

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

## Kajian Serbuk Kayu Jati Limbah sebagai Bahan Gear Napotek T.30 pada Mesin Drawing FA 306.A

Andi Purwanto<sup>\*</sup>, Achmad Nurhidayat

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Surakarta, Surakarta, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 30 Desember 2025  
Revisi Akhir: 24 Januari 2026  
Diterbitkan Online: 26 Januari 2026

### KATA KUNCI

*Drawing*  
Jati  
Komposit  
*Napotek*  
*Textile*

### KORESPONDENSI<sup>(\*)</sup>

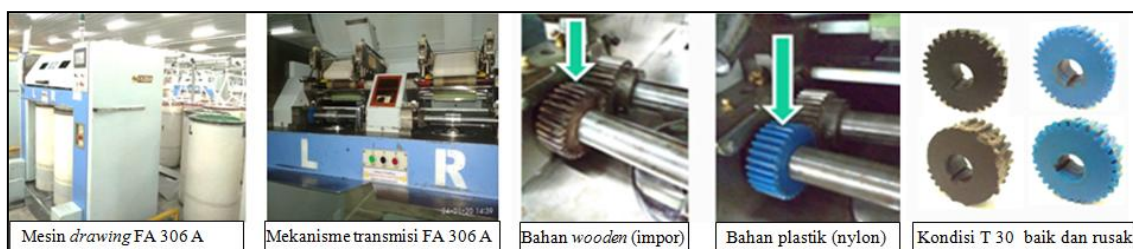
Phone: +62 812-2600-0085  
E-mail: [andipe77@gmail.com](mailto:andipe77@gmail.com)

### A B S T R A K

Operasional mesin *drawing* FA 306.A di industri tekstil memerlukan transmisi daya yang andal pada komponen *gear* Napotek T.30. Material *wood filled synthetic* asli komponen ini dinilai mahal dan getas, sementara pengganti standar berupa *Nylon* memiliki kelemahan pada ketahanan panas gesekan. Kondisi ini mendasari penelitian yang bertujuan mengeksplorasi serbuk kayu jati limbah sebagai bahan baku *gear* komposit yang ekonomis dan ramah lingkungan. Metode eksperimen melibatkan serbuk kayu jati limbah (ukuran *mesh* 80–100, kadar air 4%) yang dicampur dengan resin epoksi dalam rasio 40:60 serta katalis. Karakterisasi sifat mekanik komposit dilakukan melalui uji tarik (ASTM D-638), uji lentur (ASTM D-6272), dan uji impak Izod (ASTM D-5941). Penelitian ini juga mencakup pengujian ketahanan dengan perlakuan termal berulang (25 siklus pada 55 °C). Hasilnya menunjukkan bahwa komposit serbuk kayu jati limbah memiliki kekuatan tarik 51,2 MPa, setara dengan *Nylon* standar. Peningkatan signifikan terlihat pada ketahanan impak yang mencapai 4,12 J/cm<sup>2</sup>. Keunggulan termal juga terbukti, di mana komposit memiliki suhu degradasi awal 153 °C, melebihi *Nylon* standar ( $\pm 120$  °C). Secara keseluruhan, hasil karakterisasi membuktikan bahwa komposit serbuk kayu jati limbah sangat layak sebagai material substitusi berbiaya rendah dan ramah lingkungan untuk *gear* Napotek T.30.

## PENDAHULUAN

Pada industri tekstil khususnya pemintalan benang terdapat mesin *drawing* FA 306.A [1], berfungsi meluruskan dan mensejajarkan serat benang serta meratakan *sliver* yang belum rata. Menurut [2] didalamnya terdapat transmisi daya yaitu *gear napotek* T.30, bahan orisinil *wood filled synthetic material* karakteristik ringan, kuat, getas dan mampu menahan panas. [3] bahan lain dari baja karbon rendah memiliki kekuatan, kekerasan dan getas, bahan orisinil diimpor dan mahal, maka dibuat SNI dari bahan plastik (*nylon*).



Gambar 1. Mekanisme Mesin *drawing* FA 306.A dan *gear napotek* T.30

Sumber: Dokumentasi Peneliti, (2024)

Pengamatan peneliti dilapangan *gear napotek* T.30 berbahan plastik (*nylon*) mempunyai karakteristik kuat, ulet, tetapi tidak mampu menahan panas [4] akibat gesekan antar *gear*, sehingga pemakaiannya lebih boros dibanding orisinilnya. Hal ini dikarenakan mesin *drawing* FA 306.A beroperasi 24 jam penuh dan salah satu penyebab kerusakan pada *gear napotek* T.30 *nylon* kemampuan daya tahan bakarnya rendah [5]. Menurut [6] pemanfaatan limbah penggergajian kayu jati (serbuk) belum optimal padahal mempunyai karakteristik yang baik, yaitu sifatnya kuat, ringan, mampu menahan panas, densitas tinggi [7], mekaniknya memenuhi standar tertentu setelah perlakuan kimiawi [8], mudah didapat serta melimpah [9] dimana rendemen rata-rata penggergajian adalah 45%, sisanya 55% berupa limbah (1,4 juta m<sup>3</sup> per tahun) [10].

Kemampuan mekanik komposit salah satunya dipengaruhi proses *sintering* [11], yaitu pengikatan antara partikel-partikel pada suhu tertentu [12]. Parameter yang digunakan untuk mengendalikan proses *sintering* adalah laju pemanasan, suhu dan waktu [13], [12]. Serbuk kayu jati yang mampu menahan panas [14], [15] maka berpotensi menjadi bahan *gear napotek* T.30 [16]. Berdasar pada permasalahan tersebut, maka perlu integrasi bahan *gear napotek* T.30 pada mesin *drawing* FA 306.A, berbahan komposit serbuk kayu jati limbah.



Gambar 2. Mekanisme produksi kayu jati dari pohon sampai dengan serbuk mesh 80-120

Sumber: Dokumentasi Peneliti, (2024)

Penelitian ini difokuskan pada pengembangan komposit dengan material utama berupa serbuk kayu jati limbah industri penggergajian lokal yang diayak menggunakan ukuran mesh 80-100 serta dikondisikan pada kadar air 4% melalui proses pengovenan (110°C, 45 menit). Sebagai matriks, digunakan resin *epoxy* dengan perbandingan fraksi massa serbuk dan resin sebesar 40:60. Implementasi desain dibatasi pada prototipe Gear Napotek T.30 untuk mesin *Drawing* FA 306.A, yang diproduksi melalui metode cetak tuang (*casting*) dengan waktu *demolding* 8 jam serta perlakuan *post-curing*. Evaluasi kualitas material dipusatkan pada parameter mekanik melalui uji lentur (ASTM D-6272), uji tarik (ASTM D-638), dan uji dampak Izod (ASTM D-5941), yang didukung oleh analisis mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) serta uji makro untuk mengobservasi fenomena patahan dan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dan efektivitas serbuk kayu jati limbah sebagai pengisi (*filler*) pada matriks *epoxy* untuk aplikasi komponen teknik. Secara spesifik, penelitian ini diarahkan untuk menentukan karakteristik mekanik yang mencakup kekuatan tarik, lentur (*bending*), dan dampak dibandingkan dengan material orisinal atau nilon. Selain itu, evaluasi dilakukan terhadap pengaruh perlakuan termal dalam meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan panas pada prototipe *Gear Napotek* T.30. Melalui analisis morfologi menggunakan SEM dan pengamatan makro, kualitas campuran serta fenomena distribusi serbuk pada matriks akan diinvestigasi secara mendalam. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi material alternatif untuk komponen mesin tekstil yang ramah lingkungan, ekonomis, serta mampu mengurangi ketergantungan pada material impor.

