

Optimasi dan Karakterisasi Gear Komposit Berbasis Serbuk Kayu Jati Limbah sebagai Material Ramah Lingkungan pada Mesin Drawing FA 306.A

Andi Purwanto*, Achmad Nurhidayat, Wijoyo

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

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 06 September 2026

Revisi Akhir: 04 Oktober 2026

Diterbitkan Online: 14 Oktober 2026

KATA KUNCI

Gear
Komposit
Mesin Drawing
Optimasi
Ramah Lingkungan

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 812-2600-0085

E-mail: andipe77@gmail.com

A B S T R A K

Penelitian ini dilatarbelakangi kebutuhan mesin *drawing* FA 306.A yang beroperasi 24 jam serta urgensi penggantian *gear* impor T30 yang mahal dan cepat aus. Sebagai solusi *green manufacturing*, dikembangkan komposit berbasis limbah serbuk kayu jati dan resin epoksi sebagai alternatif pengganti yang ekonomis dan ramah lingkungan.

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan *gear* komposit biomassa yang kuat, keras, tahan aus, dan ringan melalui tiga tahapan metode, yaitu Formulasi Material: pencampuran limbah serbuk kayu jati (mesh 60-80) dengan perlakuan suhu 70–110 °C dan matriks resin epoksi (fraksi volume 30%-70%). Optimasi dan Pengujian: penerapan *Composite Thermal Cycling* (CTC) pada suhu 55 °C dengan variasi 25-50 siklus, diikuti pengujian mekanik lengkap (tarik, *bending*, dampak, kekerasan, keausan, dan SEM). Uji Aplikasi: pemasangan langsung *gear* pada mesin *drawing* FA 306.A untuk menguji akurasi dan kompatibilitas dimensi di lapangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan CTC secara signifikan meningkatkan sifat mekanik komposit. Variasi 35 siklus teridentifikasi sebagai titik optimum (*sweet spot*) yang menyempurnakan reaksi *cross-linking* dan *interfacial bonding*. Pada kondisi ini, komposit mencapai kekuatan tarik 33,96 MPa, kekuatan *bending* 52,92 MPa, ketangguhan dampak 6,00 kJ/m² dengan patahan *ductile*, kekerasan permukaan 31,35 HV, serta laju keausan terendah $1,88 \times 10^{-6}$ mm³/N.m. Secara industri, *gear* komposit ini sangat potensial sebagai komponen substitusi ramah lingkungan pada mesin *drawing* FA 306.A. Inovasi ini menawarkan efisiensi biaya, redaman getaran, serta sukses mentransformasikan limbah kayu menjadi material fungsional bernilai tinggi.

PENDAHULUAN

Gear napotek T.30 salah satu komponen transmisi daya vital yang spesifik ditemukan pada mesin *drawing* FA.306 [1]. Mesin *drawing* FA.306 A berfungsi di industri tekstil [2] khususnya pada proses pemintalan benang [3], meluruskan, menyejajarkan serat benang [4] dan meratakan *sliver* yang belum rata [5]. Secara umum gear napotek T.30 orisinil terbuat poliasetal atau termoplastik rekayasa semi-kristalin berbasis formaldehida [6] atau POM (*Polioksietilena*) [7], memiliki karakteristik kekuatan tinggi, stabilitas dimensi, tahan aus, gesekan rendah, kimia stabil, rendah kelembaban dan tahan suhu ekstrem [8]. Gear lain dibuat dari bahan baja karbon rendah [9], memiliki kuat tarik rendah, sangat ulet, lunak, mudah dibentuk [10], [11]. Gear orisinil impor, mahal [12], maka SNI menciptakan dari bahan plastik (*nylon*) kuat, tahan abrasi, redam suara, ekonomis, tahan kimia, gesekan rendah, namun sensitif kelembaban dan presisi menurun [13], [14].

Perkembangan teknologi manufaktur mendorong kebutuhan material alternatif yang kuat, efisien dan ramah lingkungan [15]. Gear pada mesin *Drawing* FA 306.A merupakan komponen penting yang harus mampu mentransmisikan daya dan torsi dengan baik [16], sehingga dibutuhkan material yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanik tinggi [17], tetapi juga

mendukung prinsip keberlanjutan [18]. Serbuk kayu jati (*Tectona grandis*) sebagai limbah industri mebel sangat melimpah di wilayah Soloraya, namun pemanfaatannya belum optimal [19], [20]. Limbah penggergajian kayu jati mencapai 55% dari total produksi ($\pm 1,4$ juta m³/tahun) [21][22] dengan kandungan selulosa dan lignin yang tinggi sehingga memiliki karakter mekanik baik, ringan, tahan panas [23], serta potensial sebagai material penguat komposit [23]. Penggunaannya untuk pembuatan gear seperti produk Gear Napotek T.30 telah mulai diterapkan [24], namun ketahanan aus dan performa dinamisnya masih perlu ditingkatkan [25]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada optimasi komposisi material komposit serbuk kayu jati-epoksi serta karakterisasi sifat mekaniknya guna meningkatkan performa gear sebagai material alternatif yang berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

Komposit berbasis serbuk kayu (*wood flour composite*) merupakan material alternatif yang berpotensi dikembangkan sebagai pengganti material polimer konvensional karena memanfaatkan sumber daya terbarukan dan limbah biomassa. Karakteristik komposit sangat dipengaruhi oleh jenis kayu, ukuran partikel, fraksi pengisi, jenis matriks, kompatibilitas antarmuka, serta metode proses pembuatannya [26]. Penggunaan serbuk kayu sebagai penguat dapat meningkatkan kekakuan dan modulus komposit, meskipun peningkatan kandungan pengisi tertentu dapat menurunkan kekuatan tarik dan ketangguhan akibat lemahnya ikatan antarmuka [24]. Perlakuan permukaan dan penggunaan *coupling agent* menjadi strategi penting untuk meningkatkan adhesi antara serbuk kayu dan matriks polimer [26].

Serbuk kayu jati memiliki potensi khusus karena karakteristik mekanik dan ketersediaannya sebagai limbah industri pengolahan kayu. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa serbuk kayu jati dapat digunakan dalam *wood-plastic composite* dengan karakteristik tarik, lentur dan dampak yang dapat dioptimalkan [24]. Dalam aplikasi gear, selain kekuatan mekanik, ketahanan aus, stabilitas termal, fatigue dan karakteristik gesekan merupakan parameter kritis [27]. Studi mengenai gear biokomposit menunjukkan bahwa pasangan gear komposit dengan gear baja dapat memberikan performa aus dan fatigue yang lebih baik dibandingkan pasangan komposit-komposit. Oleh karena itu, optimasi komposisi dan karakterisasi komprehensif komposit serbuk kayu jati limbah penting dilakukan untuk memperoleh material gear yang ringan, ekonomis, tahan aus dan lebih ramah lingkungan untuk mesin Drawing FA 306.A. Penelitian sebelumnya oleh [28] formula serbuk jati untuk kampas rem cakram, [29] Optimasi serbuk kayu jati dan sengon limbah, dengan perlakuan panas untuk panel [30]. Perlakuan panas pada gear baja (bukan bahan alam) untuk mesin produksi dan kendaraan ringan. Penggunaan serbuk kayu limbah sebagai penguat komposit telah banyak diteliti untuk aplikasi non-struktural, namun pemanfaatan serbuk kayu jati limbah sebagai material gear industri belum pernah dilakukan, sehingga penelitian ini memiliki celah ilmiah signifikan.

