \quad (7)$$

Data yang diperoleh kemudian dianalisis dan ditampilkan secara grafis, yang menunjukkan hubungan antara waktu perendaman dan kadar air dalam bahan.

2.4.4 Fitur Mikrostruktural dan Konten Rongga

SEM digunakan untuk menganalisis secara kualitatif topologi patahan pada tingkat mikroskopis. Gambar-gambar tersebut juga digunakan untuk menganalisis secara kuantitatif distribusi, frekuensi, ukuran, dan persentase rongga berisiko tinggi (RRT) pada spesimen dan hubungannya dengan faktor kegagalan spesimen. Resolusi untuk karakterisasi topografi adalah sekitar (30-500) μm . SEM Hitachi TM4000 Plus II beroperasi pada tegangan (10-15) kV, jarak kerja (5,7-7,9) mm, dan pembesaran nominal (60-1,80k) *backscattered electron* (BSE) *mode*.

2.4.5 Analisis FTIR Serat-Matriks

Analisis komposisi menggunakan FTIR Prestige-21 Shimadzu untuk mengidentifikasi gugus fungsi spesifik komposit dan efek perlakuan NaOH. Sampel yang telah dihancurkan ditempatkan pada prisma berlian, dan pemindaian FTIR dilakukan pada rentang panjang gelombang 4000 cm^{-1} hingga 500 cm^{-1} .

2.4.6 Pola dan Kristalinitas X-Ray Diffraction (XRD)

XRD Shimadzu 7000, digunakan untuk menentukan kristalinitas komposit. Analisis XRD dilakukan dengan menggunakan difraktometer sinar-X dengan target Cu ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) pada tegangan 40 kV dan arus 30 mA (Yang et al., 2022). Sampel dipindai pada kisaran sudut difraksi 2θ (15° - 70°) dengan kecepatan 2° per menit dan interval $0,02^\circ$. Penggunaan celah divergensi 1° dan celah penerima 0,3 mm memastikan resolusi optimal untuk mendeteksi puncak kristal dan komponen amorf. Indeks kristalinitas dihitung dengan metode Segal menggunakan intensitas berdasarkan persamaan (8) (Segal et al., 1959; Srisuk et al., 2023b).

Indeks kristalinitas (IK) sampel dihitung dengan menggunakan persamaan Segal empiris:

$$IK\% = \left[\frac{(I_{kr} - I_{am})}{I_{kr}} \right] \times 100 \quad (8)$$



indikasikan intensitas maksimum puncak kristal dan I_{am} intensitas daerah amorf.

ng kristal (d -spacing) mengikuti persamaan Bragg (Alomari et al.,

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (9)$$

ke difraksi, dan d adalah jarak antar bidang

2.5 Pelaksanaan Kegiatan