## TINJAUAN PUSTAKA

Kebaruan penelitian pada penggunaan serbuk kayu jati limbah yang sifatnya kuat [17], [18] ringan [19], mampu menahan panas [7] densitas tinggi [20] mekaniknya memenuhi standar tertentu [21], [22] sebagai bahan komposit sehingga berpotensi dalam pembuatan *gear napotek* T.30 pada mesin *drawing* FA 306.A. Hal itu merupakan bukti tren semakin berkembangnya teknologi material komposit [23] berbasis biomassa [24], [25], yang menawarkan keunggulan [26], [27] dalam hal keberlanjutan [28] dan pengurangan dampak lingkungan dibandingkan dengan material konvensional seperti logam atau plastik [29], [30]. Metode produksi *gear* tanpa menggunakan mesin press [31] adalah inovasi yang signifikan [32], maka prosesnya lebih lebih efisien, hemat biaya, serta mengurangi konsumsi energi [33].

Pendekatan yang digunakan untuk menguji ketahanan mekanik *gear napotek* T.30 dari serbuk kayu jati dengan uji dampak, uji tarik, uji bending dan uji thermal [34], [35], mencerminkan praktik terbaik pada penelitian material, memberikan data

relevan evaluasi produk beserta karakteristiknya [36], dengan menonjolkan pemanfaatan limbah kayu jati belum optimal penggunaannya [17] menjadi material berharga untuk industri [37]. Menurut Hyuni [38] hal hanya mengurangi limbah tetapi juga menciptakan nilai tambah menjadi material baru, sebagai solusi permasalahan industri spesifik dan lebih luas sektor teknik mesin lainnya, sejalan tren global material yang ramah lingkungan.

## METODOLOGI

### *Waktu dan Tempat Penelitian*

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen destruktif. Variabel bebas penelitian variasi siklus thermal (25 °C, 35 °C, 45 °C, 55 °C, 65 °C) dengan 1 siklus 25X siklus pengulangan dalam 10 menit dan fraksi berat serbuk kayu jati : resin epoxy (40:60). Variabel terikat ketangguhan impact, kekuatan bending, kekuatan tarik dan ketahanan thermal. Variabel kontrol ukuran serbuk kayu jati (diayak menggunakan mesh 80-120) dan kadar air serbuk kayu (4% setelah pengeringan dengan oven). Penelitian dilaksanakan selama 3 bulan Juni-September 2025, di Universitas Surakarta (pembuatan spesimen, uji Tarik, Uji Bending), Universitas Sebelas Maret Surakarta (Uji imoak izot dan Uji thermal).

### *Alat dan Bahan*

Bahan penelitian terdiri serbuk kayu jati *mesh* 80-100 dengan jenis jati Perhutani dengan kandungan *Carbamic acid* (70,7%), *mono ammonium salt* (CAS), *Ammonium carbamate* (70,70%), *Acetic acid* (10,52%), *Acetic acid* (2,35%) dan *Acetic acid* (3,26%), serta *Phenol* (13,17%), *releaser mirror glasewax*, resin epoxy, polyester film/astrolom dibeli dari PT. Justus Kimia Raya, Semarang serta air bersih secukupnya.

Alat penelitian timbangan digital, *mesh* (saringan) 80-100, *waterpass*, cetakan kaca, gelas ukur, pengaduk dan spatula lancip, mistar, jangka sorong, pembeban 10 Kg, kuas, *cutter*, gunting, sendok/*scrap*, kain lap, mesin uji impact izod untuk menguji ketangguhan impact kapasitas 30 kgf, berat pendulum 1,591 kgf, 2,083 kgf, jarak dari pusat berputar *exis* ke pusat gravitasi 11,04 cm, 16,86 cm, jarak dari pusat memutar *exis* ke pusat persepsi 35,7 cm, sudut dalam posisi pendulum yang terangkat 135 DEG dan pertukaran 1,200 SEC, 1201 SEC. serta Mesin UTM (*Universal Testing Machine*) dengan nomer seri 64458 *static rating* ±30 kN dan torsi aksial maksimal 120 Nm.

### *Pembuatan Spesimen Uji*

Serbuk kayu jati diayak (*mesh* 80-120) untuk keseragaman, lalu dikeringkan dalam oven pada 110 °C selama 45 menit guna mengurangi kadar air. Fabrikasi dimulai dengan mencampur serbuk kayu jati dan resin epoksi (rasio 40:60) dengan adukan 100 kali, dilanjutkan penambahan katalis 1% dan diaduk 60 kali. Adonan gear dituang ke cetakan, lalu ditutup rapat menggunakan kaca dan astrolom, serta diberi beban 10 kg di atasnya. Komposit dilepas dari cetakan setelah 6-8 jam dan dirapikan. Selanjutnya diberikan perlakuan *thermal* menggunakan *microwave* pada variasi suhu 25 °C – 65 °C dengan durasi 10 menit per siklus, diulang sebanyak 25 kali.

Karakterisasi komposit meliputi tiga pengujian standar uji bending (ASTM D-6272), menentukan ketahanan terhadap beban lentur dan elastisitas, uji tarik (ASTM D-638), menentukan kekuatan tarik, modulus tarik dan rasio Poisson, uji impact (ASTM D-5941 Izod), mengetahui ketangguhan spesimen terhadap beban kejut. Analisis akhir dengan foto SEM pada area patahan spesimen uji impact untuk mengidentifikasi struktur kerusakannya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

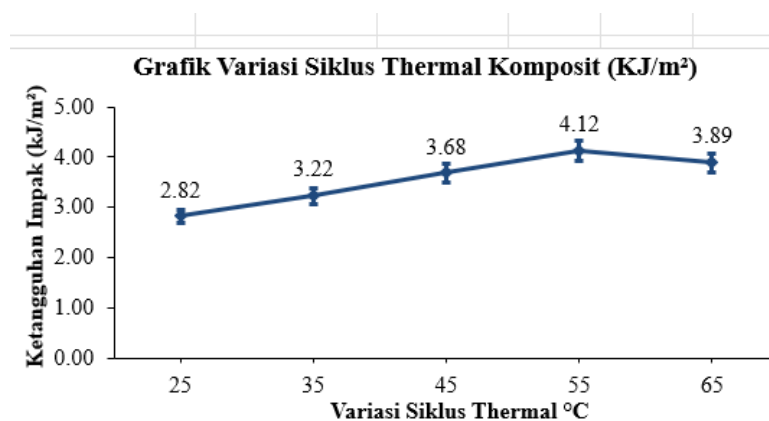
### *Uji Impact (ASTM D-5941 Izod)*

Tabel 1. Data hasil Uji Impact

No	Variasi Suhu Siklus (°C)	Energi Serap (Joule/cm <sup>2</sup> )	Mode Patahan
1.	25	2,82	Brittle
2.	35	3,22	Semi Brittle
3.	45	3,68	Semi Brittle
4.	55	4,12	Ductile
5.	65	3,89	Semi Ductile

Temuan: Daya serap energi tertinggi 4,12 J/cm<sup>2</sup> pada 55 °C. Patahan cenderung *ductile*, menandakan ketangguhan meningkat.