METODOLOGI

Penelitian ini terdiri dari tiga tahap utama:

1. Formulasi Material Komposit Bahan Gear. Serbuk kayu jati limbah mesh 60-80, di-*treatment* temperatur pada suhu 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C dan 110 °C selama satu jam, kemudian dicampur dengan matriks resin epoxy pada variasi fraksi volume 30%, 40%, 50%, 60% dan 70% + 1% katalis, lalu pencampuran menggunakan mixer dengan putaran 250 rpm selama 60 detik.
2. Optimasi Komposisi Material Gear. Spesimen yang digunakan untuk tahap optimasi CTC, merupakan hasil uji mekanik paling optimum pada tahap pertama, yaitu fraksi volume 40% dengan perlakuan suhu 90 °C. *Composite Thermal Cycling* (CTC) sebagai bahan Gear pada suhu 55 °C dengan variasi 25X, 30X, 35X, 40X, 50X siklus pengulangan 10 menit. Membandingkan performa bahan Wooden, Polimer dan hasil formulasi penelitian (sifat mekanik terdiri uji kekerasan ASTM E-384, uji bending ASTM D-6272, uji dampak ASTM D-5941, uji tarik ASTM D-638, uji ketahanan aus ASTM G-99, analisa foto SEM patahan ketangguhan dampak).
3. Menguji Desain Dan Dimensi Optimasi Gear Komposit. Melakukan penerapan langsung dengan pemasangan gear pada mesin drawing FA 306.A untuk memastikan kompatibilitas (dimensi gear) telah sesuai (tidak sampai menguji kinerja gear pada kondisi saat kerja mesin).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Mekanik Formulasi Material Komposit Bahan Gear

Uji Impak Izod ASTM D-5941 (kJ/m²)

Tabel 1. Data hasil Uji Impak Izod pengaruh perlakuan suhu dan fraksi volume

Suhu \ Fraksi	30%	40%	50%	60%	70%
70 °C	3.91	4.48	3.96	3.50	3.08
80 °C	4.31	4.62	4.31	4.00	3.43
90 °C	4.59	5.01	4.79	4.11	3.79
100 °C	4.28	4.69	4.47	3.83	3.58
110 °C	4.01	4.37	3.86	3.47	2.87

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026

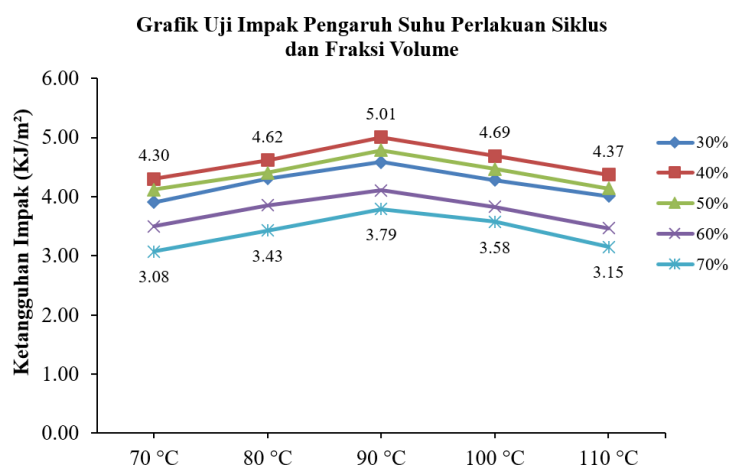
Temuan: Daya serap energi tertinggi 5,01 kJ/m² pada suhu siklus 90 °C dan Fraksi Volume serbuk kayu jati limbah 40%. Patahan cenderung *ductile*, menandakan ketangguhan meningkat.

Berdasarkan Tabel 1, dan Gambar 1., pengujian impak izod dilakukan untuk mengetahui nilai ketangguhan (kJ/m²) dari komposit serbuk kayu jati–epoxy yang dipersiapkan sebagai bahan *gear* pada mesin *drawing* FA 306 A. Pengujian ini mengevaluasi interaksi dua variabel utama, yaitu suhu perlakuan panas (*treatment* temperatur 70 °C hingga 110 °C) dan fraksi volume pengisi (*filler*) dari 30% hingga 70%. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan adanya tren visual yang konsisten dimana nilai ketangguhan impak meningkat seiring kenaikan fraksi volume hingga mencapai titik optimal pada fraksi 40%, lalu mengalami penurunan drastis pada fraksi volume yang lebih tinggi (50%, 60% dan 70%). Di sisi lain, variasi perlakuan suhu juga menunjukkan pola kurva parabolik, di mana ketangguhan meningkat dari suhu 70 °C hingga mencapai puncaknya pada suhu 90 °C, sebelum akhirnya terdegradasi pada suhu 100 °C dan 110 °C.

Tabel 2. Data hasil Uji Impak Izot Optimal (Suhu 90 °C) terhadap Fraksi Volume

No	Variasi Fraksi Volume (%)	Energi Serap (kJ/m ²)	Mode Patahan
1.	30%	4,59	Semi Ductile
2.	40%	5,01	Ductile
3.	50%	4,79	Semi Ductile
4.	60%	4,11	Semi Brittle
5.	70%	3,79	Brittle

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026



Gambar 1. Grafik ketangguhan impak komposit

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pengaruh Fraksi Volume terhadap Ketangguhan Impak

Pada fraksi volume pengisi 30%, material memiliki ketangguhan yang wajar pada seluruh rentang suhu (berkisar antara 3,91 hingga 4,59 (kJ/m²). Nilai ketangguhan impak mengalami kenaikan signifikan pada semua variasi suhu ketika fraksi volume ditingkatkan menjadi 40%, yang sekaligus menjadi titik komposisi optimum dalam penelitian ini. Nilai impak

tertinggi pada fraksi 40% dicapai pada suhu *treatment* 90 °C dengan nilai sebesar **5,01** (kJ/m²). Kenaikan ketangguhan pada fraksi 40% mengindikasikan bahwa distribusi serbuk kayu jati mesh 60-80 di dalam matriks epoxy berada pada kondisi paling homogen, sehingga transfer tegangan saat menerima beban kejut (*impact*) dapat didistribusikan secara merata di sepanjang antarmuka (*interface*) serat dan matriks. Temuan ini sejalan [26] yang melaporkan bahwa peningkatan dispersi *wood flour* di dalam matriks polimer dapat meningkatkan ketangguhan impak, sedangkan peningkatan kandungan pengisi secara berlebihan dapat memicu aglomerasi dan menurunkan ketangguhan impak.

Namun, ketika fraksi volume pengisi terus ditingkatkan menjadi 50%, 60%, hingga menyentuh angka 70%, terjadi penurunan nilai ketangguhan impak yang sangat tajam. Nilai terendah tercatat pada fraksi volume 70% dengan perlakuan suhu 110 °C, yaitu hanya sebesar 2,87 (kJ/m²). Penurunan drastis pada fraksi volume tinggi (di atas 40%) disebabkan oleh berkurangnya volume matriks resin epoxy yang berfungsi sebagai pengikat (*binder/matrixs*). Keterbatasan jumlah *matriks* ini memicu terjadinya fenomena penggumpalan (*agglomeration*) serbuk kayu dan munculnya rongga udara (*void*). Akibatnya, ketika material menerima beban benturan tiba-tiba, titik-titik aglomerasi tersebut bertindak sebagai konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang mempercepat perambatan retak dengan mode patahan *brittle* (getas). Hasil tersebut juga konsisten dengan kajian [31] yang menunjukkan bahwa sifat mekanik komposit berbasis epoxy dan penguat alam sangat dipengaruhi oleh konsentrasi penguat, distribusi penguat, serta kualitas ikatan antarmuka antara penguat dan matriks. Pada konsentrasi penguat tertentu dapat diperoleh kondisi optimum, sedangkan penambahan penguat melebihi kondisi tersebut berpotensi menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat menurunnya efektivitas ikatan antara fase penguat dan matriks.

Pengaruh Perlakuan Suhu (Treatment Temperatur)

Perlakuan panas pada serbuk kayu jati limbah terbukti memberikan pengaruh termomekanis yang krusial terhadap karakteristik antarmuka komposit. Penelitian (Alhayat, 2026) menegaskan bahwa jenis serat, kandungan penguat, perlakuan serat dan kondisi proses merupakan faktor penting yang menentukan karakteristik termal dan mekanik komposit serat alami. Pada suhu rendah (70 °C dan 80 °C), ketangguhan material masih belum maksimal, karena sisa kelembaban atau senyawa volatil terikat pada serbuk kayu belum sepenuhnya tereduksi, sehingga ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) dengan resin epoxy belum optimal [32].

Kondisi *treatment* terbaik dicapai pada suhu 90 °C. Pada suhu ini, energi serap impak mencapai nilai tertinggi di seluruh variasi fraksi volume (4,59 kJ/m² pada fraksi 30%; 5,01 kJ/m² pada fraksi 40% dan 4,79 kJ/m² pada fraksi 50%). Peningkatan ini menandakan bahwa suhu 90 °C berhasil mengeliminasi kadar air dan memodifikasi struktur permukaan serbuk secara optimal tanpa merusak komponen struktural selulosa kayu, sehingga memicu pergeseran mode patahan ke arah *ductile* (ulet) yang mampu menyerap energi lebih besar. Hasil penelitian [33] menunjukkan bahwa perlakuan panas terhadap serat alami dapat menyebabkan perubahan karakteristik fisik dan mekanik serat, termasuk penurunan kekuatan dan *failure strain* ketika paparan termal semakin meningkat. Peneliti tersebut menekankan pentingnya pengendalian temperatur selama pemrosesan material berbasis serat alami karena temperatur yang lebih tinggi dapat meningkatkan risiko degradasi termal.

Sebaliknya, saat suhu dinaikkan lebih lanjut menuju 100 °C hingga 110 °C, ketangguhan impak kembali merosot secara konsisten. Sebagaimana pada tabel 2., fraksi volume 40%, nilai impak turun dari 5,01 kJ/m² (pada 90 °C) menjadi 4,69 kJ/m² (pada 100 °C) dan terus merosot ke 4,37 kJ/m² (pada 110 °C). Penurunan ini menjadi indikator kuat bahwa paparan suhu di atas 90 °C selama satu jam, mengindikasikan terjadinya perubahan termal pada komponen lignoselulosa yang berpotensi menurunkan integritas penguat dan kualitas adhesi antarmuka serbuk-matriks. Degradasi termal ini menyebabkan serat menjadi rapuh dan menurunkan kekuatan adhesi antarmuka serbuk-matriks, yang tercermin dari penurunan kemampuan komposit dalam menahan rambatan retak secara struktural.

Korelasi yang sangat kuat dengan teori dan temuan para peneliti terdahulu, sebagaimana hasil penelitian [34] menyatakan bahwa penguatan sifat impak komposit serat alami sangat bergantung pada kadar *filler* (fraksi volume) dan perlakuan permukaan/termal untuk meningkatkan adhesi serat-matriks. Hal ini sesuai dengan tercapainya titik puncak ketangguhan komposit pada kombinasi fraksi 40% dan suhu 90 °C. Demikian [35] menegaskan bahwa penambahan serat alami pada persentase yang optimal mampu mendongkrak energi impak secara signifikan berkat perbaikan adhesi interfasi. Persentase optimal dalam penelitian ini terbukti berada pada fraksi 40% dan menggarisbawahi adanya fenomena "suhu optimum". Perlakuan panas pada tingkat moderat (dalam kasus ini 90 °C) sukses memperbaiki sifat interfasi komposit, tetapi perlakuan suhu yang terlalu tinggi (100 °C-110 °C) justru menurunkan sifat mekanis akibat degradasi termal serat.

Hasil penelitian [36] menyimpulkan bahwa optimasi fraksi pengisi bersifat sangat kritikal bagi pengujian Izod. Ketiadaan matriks yang cukup pada konsentrasi pengisi yang terlalu tinggi (fraksi 50%-70%) terbukti menggagalkan fungsi pengikatan material dan memicu penurunan performa dampak secara drastis.

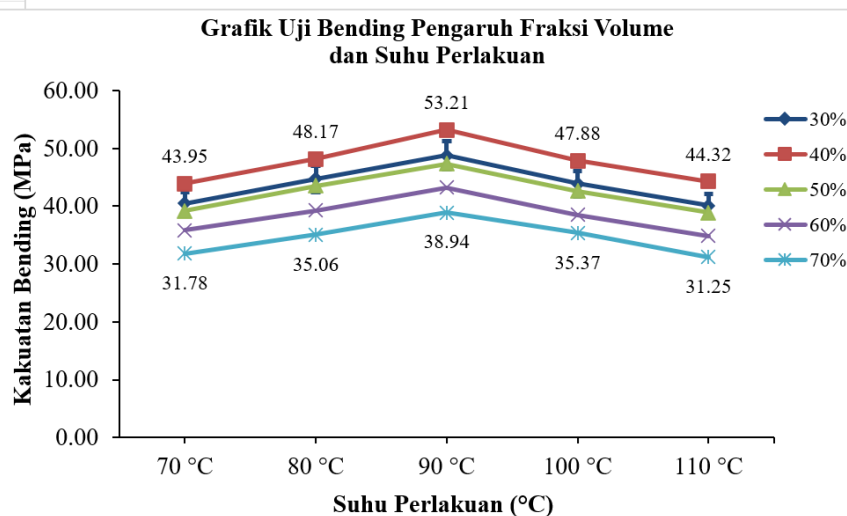
Uji Bending (ASTM D-6272)