Pada gambar 3. Grafik ketangguhan impak Izod membuktikan ketangguhan komposit serbuk kayu jati–epoksi meningkat seiring kenaikan suhu perlakuan. Pada suhu 25 °C, energi serap tercatat sebesar 2,82 J/cm<sup>2</sup> dengan mode patahan *brittle*. Hal ini menunjukkan bahwa Ikatan serbuk jati dan resin epoksi kurang optimal, membuat material getas dan rendah menyerap energi kejut. Peningkatan suhu menjadi 35 °C menaikkan energi serap menjadi 3,22 J/cm<sup>2</sup> dengan mode *semi brittle*, menandakan perbaikan ikatan termal yang meningkatkan kemampuan material menahan beban kejut. Pada suhu 45 °C, energi serap meningkat lebih tinggi menjadi 3,68 J/cm<sup>2</sup>, terjadi mode patahan semi-ulet, lebih tangguh dari sebelumnya. Proses termal memicu rekayasa ikatan serbuk kayu-resin lebih kuat, meningkatkan ketahanan material komposit terhadap benturan.



Gambar 3. Grafik ketangguhan impak komposit  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025.

Kondisi optimum sifat mekanik komposit dicapai pada suhu 55 °C, menghasilkan energi serap tertinggi 4,12 J/cm<sup>2</sup>). Perlakuan panas ini mengubah mode patahan dari *semi-brittle* menjadi *ductile*, menandakan stabilitas dan homogenitas ikatan antar partikel. Hal ini membuktikan efektivitas pada suhu tersebut memperkuat material mampu menyerap energi lebih besar sebelum patah. Namun, pada suhu 65 °C, energi serap justru menurun menjadi 3,89 J/cm<sup>2</sup> dengan mode patahan *semi ductile*. Degradasi termal epoxy melemahkan ikatan antar partikel, mengurangi penyerapan energi. Suhu tinggi mengakibatkan sifat mekanik material menurun setelah titik optimum. Maka siklus thermal memberikan transformasi pengaruh signifikan terhadap ketangguhan komposit serbuk kayu jati–epoxy.

Sebagaimana hasil penelitian sebelumnya [39], dimana bahwa kekuatan impak komposit serat alami meningkat mekaniknya, akibat adhesi serat-matriks yang optimal, dipengaruhi kadar *filler* dan perlakuan (bergantung jenis serat). Menurut [40] bahwa penambahan serat (optimal) dan mempertahankan thermal, dapat meningkatkan energi impak beberapa kali lipat adhesi dan ketangguhannya. [41] mengatakan bahwa perlakuan panas proporsional meningkatkan sifat mekanik melalui perbaikan *interface*, tetapi perlakuan yang terlalu tinggi menyebabkan degradasi (tergantung komposisinya). Menurut [42] bahwa beberapa formulasi dan konsentrasi pengisi menunjukkan peningkatan nilai ketangguhan izod, sedang optimasi fraksi volume mampu memperbaiki sifat mekaniknya.

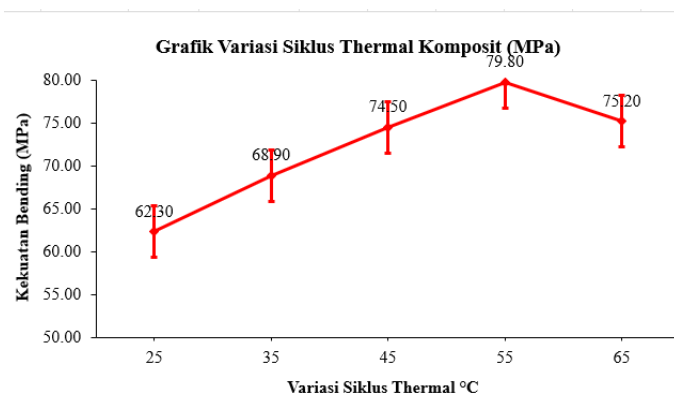
### Uji Bending (ASTM D-6272)

Tabel 2. Data hasil Uji Bending

No	Variasi Suhu Siklus (°C)	Kekuatan Bending Maks (MPa)	Modulus Bending (GPa)	Defleksi Maks (mm)
1.	25	62,3	2,10	2,8
2.	35	68,9	2,26	3,0
3.	45	74,5	2,34	3,2
4.	55	79,8	2,41	3,4
5.	65	75,2	2,35	3,0

Temuan: Modulus bending tertinggi dicapai pada suhu 55 °C, menunjukkan kekuatan lentur optimal.

Hasil pengujian pada gambar 4., Grafik kekuatan bending diperlihatkan adanya peningkatan sifat mekanik hingga suhu optimum 55 °C, kemudian menurun kembali pada suhu 65 °C akibat efek degradasi resin epoxy. Pada suhu 25 °C (kontrol), kekuatan bending sebesar 62,3 MPa dengan modulus bending 2,10 GPa dan defleksi maksimum 2,8 mm. Nilai ini menjadi dasar perbandingan untuk melihat efek perlakuan thermal, yang menunjukkan ikatan antar partikel serbuk kayu jati–epoxy yang terikat tidak optimal.



Gambar 4. Grafik kekuatan bending komposit  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025.

Ketika suhu ditingkatkan 35 °C, kekuatan bending meningkat menjadi 68,9 MPa, modulus bending 2,26 GPa dan defleksi maksimum mencapai 3,0 mm. Peningkatan ini menandakan bahwa perlakuan thermal mulai memperbaiki ikatan antar partikel, sehingga material lebih mampu menahan beban lentur dengan elastisitas yang lebih baik. Pada suhu 45 °C, hasil pengujian terjadi peningkatan lebih lanjut dengan kekuatan bending 74,5 MPa, modulus bending 2,34 GPa dan defleksi maksimum 3,2 mm. Terjadi kuat bahwa perlakuan thermal semakin meningkatkan interaksi matriks resin dengan filler serbuk kayu jati, sehingga struktur komposit menjadi lebih padat dan tahan terhadap gaya lentur.

Puncak performa tercapai pada suhu 55 °C, dengan nilai kekuatan bending tertinggi 79,8 MPa, modulus bending 2,41 GPa dan defleksi maksimum 3,4 mm. Nilai kondisi optimum ini menunjukkan bahwa ikatan antar partikel serbuk kayu jati dengan resin epoxy berada tingkat kestabilan dan homogenitas terbaik. Material mampu menahan gaya lentur lebih besar sekaligus mengalami deformasi elastis yang lebih baik sebelum mengalami patah. Namun, pada suhu 65 °C, terjadi penurunan performa dengan kekuatan bending 75,2 MPa, modulus bending 2,35 GPa dan defleksi maksimum kembali menurun menjadi 3,0 mm. Penurunan ini disebabkan oleh degradasi thermal resin epoxy pada suhu tinggi, sehingga ikatan antar partikel melemah, akibatnya sifat mekanik material menurun kembali.