Tabel 3. Data hasil Uji Bending (ASTM D-6272)

Suhu \ Fraksi	30%	40%	50%	60%	70%
70 °C	40.48	43.95	39.16	35.81	31.78
80 °C	44.75	48.17	43.54	39.27	35.06
90 °C	48.82	53.21	47.35	43.23	38.94
100 °C	43.90	47.88	42.66	38.49	35.37
110 °C	40.13	44.32	38.93	34.84	31.25

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026

Temuan: Modulus bending tertinggi dicapai pada suhu 90 °C, dengan fraksi Volume 40%, menunjukkan kekuatan lentur optimal.



Gambar 2. Grafik kekuatan bending komposit

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pengujian bending menggunakan standar ASTM D-6272 bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan lentur (*bending strength*) dari komposit serbuk kayu jati limbah (mesh 60-80) dengan matriks resin epoxy. Kekuatan bending merupakan parameter krusial untuk material aplikasi *gear* karena gigi-gigi *gear* secara kontinu menerima beban tegangan tekan dan tarik secara bergantian saat mentransmisikan daya. Berdasarkan data Tabel 3 dan Gambar 3., perlakuan temperatur *treatment* serbuk kayu (70 °C hingga 110 °C) dan variasi fraksi volume (30% hingga 70%) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan material dalam menahan beban lentur.

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan adanya pola tren yang konsisten: kekuatan bending meningkat seiring bertambahnya fraksi volume hingga mencapai titik optimal pada fraksi 40%, kemudian mengalami penurunan hingga fraksi 70%. Sementara dari sudut pandang perlakuan panas (*thermal treatment*), kekuatan bending komposit meningkat seiring kenaikan suhu dari 70 °C hingga mencapai puncaknya pada temperatur 90 °C, sebelum akhirnya menurun kembali pada suhu 100 °C dan 110 °C.

Kinerja Optimum Komposit Serbuk Kayu Jati-Epoxy

Puncak performa kekuatan bending tertinggi berhasil dicapai pada kondisi kombinasi temperatur *treatment* 90 °C dengan fraksi volume serbuk kayu 40%, yaitu sebesar 53,21 MPa. Nilai ini merupakan kondisi optimum yang mengindikasikan terjadinya kestabilan interaksi antarmuka (*interface bonding*) yang sangat baik antara matriks resin epoxy dan filler serbuk kayu jati. Pada kondisi ini, resin epoxy mampu membasahi (*wetting*) seluruh permukaan partikel serbuk kayu secara merata dan mengisi rongga secara sempurna, sehingga transfer tegangan saat material menerima beban lentur dapat berlangsung secara optimal.

Pengaruh Fraksi Volume Serbuk Kayu Jati

Analisis data pada seluruh variasi temperatur menunjukkan bahwa fraksi volume 40% konsisten menjadi komposisi terbaik. Sebagai contoh, pada suhu *treatment* 90 °C, kekuatan bending meningkat dari 48,82 MPa (fraksi 30%) menjadi 53,21 MPa (fraksi 40%). Peningkatan ini menandakan bahwa penambahan serbuk kayu hingga 40% efektif bertindak sebagai penguat (*reinforcement*) yang mendistribusikan beban mekanis. Kecenderungan tersebut sejalan dengan penelitian [37] yang menunjukkan bahwa penambahan filler lignoselulosa pada matriks epoxy dapat meningkatkan sifat mekanik pada komposisi tertentu, tetapi peningkatan kandungan filler secara berlebihan justru dapat menyebabkan penurunan *flexural strength*. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa karakteristik filler dan kompatibilitas antara partikel lignoselulosa dengan matriks epoxy merupakan faktor penting yang menentukan kinerja mekanik komposit.

Namun, ketika fraksi volume ditingkatkan lebih lanjut ke 50%, 60% hingga 70%, terjadi penurunan kekuatan lentur yang cukup tajam. Pada fraksi volume 70% di suhu perlakuan 90 °C, kekuatan bending merosot hingga 38,94 MPa. Fenomena penurunan ini disebabkan oleh fenomena kekurangan matriks (*resin starvation*). Jumlah resin epoxy tidak lagi memadai untuk membasahi volume serbuk kayu yang terlalu padat, sehingga memicu terjadinya aglomerasi (penggumpalan) partikel kayu dan terbentuknya rongga udara (*voids*). Rongga dan aglomerasi ini bertindak sebagai konsentrator tegangan (*stress concentration*) yang mempercepat perambatan retak saat komposit diberi beban lentur. Temuan tersebut diperkuat oleh [38] yang melaporkan bahwa penggunaan partikel kayu dalam komposit epoxy dapat menghasilkan aglomerasi dan *voids* pada struktur komposit. Keberadaan cacat tersebut dapat mengurangi kualitas transfer beban antara filler dan matriks serta membentuk lokasi konsentrasi tegangan yang mempermudah inisiasi dan propagasi retak ketika material menerima pembebanan mekanik.

Pengaruh Temperatur Perlakuan Panas (Thermal Treatment)

Perlakuan panas pada serbuk kayu sebelum proses pencampuran terbukti memodifikasi sifat fisik serat alam tersebut. Kenaikan suhu dari 70 °C menuju 90 °C pada fraksi volume 40% menaikkan kekuatan bending dari 43,95 MPa menjadi 53,21 MPa. Kenaikan ini terjadi karena suhu moderat hingga 90 °C efektif menghilangkan kandungan air terikat (*bound water*) dan kadar ekstraktif pada limbah kayu jati. Proses pengeringan ini membuka pori-pori mikro pada permukaan serbuk kayu, meningkatkan kekasaran permukaan, serta memfasilitasi penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) yang lebih kuat dengan resin epoxy. Sebaliknya, saat temperatur *treatment* dinaikkan melampaui batas optimum menuju 100 °C dan 110 °C, performa mekanisnya menurun kembali. Pada fraksi 40% dengan suhu 110 °C, nilai kekuatan bending turun menjadi 44,32 MPa. Penurunan drastis ini mengindikasikan dimulainya proses degradasi termal pada komponen penyusun dinding sel kayu, terutama kandungan hemiselulosa yang bersifat paling sensitif terhadap panas. Degradasi ini menyebabkan serat kayu menjadi rapuh (*brittle*) dan kehilangan kekuatan alaminya, sehingga menurunkan kapabilitas komposit secara keseluruhan dalam menahan deformasi lentur [39].

Perlu validasi hasil penelitian ini dengan visualisasi tren dan perbandingan data terhadap beberapa studi literatur sejenis dipaparkan untuk memperkuat analisis mekanisme penguatan komposit, menyampaikan bahwa kekuatan lentur maksimum tercapai pada fraksi *filler* serat alam 15% dengan nilai ~38,25 MPa, di mana peningkatan fraksi lebih tinggi justru menurunkan kekuatan akibat aglomerasi partikel. Hasil penelitian komposit serbuk kayu jati ini menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi (53,21 MPa) dan mampu menampung fraksi volume hingga 40%. Hal ini membuktikan bahwa metode *thermal treatment* pada serbuk kayu dan optimalisasi pengadukan pencampuran menggunakan mixer dengan putaran 250 rpm selama 60 detik, berhasil meminimalisir aglomerasi dan memperkuat ikatan interfisial pada volume *filler* yang lebih padat. Penelitian menyatakan kekuatan lentur rata-rata komposit berbasis serat kapas-epoxy adalah ~50 MPa, di mana variasi kandungan serat berpengaruh signifikan terhadap kekakuan.

Hasil penelitian komposit serbuk kayu jati ini memiliki kekuatan lentur maksimum yang relatif setara dan sedikit lebih tinggi (53,21 MPa). Hal ini menegaskan bahwa limbah serbuk kayu jati mesh 60-80 yang di-*treatment* pada suhu tepat memiliki potensi mekanis yang setara dengan serat kontinu konvensional untuk menahan beban bending pada aplikasi komponen bergerak seperti *gear*. Demikian juga menjelaskan bahwa perlakuan *thermal* moderat mampu meningkatkan kekuatan lentur komposit hingga 61% akibat adanya relaksasi tegangan sisa (*residual stress*). Tren ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana pemanasan terkontrol pada partikel kayu hingga suhu 90 °C bertindak sebagai agen stabilisasi termal yang meminimalisir tegangan internal pada komposit saat proses *curing* berlangsung. Penelitian menemukan bahwa modifikasi panas pada struktur kayu utuh membutuhkan suhu sangat tinggi (167 °C) untuk meningkatkan kekuatan sebelum terjadi degradasi. Perbandingan ini menunjukkan perbedaan karakteristik material yang jelas; pada level komposit partikulat (serbuk mesh 60-80), luas permukaan spesifik serat jauh lebih besar, sehingga titik degradasi termal

optimalnya bergeser ke suhu yang lebih rendah (90 °C). Pemanasan di atas suhu tersebut langsung merusak struktur mikro serat penyusunnya. Kekuatan lentur tertinggi didapatkan sebesar ~48,35 MPa pada suhu *curing* 80 °C. Hasil penelitian komposit serbuk jati ini memperoleh nilai yang lebih tinggi (53,21 MPa) pada suhu *treatment* 90 °C. Hal ini selaras [40] penelitian memperlihatkan bahwa kombinasi *thermal treatment* pada *filler* sebelum pencampuran memberikan efek peningkatan kekuatan yang lebih baik dibandingkan hanya mengandalkan variasi suhu saat proses pematangan (*curing*) matriksnya saja.

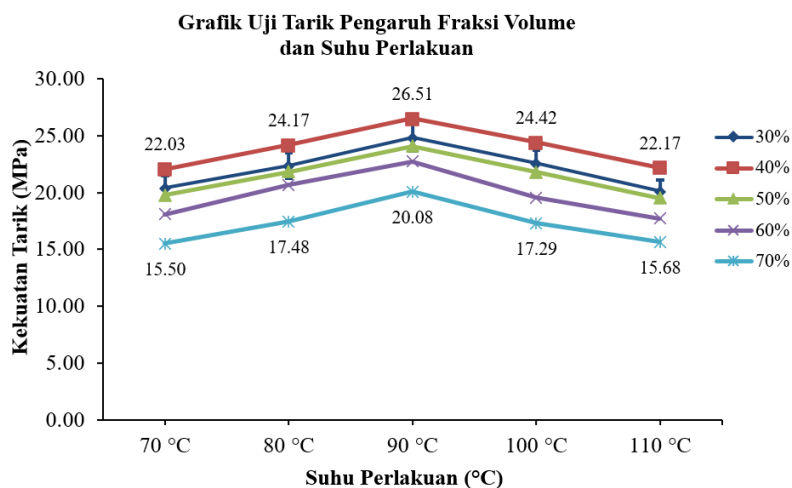
Uji Tarik (ASTM D-638)

Tabel 4. Data Hasil Uji Tarik (ASTM D-638)

Suhu \ Fraksi	30%	40%	50%	60%	70%
70 °C	20.43	22.03	19.78	18.10	15.50
80 °C	22.39	24.17	21.82	20.65	17.48
90 °C	24.88	26.51	24.07	22.73	20.08
100 °C	22.62	24.42	21.79	19.53	17.29
110 °C	20.13	22.17	19.53	17.71	15.68

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026

Temuan: Puncak kekuatan tarik terjadi pada suhu 90 °C dan fraksi volume 40% sebesar 26,51 MPa.



Gambar 3. Grafik kekuatan tarik komposit

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pembahasan hasil pengujian kekuatan tarik dilakukan untuk mengetahui pengaruh kombinasi variasi suhu *treatment* serbuk kayu jati (70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C dan 110 °C) serta fraksi volume *filler* (30%, 40%, 50%, 60% dan 70%) terhadap kemampuan mekanis komposit sebagai bahan *gear*. Berdasarkan data hasil pengujian tabel 4. dan Gambar 3., sifat mekanik material menunjukkan pola yang konsisten, di mana kekuatan tarik mengalami peningkatan hingga mencapai titik optimum pada kombinasi parameter tertentu, kemudian mengalami penurunan seiring bertambahnya fraksi volume dan suhu *treatment* yang berlebihan. Secara keseluruhan, kekuatan tarik tertinggi (maksimum) diperoleh pada kombinasi suhu *treatment* 90 °C dengan fraksi volume 40%, yaitu sebesar 26,51 MPa. Sebaliknya, kekuatan tarik terendah tercatat pada suhu *treatment* 70 °C dengan fraksi volume 70%, yaitu hanya sebesar 15,50 MPa.