Secara umum, hasil uji bending menunjukkan pola peningkatan kekuatan, modulus dan defleksi hingga suhu optimum 55 °C, kemudian menurun pada 65 °C. Hal ini konsisten bahwa perlakuan thermal proporsional memperkuat ikatan matriks–filler, sedangkan suhu yang terlalu tinggi justru merusak struktur resin. Hasil ini membuktikan bahwa komposit serbuk kayu jati–epoxy berpotensi mampu menggantikan material konvensional pada aplikasi gear, karena memiliki kombinasi kekuatan tinggi dan kelenturan baik pada kondisi perlakuan optimum.

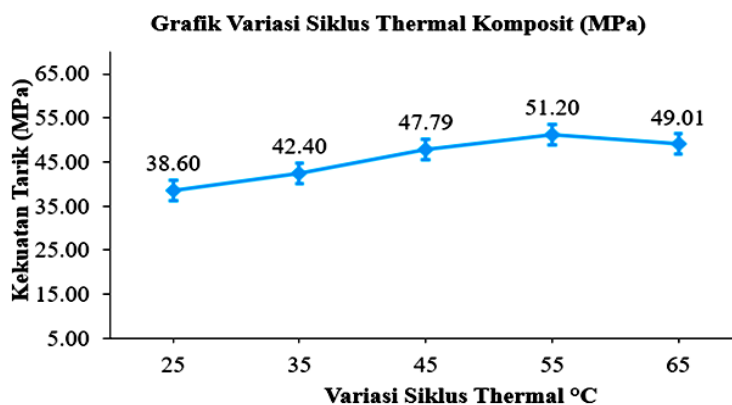
Sebagaimana hasil penelitian sebelumnya misal [16] bahwa kekuatan lentur maksimum tercapai pada fraksi filler 15% dengan nilai ~38,25 MPa dan modulus elastisitas ~0,861 GPa, nilai lebih tinggi (~79,8 MPa, 2,41 GPa) dan menurut [43] kekuatan lentur rata-rata ~50 MPa, modulus ~3,8 GPa dengan perlakuan thermal, menandakan bahwa fraksi filler dan perlakuan siklus panas mampu meningkatkan ikatan matriks–filler. Menurut [44] meningkatkan kekuatan lentur serta modulus hingga 61% karena relaksasi tegangan sisa dan perbaikan ikatan antar lapisan. Perbandingan penelitian relatif sama, dimana perlakuan thermal moderat (55 °C) menghasilkan kekuatan lentur optimum, meskipun bahan yang digunakan berbeda. Penelitian oleh [45] dimana modifikasi panas kayu utuh pada suhu tinggi (167 °C) sedikit meningkatkan kekuatan dan modulus lentur, namun jika suhu terlalu tinggi menyebabkan degradasi. Namun juga ditemukan hasil penelitian [46], dimana kekuatan lentur tertinggi ~48,35 MPa dengan modulus sangat tinggi (67 GPa) pada suhu curing 80 °C dengan perlakuan berbeda.

**Uji Tarik (ASTM D-638)**

Tabel 3. Data hasil Uji Tarik

No	Variasi Suhu Siklus (°C)	Kekuatan Tarik Maks (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Elongasi (%)
1.	25	38,6	1,92	3,1
2.	35	42,4	2,05	3,3
3.	45	47,8	2,23	3,5
4.	55	51,2	2,36	3,6
5.	65	49,1	2,28	3,2

Temuan: Puncak kekuatan tarik terjadi pada suhu 55 °C sebesar 51,2 MPa, mendekati standar bahan gear polimer teknik (nylon T.30 ±50 MPa).



Gambar 5. Grafik kekuatan tarik komposit

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025.

Hasil pengujian pada gambar 5. Grafik kekuatan tarik, menunjukkan pola peningkatan sifat mekanik hingga titik optimum, lalu terjadi penurunan akibat efek degradasi resin epoxy. Pada kondisi awal 25 °C (kontrol), kekuatan tarik sebesar 38,6 MPa, modulus elastisitas 1,92 GPa dan elongasi 3,1%. Nilai ini mencerminkan ikatan antar partikel serbuk kayu jati–epoxy kurang homogen, sehingga kemampuan material menahan gaya tarik masih terbatas.

Ketika suhu meningkat 35 °C, kekuatan tarik naik menjadi 42,4 MPa, modulus elastisitas 2,05 GPa, dan elongasi mencapai 3,3%. Hal ini menandakan bahwa perlakuan thermal membantu memperbaiki ikatan antar partikel filler dengan resin, sehingga material lebih kaku dan lebih mampu menahan gaya tarik. Pada suhu 45 °C, nilai kekuatan tarik semakin meningkat menjadi 47,8 MPa, modulus elastisitas 2,23 GPa dan elongasi 3,5%. Kondisi ini menunjukkan terbentuknya ikatan matriks–filler yang semakin kuat, merata dan tetap mempertahankan kelenturannya melalui peningkatan elongasi.

Puncak performa diperoleh pada suhu 55 °C, dengan kekuatan tarik maksimum 51,2 MPa, modulus elastisitas 2,36 GPa dan elongasi tertinggi 3,6%. Kondisi ini merupakan titik optimum, di mana ikatan antar partikel serbuk kayu jati dengan resin epoxy berada dalam keadaan paling stabil dan homogen. Material memiliki kombinasi terbaik antara kekuatan, kekakuan dan kemampuan deformasi, sehingga berdampak kekutan mekaniknya optimal. Namun, pada suhu 65 °C, performa mulai menurun, kekuatan tarik menjadi 49,1 MPa, modulus elastisitas 2,28 GPa dan elongasi 3,2%. Penurunan ini disebabkan oleh terjadinya degradasi termal resin epoxy, yang melemahkan interaksi dengan partikel kayu jati. Maka disimpulkan perlakuan thermal berpengaruh signifikan terhadap sifat tarik komposit serbuk kayu jati–epoxy. Secara umum, komposit ini memiliki potensi kuat sebagai material alternatif pengganti nylon pada gear, karena menggabungkan kekuatan tarik tinggi dengan elongasi yang cukup baik, sehingga tidak mudah rapuh saat menahan beban dinamis.