Pengaruh Fraksi Volume Serbuk Kayu Jati

Jika ditinjau dari variasi fraksi volume pada setiap tingkat suhu, pola perubahannya selalu membentuk kurva parabola (meningkat lalu menurun). Pada fraksi volume awal 30%, material memiliki kekuatan tarik yang cukup baik (berkisar antara 20,13 MPa hingga 24,88 MPa). Ketika fraksi volume ditingkatkan menjadi 40%, kekuatan tarik di seluruh variasi suhu mengalami kenaikan dan mencapai puncaknya. Fenomena ini menandakan bahwa pada fraksi volume 40%, terjadi distribusi dan ikatan antar muka (*interfacial bonding*) yang paling ideal antara matriks resin epoxy dengan serbuk kayu jati mesh 60-80. Resin mampu membasahi (*wetting*) seluruh permukaan serbuk kayu dengan sempurna, sehingga transfer tegangan saat material menerima beban tarik berlangsung secara optimal. Temuan ini sejalan dengan penelitian [41] yang menunjukkan bahwa komposit serbuk kayu jati-epoxy memiliki kondisi optimum pada komposisi tertentu, sedangkan

peningkatan kandungan serbuk yang berlebihan menyebabkan penurunan performa mekanik akibat berkurangnya kontinuitas matriks dan meningkatnya cacat pada daerah antarmuka

Namun, ketika fraksi volume terus ditingkatkan menjadi 50%, 60%, hingga menyentuh 70%, terjadi penurunan kekuatan tarik yang sangat signifikan di semua variasi suhu. Pada fraksi volume 70%, kekuatan tarik merosot tajam ke rentang 15,50 MPa-20,08 MPa. Penurunan performa mekanis ini disebabkan oleh fenomena *agglomeration* (penggumpalan serbuk kayu) akibat jumlah *filler* yang terlalu dominan. Matriks resin epoxy kekurangan volume untuk mengikat dan membasahi seluruh partikel serbuk, sehingga memicu terbentuknya rongga udara (*void*) dan titik konsentrasi tegangan (*stress concentration*). Akibatnya, material menjadi lebih rapuh dan kemampuan menahan gaya tariknya menurun drastis. Sejalan dengan temuan tersebut, [42] melaporkan bahwa peningkatan kandungan penguat melampaui komposisi optimum dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat *poor interfacial bonding*, *insufficient fiber wetting*, pembentukan *microvoid*, serta aglomerasi penguat.

Pengaruh Suhu Treatment Serbuk

Ditinjau dari faktor perlakuan panas (*thermal treatment*) terhadap serbuk kayu jati sebelum dicampur, variasi suhu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik permukaan *filler*. Pada suhu *treatment* awal 70 °C dan 80 °C, nilai kekuatan tarik cenderung lebih rendah di semua fraksi volume. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan kadar air alami atau senyawa ekstraktif pada serbuk kayu belum sepenuhnya hilang, sehingga ikatan adhesi dengan resin epoxy belum maksimal. Temuan ini sejalan dengan penelitian [43] yang menunjukkan bahwa perlakuan awal terhadap *teak wood powder* dapat meningkatkan karakteristik mekanik komposit berbasis epoxy melalui penghilangan pengotor pada permukaan penguat dan peningkatan interaksi antara *filler* dengan matriks.

Peningkatan performa mekanis yang sangat signifikan terlihat saat suhu *treatment* dinaikkan menjadi 90 °C, yang menjadi titik optimum dalam penelitian ini. Nilai kekuatan tarik mencapai puncaknya di setiap fraksi volume pada suhu ini (misalnya, mencapai 26,51 MPa pada fraksi 40%). Perlakuan panas pada suhu 90 °C terbukti efektif menghilangkan kelembapan residual dan membuka pori-pori mikroskopis serbuk kayu jati secara optimal tanpa merusak struktur selulosanya. Kondisi ini memfasilitasi terjadinya penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) yang kuat antara resin epoxy dan serbuk saat proses pengadukan (pencampuran menggunakan mixer dengan putaran 250 rpm selama 60 detik).

Namun, ketika suhu *treatment* ditingkatkan lebih lanjut ke 100 °C dan mencapai 110 °C, kekuatan tarik kembali turun (pada fraksi 40%, nilai turun dari 26,51 MPa menjadi 24,42 MPa di suhu 100 °C dan merosot ke 22,17 MPa di suhu 110 °C). Penurunan ini mengindikasikan bahwa suhu di atas 100 °C dalam durasi satu jam mulai memicu degradasi termal awal pada komponen hemiselulosa atau selulosa serbuk kayu jati. Kerusakan struktural pada serat alami ini menyebabkan serbuk menjadi rapuh (*brittle*), sehingga kekuatannya sebagai agen penguat (*reinforcement*) di dalam matriks epoxy melemah. Kekuatan tarik maksimum tercapai sebesar 42,5 MPa pada fraksi serat 30%, di mana peningkatan serat berlebih terbukti menurunkan sifat tarik karena distribusi yang tidak homogen. Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun nilai kekuatan tarik optimum komposit serbuk kayu jati kita lebih rendah (26,51 MPa pada fraksi 40%), pola pengaruh fraksi volumenya sangat identik. Penurunan sifat mekanik setelah melewati titik optimum sama-sama disebabkan oleh kegagalan distribusi *filler* yang tidak lagi homogen di dalam matriks.

Kekuatan tarik rata-rata komposit dengan *curing* suhu optimum 50 °C mampu meningkatkan ikatan matriks-filler hingga mencapai 45,6 MPa dengan modulus 2,05 GPa. Perbandingan dengan penelitian tersebut memperlihatkan kesamaan konsep, di mana perlakuan termal moderat terbukti mutlak diperlukan untuk mengoptimalkan kekuatan ikatan antar muka. Perbedaan angka kekuatan tarik yang terjadi kemungkinan dipengaruhi oleh jenis matriks, geometri *filler* (serat panjang vs serbuk mesh 60-80), serta efisiensi metode pengadukan (pencampuran menggunakan mixer dengan putaran 250 rpm selama 60 detik) yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil kekuatan tarik meningkat hingga 49,5 MPa pada ukuran partikel halus (100 mesh) berkat dispersi *filler* yang lebih merata dibanding partikel kasar. Pada penelitian ini, penggunaan serbuk kayu jati ukuran mesh 60-80 memberikan luas permukaan spesifik yang cukup untuk berikatan dengan epoxy. Karakteristik dispersi ini mendukung tercapainya kekuatan tarik optimum 26,51 MPa pada kombinasi suhu 90 °C dan fraksi 40%, sejalan penelitian [44] menegaskan bahwa kontrol ukuran partikel *filler* yang dipadukan dengan *thermal treatment* yang tepat adalah kunci utama dalam meningkatkan *tensile strength* komposit.

Potensi sebagai Material Gear

Kombinasi kekuatan tarik optimum sebesar 26,51 MPa, stabilitas ikatan homogen pada fraksi 40%, serta ketahanan material yang telah melalui siklus *Composite Thermal Cycling* (CTC 55 °C) menunjukkan bahwa formulasi komposit serbuk kayu jati-epoxy ini memiliki karakteristik mekanis yang menjanjikan. Material ini memiliki potensi kuat untuk dikembangkan sebagai bahan alternatif aplikatif untuk komponen *gear* non-struktural atau berbeban ringan, guna mensubstitusi material polimer murni atau *wooden* konvensional karena menawarkan efisiensi biaya dan pemanfaatan limbah yang ramah lingkungan.