Sebagaimana penelitian terdahulu, [47] bahwa kekuatan tarik maksimum tercapai 42,5 MPa pada fraksi serat 30%, elongasi 2,5%. Peningkatan serat berlebih menurunkan sifat tarik karena distribusi tidak homogen. Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan kekuatan tarik sebanding (51,2 MPa optimum), tetapi elongasi lebih tinggi (3,6%). Hal ini menandakan bahwa serbuk kayu jati memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan lebih baik dibanding serat tebu. Menurut [8], dimana kekuatan tarik rata-rata 45,6 MPa, modulus 2,05 GPa. Suhu curing optimum 50 °C meningkatkan ikatan matriks–filler. Perbandingan dengan penelitian tersebut sangat mirip, di mana perlakuan thermal proporsional ( $\approx 55$  °C) memberikan kekuatan tarik tertinggi (51,2 MPa, modulus 2,36 GPa). Penelitian [48] dimana kekuatan tarik meningkat 18% setelah perlakuan thermal 60 °C, namun menurun drastis di atas 80 °C. Elongasi tetap rendah (<2%). Perbandingan

dengan penelitian ini sama-sama menunjukkan peningkatan *tensile strength* pada suhu sedang dan penurunan pada suhu tinggi. Bedanya, material kami masih menunjukkan elongasi cukup baik (3,6%) sehingga lebih tahan terhadap deformasi. Menurut [48] dimana kekuatan tarik meningkat hingga 49,5 MPa pada ukuran partikel halus (100 mesh), dengan modulus 2,22 GPa. Elongasi lebih tinggi dibanding partikel kasar. Perbandingan sangat dekat dengan hasil penelitian ini (optimum 51,2 MPa, 2,36 GPa). Kedua penelitian menegaskan bahwa dispersi filler halus ditambah perlakuan thermal mampu meningkatkan *tensile strength* secara signifikan.

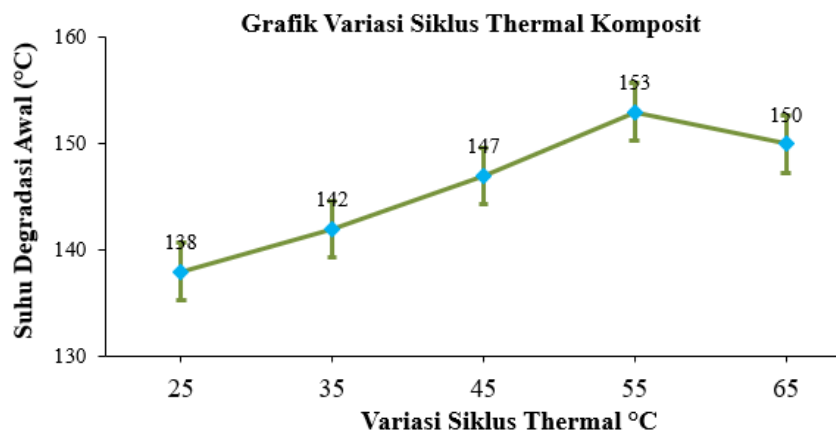
#### Uji Ketahanan Thermal (ASTM D-638)

Pengujian siklus termal gambar 6., Grafik suhu terdegradasi dan gambar 7., Grafik waktu retak, untuk mengetahui pengaruh perlakuan suhu terhadap stabilitas thermal (suhu degradasi awal) dan ketahanan retak material komposit serbuk kayu jati–epoksi selama 24 jam.

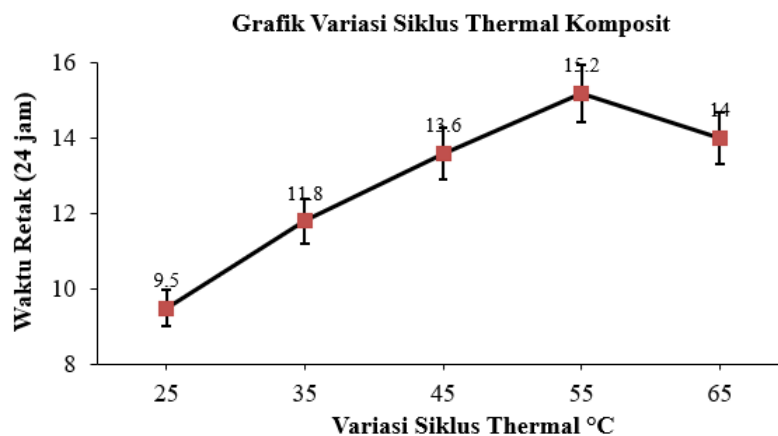
Tabel 4. Data hasil Uji Suhu Degradasi Awal (°C) dan Waktu Retak (24 jam)

No	Variasi Suhu Siklus (°C)	Suhu Degradasi Awal (°C)	Waktu Retak (24 jam)
1.	25	138	9,5
2.	35	142	11,8
3.	45	147	13,6
4.	55	153	15,2
5.	65	150	14

Temuan: Ketahanan panas tertinggi pada suhu sintering 55 °C, dengan degradasi baru terjadi di atas 150 °C.



Gambar 6. Grafik suhu terdegradasi awal  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025.



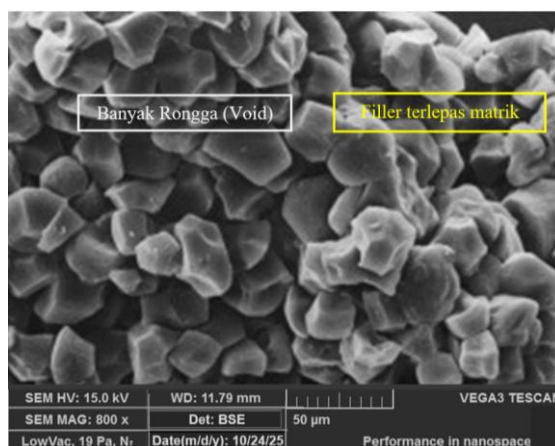
Gambar 7. Grafik waktu retak  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025.

Pada kondisi kontrol 25 °C (tanpa perlakuan), material mencatatkan suhu degradasi awal 138 °C dan waktu retak 9,5 jam. Nilai tersebut menunjukkan adanya keterbatasan stabilitas panas dan durabilitas mekanik akibat ikatan matriks–*filler* yang relatif lemah. Peningkatan suhu perlakuan ke 35 °C dan 45 °C secara berturut-turut memperbaiki kinerja secara signifikan. Pada 45 °C, suhu degradasi awal mencapai 147 °C dan waktu retak 13,6 jam, menandakan penguatan struktur internal.

Kondisi optimum tercapai pada suhu perlakuan 55 °C. Di titik ini, stabilitas material paling tinggi, dibuktikan dengan suhu degradasi awal tertinggi, yaitu 153 °C, dan ketahanan retak terlama mencapai 15,2 jam. Hasil ini mengindikasikan homogenisasi ikatan matriks–*filler* yang optimal, menghasilkan kombinasi resistensi panas dan durabilitas terbaik. Namun, peningkatan suhu perlakuan ke (65 °C) menunjukkan adanya penurunan kinerja, dengan suhu degradasi awal turun menjadi 150 °C dan waktu retak menjadi 14 jam. Penurunan ini diakibatkan oleh degradasi thermal parsial pada resin epoksi, yang melemahkan ikatan antar partikel.

Kesimpulannya, perlakuan siklus termal efektif meningkatkan stabilitas panas dan ketahanan retak komposit, kondisi optimal pada 55 °C dengan suhu degradasi awal 153 °C dan waktu retak 15,2 jam. Meskipun terjadi penurunan pada 65 °C, performa komposit secara keseluruhan (suhu degradasi > 150°C) menunjukkan resistensi panas yang jauh lebih baik dibandingkan material standar seperti *Nylon* ( $\pm 120$  °C). Durabilitas ini dinilai memadai untuk aplikasi industri beban ringan yang beroperasi 24 jam, seperti *gear* pada mesin *drawing* FA 306 A.

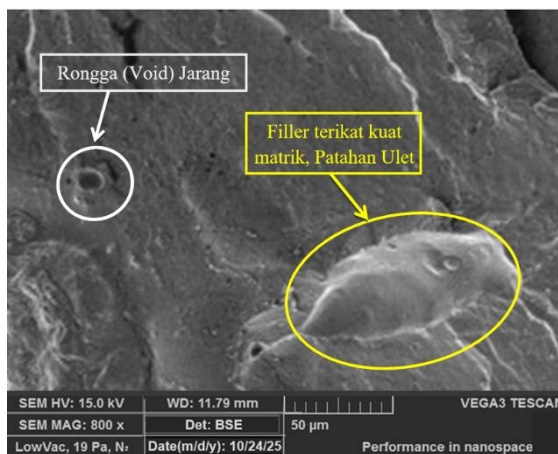
### Analisa Foto SEM



Gambar 8. Foto SEM pada kondisi 25 °C (kontrol), perbesaran 800 x  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025

Foto SEM digunakan untuk mengamati struktur penampang patahan ketangguhan impact spesimen perlakuan siklus thermal. Analisis SEM pada permukaan patah spesimen uji impact komposit serbuk kayu jati limbah pada suhu kontrol 25 °C sebagaimana pada gambar 8., menunjukkan morfologi tidak optimal. Terlihat celah (*voids*) dan tarikan antarmuka (*interfacial debonding*) signifikan antara serbuk dan matriks. Kondisi ini mengindikasikan ikatan *matriks–filler* yang lemah, secara langsung memengaruhi stabilitas termal, durabilitas, dan menghasilkan nilai ketangguhan impact yang rendah.

Fenomena ini konsisten dengan penelitian [49], ketiadaan perlakuan thermal atau agen kopling pada komposit limbah kayu sering sebabkan *voids*, memicu kegagalan mekanik dan degradasi termal. Modifikasi filler/perlakuan thermal diperlukan untuk meningkatkan kompatibilitas dan stabilitas guna durabilitas.



Gambar 9. Foto SEM pada kondisi optimum 55 °C, perbesaran 800 x  
Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2025

Analisis permukaan patah uji impak Foto SEM pada gambar 9., komposit serbuk kayu jati limbah menunjukkan bahwa suhu fabrikasi 55 °C menghasilkan kondisi optimal. Pada suhu ini, morfologi permukaan terlihat paling homogen dan stabil, dengan suhu degradasi awal tertinggi 153 °C dan waktu retak terlama (15,2 jam). Kondisi ini memfasilitasi ikatan antarmuka matriks–filler yang superior, di mana partikel serbuk kayu jati terdistribusi merata, meminimalkan pori-pori dan aglomerasi. Secara visual, rongga atau pori-pori sangat sedikit, bahkan hampir tidak terlihat. Struktur yang rata dan permukaan patah yang ulet menguatkan kesimpulan bahwa komposisi *filler* dan *matriks* homogen, mengindikasikan kekuatan mekanik yang tinggi.

Secara mikroskopis, ikatan yang kuat ini memungkinkan material memiliki kombinasi terbaik antara resistensi panas dan ketahanan terhadap retak. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh [50], yang menyebutkan bahwa peningkatan homogenitas dispersi *filler* limbah dapat secara signifikan menunda inisiasi retak. Oleh karena itu, suhu 55 °C adalah titik krusial struktur komposit memiliki stabilitas termal dan ketahanan mekanik optimal untuk aplikasi pada bahan gear Mesin *Drawing* FA 306.A.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### **Kesimpulan**

perlakuan termal berulang (25 siklus) pada rentang suhu 25–65 °C berpengaruh signifikan terhadap performa mekanik komposit serbuk kayu jati–resin *epoxy*, dengan suhu 55 °C sebagai titik optimum. Pada kondisi tersebut, komposit menghasilkan kekuatan tarik sebesar 51,2 MPa yang setara dengan standar nilon industri, kekuatan bending 79,8 MPa, serta peningkatan ketangguhan impak menjadi 4,12 J/cm<sup>2</sup> dengan karakteristik patahan ulet (*ductile*). Selain itu, material ini menunjukkan ketahanan termal yang lebih unggul dengan suhu degradasi awal mencapai 153 °C, melampaui kemampuan nilon konvensional sehingga sangat ideal untuk operasional mesin FA 306.A yang berkelanjutan. Secara keseluruhan, pemanfaatan limbah serbuk kayu jati sebagai bahan komposit tidak hanya memberikan solusi material fungsional yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk menggantikan material impor, tetapi juga mendukung kemandirian bahan baku di sektor industri manufaktur.