Uji Kekerasan ASTM E-384 (VHN)

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan untuk mengetahui kemampuan permukaan material komposit serbuk kayu jati-epoxy dalam menahan beban deformasi plastis akibat indentasi. Berdasarkan data hasil penelitian pada tabel 5. dan Gambar 4., dapat diamati adanya pola kuadrat (parabolik) yang sangat konsisten pada nilai kekerasan material, baik akibat pengaruh variasi fraksi volume *filler* (serbuk kayu jati) maupun akibat perlakuan temperatur *treatment* (panas) serbuk.

Secara umum, nilai kekerasan komposit tercatat mengalami peningkatan yang gradual seiring bertambahnya fraksi volume dan kenaikan suhu perlakuan hingga mencapai titik optimum. Setelah melampaui titik optimum tersebut, nilai kekerasan permukaan material kembali mengalami penurunan yang disebabkan oleh keterbatasan pengikatan matriks polimer serta efek degradasi termal.

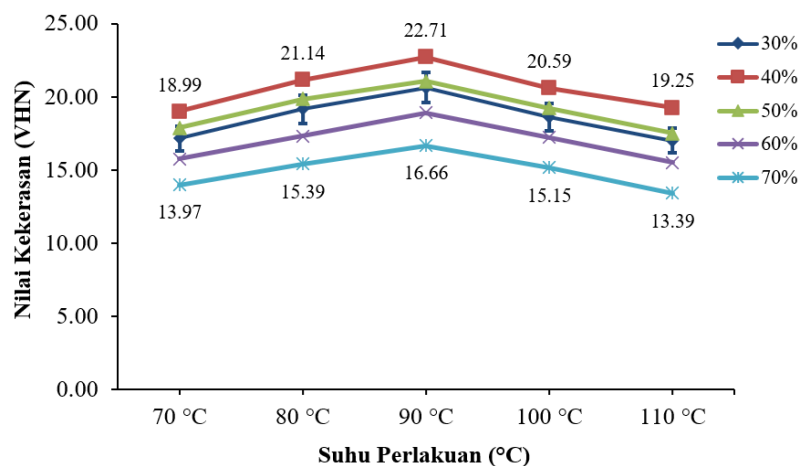
Tabel 5. Uji Kekerasan ASTM E-384 (VHN)

Suhu \ Fraksi	30%	40%	50%	60%	70%
70 °C	17.14	18.99	17.88	15.75	13.97
80 °C	19.14	21.14	19.82	17.31	15.39
90 °C	20.61	22.71	21.07	18.88	16.66
100 °C	18.60	20.59	19.20	17.20	15.15
110 °C	17.01	19.25	17.48	15.48	13.39

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026

Temuan: Ketahanan panas tertinggi pada suhu sintering 90 °C dan fraksi volume 40%, dengan nilai kekerasan sebesar 22,71 VHN

Grafik Uji Kekerasan Pengaruh Fraksi Volume dan Suhu Perlakuan



Gambar 4. Grafik uji kekerasan

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pengaruh Fraksi Volume Filler terhadap Kekerasan Komposit

Ditinjau dari komposisi material, kekuatan permukaan tertinggi di setiap variasi temperatur selalu jatuh pada fraksi volume 40%. Pada kondisi awal dengan fraksi volume serbuk 30%, nilai kekerasan berada di rentang 17,14 VHN hingga 20,61 VHN. Nilai kekerasan pada fraksi ini relatif lebih rendah karena struktur komposit masih didominasi oleh resin epoxy murni bebas, di mana jumlah partikel penguat (*filler*) belum cukup padat untuk memperkuat jaringan matriks dalam

mendistribusikan beban indentasi secara merata. Pola peningkatan kekerasan hingga mencapai kandungan filler optimum juga dilaporkan oleh [45], yang menunjukkan bahwa penambahan serat alami pada matriks epoxy meningkatkan kekerasan hingga kandungan tertentu sebelum mengalami penurunan pada kandungan filler yang lebih tinggi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa peningkatan kandungan filler yang berlebihan dapat menurunkan kualitas dispersi dan adhesi antarmuka filler–matriks.

Ketika fraksi volume serbuk kayu ditingkatkan menjadi 40%, terjadi lonjakan nilai kekerasan permukaan secara signifikan pada seluruh variasi suhu, dengan nilai tertinggi mencapai 22,71 VHN (pada perlakuan suhu 90 °C). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa komposisi fraksi volume 40% merupakan titik jenuh terbaik (*optimum packing density*), di mana seluruh permukaan serbuk kayu jati terbasahi (*wetting*) secara sempurna oleh matriks resin epoxy. Kombinasi ini menciptakan ikatan antarmuka yang sangat kuat dan minim cacat struktural, sehingga material menjadi lebih kaku dan rigid dalam menahan penetrasi beban luar. Hasil ini sejalan dengan [46], yang menemukan bahwa penambahan filler alami dalam jumlah yang sesuai dapat meningkatkan kekerasan dan sifat mekanik komposit epoxy, sedangkan kandungan yang terlalu tinggi justru menyebabkan penurunan performa.

Namun, penurunan nilai kekerasan mulai terdeteksi secara masif saat fraksi volume filler terus ditambah menuju 50%, 60%, hingga menyentuh titik terendah pada fraksi 70% (dengan nilai minimum 13,39 VHN pada suhu 110 °C). Penurunan dramatis ini disebabkan oleh fenomena *filler overload*. Jumlah volume resin epoxy sebagai agen pengikat tidak lagi sebanding untuk menyelimuti partikel serbuk kayu jati mesh 60-80 yang sangat melimpah. Akibat ketidakseimbangan rasio ini, terbentuk aglomerasi (penggumpalan) serbuk kayu jati dan munculnya porositas atau ruang kosong (*voids*) internal di dalam komposit. Saat indenter memberikan tekanan pada permukaan yang memiliki banyak *void* dan aglomerasi longgar, material akan lebih mudah ambles dan mengalami deformasi plastis yang besar, ditandai dengan turunnya nilai kekerasan Vickers secara drastis. Kondisi serupa dilaporkan [47], yang menemukan bahwa peningkatan kandungan serat di atas kondisi optimum menyebabkan dispersi filler dan adhesi antarmuka menjadi lebih buruk serta meningkatkan keberadaan *void* pada struktur komposit, sehingga sifat mekaniknya menurun.

Pengaruh Temperatur Treatment Serbuk Terhadap Kekerasan Komposit

Perlakuan panas (*thermal treatment*) selama satu jam pada serbuk kayu jati limbah terbukti memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik mekanis permukaan komposit. Puncak performa kekerasan dicapai pada suhu treatment 90 °C untuk seluruh variasi fraksi volume. Pada perlakuan suhu awal (70 °C dan 80 °C), tingkat kekerasan permukaan masih belum maksimal. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu yang rendah belum cukup efektif untuk menguapkan kadar air internal (*moisture content*) dan senyawa ekstraktif alami yang melekat pada dinding sel serbuk kayu limbah, sehingga ikatan hidrogen antarmuka dengan resin epoxy terhambat. Ketika suhu *treatment* dinaikkan menjadi 90 °C, kelembapan mikro berhasil dieliminasi secara optimal dan pori-pori mikroskopis permukaan kayu terbuka. Kondisi permukaan serbuk yang kering dan bersih ini memicu terjadinya efek ikatan mekanis (*mechanical interlocking*) yang sangat kokoh ketika resin epoxy meresap ke dalam pori serbuk kayu jati, sehingga menaikkan resistensi permukaan material. Penelitian ini sejalan dengan kajian [48] bahwa perlakuan termal pada material kayu menyebabkan perubahan kadar air, densitas, serta komposisi kimia lignoselulosa yang selanjutnya berhubungan dengan perubahan sifat mekaniknya.