### **Saran**

Penulis memberikan saran kepada peneliti selanjutnya untuk menguji gear komposit serbuk kayu jati limbah dengan menambahkan terlebih dahulu perlakuan siklus thermal.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan rasa terima kasih kepada DIKTISAINTEK yang telah mendanai dan semua pihak yang membantu hingga terselesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Pujianto dan D. Dharma, "Penentuan Setelan Rotor Mesin Open End Untuk Pembuatan Benang Ne 6 sebagai Upaya Jaminan Atas spesifikasi dan Kualitas Pada Workshop Pemintalan di Ak-Tekstil Solo," *Indones. J. Lab.*, vol. 4, no. 2, hal. 46, 2021.
- [2] Y. C. Dafang Huang, Jie Li, Suiyi Li, Jianbing Hu, Zhiru Cao, Yang Guo, Yu Ding, Mingwei Zhu, "Self-Densified Super-Strong Wood," *J. Bioresour. Bioprod.*, no. xxxx, hal. 1–10, 2025.
- [3] A. F. R. Andi Purwanto, Wijoyo, "Pengaruh Polaritas Mesin Las pada Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Baja Karbon Rendah," *J. Tek. Indones.*, vol. 2, no. 4, hal. 150–158, 2023.
- [4] A. F. Al-Shawabkeh, "Thermodynamic characteristics of the aliphatic polyamide crystal structures: Enhancement of nylon 66 $\alpha$ , 610 $\alpha$  and 77 $\gamma$  polymers," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, hal. e21042, 2023.
- [5] O. Das Rhoda Afriyie Mensah a,\*, Vigneshwaran Shanmugam b, Sreenivasan Narayanan c, Juliana Sally Renner d, Karthik Babu e, Rasoul Esmacely Neisiany f, Michael F<sup>o</sup>rsth a, Gabriel Sas a, "A review of sustainable and environment-friendly flame retardants used in plastics," *Polym. Test.*, vol. 108, 2022.
- [6] M. E. H. Kishan Nandi Shoudho a, Tausif Hasan Khan a, Ummay Rifat Ara a, Moshiur Rahman Khan b, Zayed Bin Zakir Shawon c, "Current Research in Green and Sustainable Chemistry Biochar in global carbon cycle : Towards sustainable development goals," *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 8, no. March, hal. 100409, 2024.
- [7] P. D. A. d Ubong Williams Robert a, Sunday Edet Etuk b, Okechukwu Ebuka Agbasi c, \*, "Development of lightweight sawdust-based composite panels for building purposes," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 7, no. 5, hal. 631–640, 2024.
- [8] M. I. K. Reza Putra1\*, Muhammad1, T. Hafli2, Nurul Islami1, Muhammad Nugraha P2, "Analysis of the Mechanical Properties of Teak Sawdust-Reinforced Composite Boards Affected by the Alkalization Process," *Int. J. Eng. Sci. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 4, hal. 11–18, 2022.
- [9] S. E. Sirisyos Kijmongkolvanich , Somchai Sevisat, "Properties of 12-Year Low Thinning Teak Wood for Furniture Production of Communities in Thailand," *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, vol. 18, no. 2, hal. 301–312, 2023.
- [10] Y. M. Ade Sandra Dewi, Deviana Sari, Niar Azria, Ani Pujiati, "Penyuluhan Tentang Pengolahan Limbah Serbuk Gergaji Menjadi Pupuk Kompos dan Media Tanam di Desa Sumber Rejo, Kemiling," *Devot. J. Corner Community Serv.*, vol. 1, no. 4, hal. 193–203, 2023.
- [11] S. S. Adeola Oketola, Tamba Jamiru , Adesola Taoreed Adegbola, Olugbenga Ogunbiyi, Rotimi Sadiku, "Influence of sintering temperature on the microstructure, mechanical and tribological properties of ZrO<sub>2</sub> reinforced spark plasma sintered Ni–Cr," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 5, no. 2, hal. 188–196, 2022.
- [12] P. A. O. C. Bukola Joseph Babalola, Olusoji Oluremi Ayodele, "Sintering of nanocrystalline materials: Sintering parameters," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, hal. e14070, 2023.
- [13] M. D. a Mirele Horsth Paiva Teixeira a, d,\*, Vasyi Skorych a, Rolf Janssen b, Sergio Yesid G<sup>o</sup>mez Gonz<sup>o</sup>alez c, Agenor De Noni Jr c, Jo<sup>o</sup>ao Batista Rodrigues Neto d, Dachamir Hotza c, d, "High heating rate sintering and microstructural evolution assessment using the discrete element method," *Open Ceram.*, vol. 8, no. August, 2021.
- [14] P. S. b Martha Rianna a,\*, Regina Aperita Lusiana Harahap a, Putri Cahaya Situmorang d, Timbangan Sembiring a, Timbang Pangaribuan f, Muhammad Khalid Hussain c, e, Eko Arief Setiadi b, Anggito P. Tetuko b, "Making of Belanda Teak wood powder with bentonite as ceramic material," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 7, no. February, hal. 282–286, 2024.
- [15] A. M. Ilmah dan J. , Tristiandinda Permata, "Analisis Konduktivitas Panas Pada Material Alternatif Sebagai Insulasi Dinding Ruang Akomodasi Kapal Berbasis Limbah Ampas Tebu Dan Serbuk Kayu," *J. Online Phys.*, vol. 5, no. 2, hal. 17–21, 2020.
- [16] M. P. B. H. A, P. S. , Sandeepkumar Gowdaa, Ramesh Sb , Nagaraja T Kc , Zaheerabbas B Kandagala, Prashanth Pai Md, Divijesh Puninchathaya Pe, dan and G. A. G, "Effect of Teak Wood Dust as Filler Material on Mechanical Properties of Abaca-Pineapple-Epoxy Hybrid Composite," *J. Nat. Fibers*, vol. 21, no. 1, hal. 1–19, 2024.
- [17] T. C. Ronnachart Munsin a, c,\*, Jakkarin Udtasri a, Subongkoj Topaiboul b, Pichet Kowtakul b, Pracha Yeunyongkul c, Nawee Nuntapap c, Parkpoom Jarupoom d, Manop Rakyat e, Yossapong Laonual f, Prathan Srichai g, Nuttapong Ruttanadech h, "A study on binderless co-pelletization of industrial rice-powder wastes and teak sawdust at low and elevated temperatures," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 6, no. July, hal. 100250, 2022.
- [18] M. Muslimin, Eding Iskak Imananto dan Jurusan, "Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu Jati Sebagai Material Pengisi Pada Campuran Asphalt Treated Base (Atb) Ditinjau Dari Uji Marshall," *Sondir*, vol. 6, no. 1, hal. 38–45, 2022.
- [19] M. A. A. Mohamad Firdaus Mohamad Yusop, Azrina Aziz, "Conversion of teak wood waste into microwave-irradiated activated carbon for cationic methylene blue dye removal: Optimization and batch studies," *Arab. J. Chem.*, vol. 15, no. 9, hal. 104081, 2022.
- [20] G. B. S. Wijaya, C. I. Putri, K. Kusuma Kencanawati, dan Astawa, "Pengaruh Variasi Volume Pada Bioplastik Sari Pati Kentang Berpenguat Serbuk Kayu Jati Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro," vol. 13, no. 2, hal. 155–160, 2023.
- [21] M. J. k Mohammed Mohammed a, b,\*, Anwar Ja'afar Mohamad Jawad c, Aeshah M. Mohammed d, Jawad K. Olewi e, Tijjani Adam f, Azlin F. Osman a, b, Omar S. Dahham g, h, Bashir O. Betar i, Subash C.B. Gopinath b, j,

- “Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites,” *Polym. Test.*, vol. 124, no. June, hal. 108083, 2023.
- [22] V. S. Ayub Ali, Rumana Hossain, Heriyanto, “Valorisation of plastic and wood waste through the incorporation in basalt fibre reinforced polymeric composites: A critical review Ayub,” *Process Saf. Environ. Prot.*, hal. 107016, 2025.
- [23] Muhammad Fairuz Baad dan H. , Deny Andesta, “Analysis of Quality Improvement of Wood Powder Raw Materials at CV. NKM Using FMEA and FTA Methods,” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, hal. 186–195, 2024.
- [24] S. K. Shuvodeep De , Breanna James , Jesse Ji , Sanjita Wasti , Shuyang Zhang, a b c d e F, A. J. R. Halil Tekinalp , Yan Li , Esteban E. Ureña-Benavides , Uday Vaidya, g h b d g e i J, S. O. g Erin Webb, dan X. Z. c C, “Advances in Bioenergy Chapter Three - Biomass-derived Composites for Various Applications,” vol. 8, hal. 1–10, 2023.
- [25] L. D. A, D. M. b , Anna Fornaseri a, Martina Grassi a, R. S. c Marco Sangermano b, dan E. C. A, “Valorisation of freshwater weeds biomass to produce bio-based composites through do-it-yourself approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 503, no. March, hal. 145369, 2025.
- [26] V. T. M. Idehai O. Ohijeagbona, Adekunle A. Adeleke a, c,\* dan P. P. I. John A. Olorunmaiyea, Imhade P. Okokpujeb, “Development and characterization of wood-polypropylene plastic-cement composite board,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, hal. e00365, 2020.
- [27] O. S. B. c Kayode Adesina Adegoke a,\* , Oreoluwa Ololade Adesina b, 1, Omolabake Abiodun Okon-Akan c, d, e, 1, Oyeladun Rhoda Adegoke c, 1, Abdullahi Biodun Olabintan f, 1, Oluwaseyi Aderemi Ajala g, h, 1, Halimat Olagoke c, 1, Nobanathi Wendy Maxakato a,\*\*, “Sawdust-biomass based materials for sequestration of organic and inorganic pollutants and potential for engineering applications,” *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 5, no. November 2021, hal. 100274, 2022.
- [28] U. S. \* Madhurima Das, “3D carbon based phase change composites: A review on progress in fabrication strategies, thermal energy storage-conversion efficacy, prototypes, numerical models and applications,” *J. Energy Storage*, vol. 98, no. PA, hal. 113029, 2024.
- [29] M. M. Malik Hassan a, b, Amar K. Mohanty a, b, “3D printing in upcycling plastic and biomass waste to sustainable polymer blends and composites: A review,” *Mater. Des.*, vol. 237, no. December 2023, hal. 112558, 2024.
- [30] M. A. Jasleen Kaur a, Jonty Kathuria a, J. Nagendra Babu b, “Waste plastic bottles an alternate material for synthesis of metal organic frameworks (MOFs) with potential applications,” *Next Sustain.*, vol. 5, no. November 2023, hal. 100068, 2025.
- [31] J. V. L. Amir Toghyani\*, Sami Matthews, “Effect of dwell time and press speed on the forming quality of the press formed wood plastic composite product,” *Procedia CIRP*, vol. 81, no. March, hal. 524–528, 2019.
- [32] et. al. Islam, Nazim, “Encouraging circular economy and sustainable environmental practices by addressing waste management and biomass energy production,” *Reg. Sustain.*, vol. 5, no. 4, hal. 100174, 2024.
- [33] T. K. a Marcello Nussbaumer a, Daniel Van Opendenbosch b, Max Engelhardt c, Heiko Briesen d, J. Philipp Benz a, “Material characterization of pressed and unpressed wood–mycelium composites derived from two *Trametes* species,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 30, hal. 103063, 2023.
- [34] X. Y. Yongjun Meng a, b, c, d,\* , Dichao Liu a, Hongliu Rong a, “Review and prospect of four-point bending fatigue test of asphalt mixture,” *J. Road Eng.*, vol. 4, no. 4, hal. 446–467, 2024.
- [35] M. S. F. d Farah Samsi Prome a, Md Foissal Hossain b, Muhammed Sohel Rana c, Md Mafidul Islam a, “Different chemical treatments of natural fiber composites and their impact on water absorption behavior and mechanical strength,” *Hybrid Adv.*, vol. 8, no. December 2024, hal. 100379, 2025.
- [36] J. B. b Mahdi Bodaghi a dan C. B. b , Kaveh Rahmani a, Mohammadreza Lalegani Dezaki a, “3D/4D printed bio-composites reinforced by bamboo charcoal and continuous flax fibres for superior mechanical strength, flame retardancy and recoverability,” *Polym. Test.*, vol. 143, no. November 2024, hal. 108709, 2025.
- [37] H. J. H. B. D. F. Berger, F. Gauvin †, “The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, hal. 119786, 2020.
- [38] D. X. O. Hyuni Jung a, 1, Giyoung Shin a, 1, Hojung Kwak a, 1, Lam Tan Hao a, b, Jonggeon Jegal a, Hyo Jeong Kim a, Hyeonyeol Jeon a, b,\*\*, Jeyoung Park a, c,\*\*\*, “Review of polymer technologies for improving the recycling and upcycling efficiency of plastic waste,” *Chemosphere*, vol. 320, no. November 2022, hal. 138089, 2023.
- [39] S. A. A. D. Abdu Mohammed Seid \*, “Review on the impact behavior of natural fiber epoxy based composites,” *Heliyon*, vol. 10, no. 20, hal. e39116, 2024.
- [40] and S. N. M. 1 Raphael H. M. Reis 1, Fabio C. Garcia Filho 2, “Impact resistance of epoxy composites reinforced with amazon guaruman fiber: A brief report,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 14, hal. 1–10, 2021.
- [41] 2 Zhenbo Lan 1, 2, Jiangang Deng 1, 2, Zhuolin Xu 1, 2,\* , Zhu Ye 1, 2 and Yu Nie 1, “Study of Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced with Fiber Glass,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 12, 2023.
- [42] A. T. S. 1, M. T. C. 1 , Lucas de Mendonça Neuba 1, Raí Felipe Pereira Junio 1, V. S. C. 2, A. B.-H. da S. F. 1, L. F. C. N. 1 and A. C. R. da S. 2 , Sergio Neves Monteiro 1, dan 1, “Ballistic Properties and Izod Impact Resistance of Novel Epoxy Composites Reinforced with Caranan Fiber (*Mauritiella armata*),” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2022.
- [43] S. S. · S. S. S. · H. K. Sachidananda2 dan Received:, “Design and characterization of natural fiber reinforced cotton-epoxy composites,” *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 12, 2024.
- [44] J. A. M. F. Sara Valvez a, Paulo N.B. Reis b,\* , “Effect of annealing treatment on mechanical properties of 3D-

- Printed composites,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 23, hal. 2101–2115, 2023.
- [45] M. S. T. Nakagawaa, E. Poulinb, T. Rueppelc, Z. Chena, J. Swineac, M. O’Brienb, G. Houserb, G. Woodb, M. Weinheimere P. Bahmanid, P. Stynoskic, “Effects of thermal modification on the flexure properties, fracture energy, and hardness of western hemlock,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 58, no. 1, hal. 109–133, 2024.
- [46] F. P. Rizky Saputra1, Abdul Muhyi1, Eko Pujiyulianto1, Muhamad Fatikul Arif2, “the Effect of Variations in Curing Temperature of Carbon Fiber/Pvc Foam Board Sandwich Composites on Bending Test Failure Analysis,” *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 24, no. 1, hal. 28–34, 2024.
- [47] A. Siregar, “Pemanfaatan Serat Alami (Sabut Kelapa) Sebagai Alternatif Bahan Komposit Pada Spakbor Depan Motor,” hal. 1–51, 2021.
- [48] X. S. and L. W. \* C. Xue Wang , Lulu Chang, “Effect of hot-alkali treatment on the structure composition of jute fabrics and mechanical properties of laminated composites,” *Materials (Basel)*., vol. 12, no. 9, 2019.
- [49] D. Motoc, “Thermal degradation and stability of wood particle composites deployed as decorative components,” vol. 01016, 2018.
- [50] Abbasi-soureshjani, “Results in Engineering A mechanistic analysis of the crack initiation and growth in rubbers composites containing sustainable thermoplastic elastomers,” *Results Eng.*, vol. 27, no. June, hal. 105897, 2025.