Sebaliknya, saat suhu perlakuan panas terus ditingkatkan menuju 100 °C hingga 110 °C, nilai kekerasan komposit justru menurun kembali (misalnya pada fraksi 40%, nilai turun dari 22,71 VHN menjadi 20,59 VHN pada 100 °C dan kembali turun ke 19,25 VHN pada 110 °C). Penurunan ini dipicu oleh fenomena awal degradasi termal konstituen kayu, terutama senyawa hemiselulosa yang sensitif terhadap suhu di atas 90 °C. Akibatnya, serbuk kayu kehilangan kekuatan arang struktural alaminya dan menjadi rapuh (*brittle*). Selain itu, paparan suhu berlebih berpotensi melepaskan sisa gas mikro saat proses pengadukan mekanis (pencampuran + 1% katalis menggunakan mixer dengan putaran 250 rpm selama 60 detik) yang terjebak di dalam campuran, sehingga menghasilkan *void* pasca-proses pembekuan resin (*curing*). Mekanisme tersebut sejalan dengan penelitian [49] yang menunjukkan bahwa peningkatan interaksi antara *waste wood flour* dan matriks epoxy dapat meningkatkan karakteristik mekanis, termasuk kekerasan komposit.

Relevansi untuk Komponen Gear

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa perlakuan termal dan fraksi volume interaksi penguat berpengaruh signifikan terhadap kekerasan Vickers komposit serbuk kayu jati-epoxy. Kombinasi parameter optimum diperoleh pada suhu *treatment* serbuk 90 °C dengan fraksi volume 40%, menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 22,71 VHN. Dari aspek aplikasi, nilai kekerasan permukaan yang stabil dan optimum ini memberikan indikasi kuat bahwa material

komposit formulasi ini sangat potensial untuk dipertimbangkan sebagai material alternatif pengganti polimer konvensional (seperti nylon) pada komponen gear mesin beban ringan (*lightweight gear*). Nilai kekerasan yang memadai (22,71 VHN) memastikan gear tidak akan mudah aus atau mengalami deformasi profil gigi saat terjadi kontak dan gesekan dinamis antargigi, sekaligus mempertahankan durabilitas mekanisnya [50].

[51], mengungkapkan kekuatan mekanis maksimum komposit serat alam dicapai pada fraksi volume 30% dengan penurunan drastis pada fraksi di atasnya akibat distribusi tidak homogen. Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan keberhasilan peningkatan performa, di mana penggunaan ukuran partikel serbuk kayu jati yang lebih teratur (mesh 60-80) menggeser titik optimum ke fraksi yang lebih tinggi (40%) serta menghasilkan nilai kekerasan puncak yang lebih baik (22,71 VHN). Peneliti [52], menemukan bahwa pengkondisian suhu *curing/treatment* pada *filler* alam sangat baik pada temperatur moderat di bawah 90 °C untuk meningkatkan kekuatan *interfacial bonding*. Tren parabolik dengan puncak optimum di suhu 90 °C dalam penelitian ini memiliki korelasi fenomena yang sangat mirip dengan temuan tersebut mempertegas pentingnya batas suhu termal agar tidak mendegradasi lignoselulosa kayu. Penelitian menegaskan bahwa pengisian partikel kayu halus di atas 50% memicu lonjakan tingkat porositas secara eksponensial yang melunakkan kekerasan permukaan. Karakteristik kejatuhan nilai kekerasan pada fraksi pekat (50% hingga 70%) dalam penelitian ini mengonfirmasi kebenaran ilmiah dari teori fenomena *filler overload* dan *void entrapment*.

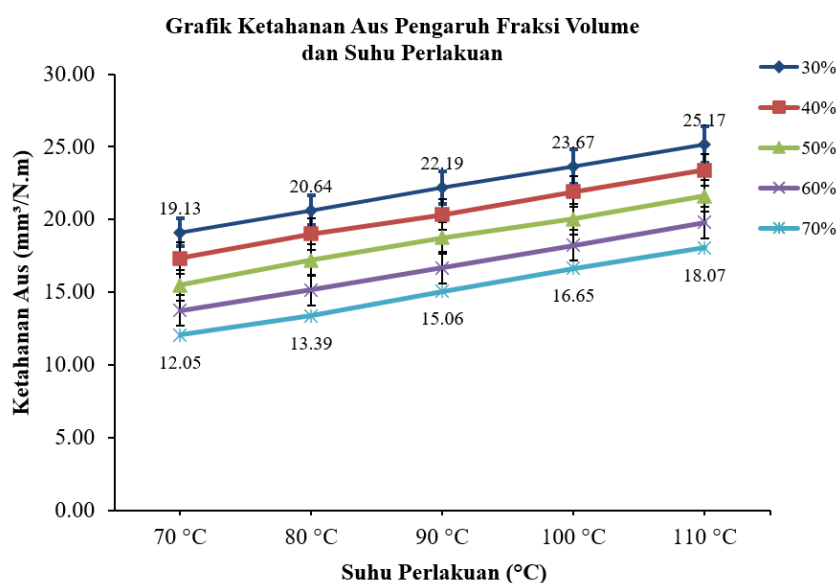
Uji Ketahanan Aus ASTM G-99 ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

Hasil pengujian ketahanan aus komposit serbuk kayu jati-epoxy setelah diberi perlakuan variasi suhu *treatment* serat dan fraksi volume disajikan pada Tabel 6. dan Gambar 5. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai laju keausan spesifik komposit bahan *gear*. Hasil pengujian menunjukkan pola yang sangat menarik, di mana peningkatan fraksi volume serbuk kayu jati secara konsisten memperbaiki ketahanan aus (menurunkan laju keausan), sedangkan peningkatan suhu *treatment* serat di atas 70 °C justru memberikan dampak negatif berupa penurunan ketahanan aus (meningkatkan laju keausan) akibat efek degradasi termal pada komponen pengisi (*filler*).

Tabel 6. Uji Ketahanan Aus ASTM G-99

Suhu \ Fraksi	30%	40%	50%	60%	70%
70 °C	19.13	17.35	15.49	13.76	12.05
80 °C	20.64	19.01	17.21	15.16	13.39
90 °C	22.19	20.35	18.75	16.69	15.06
100 °C	23.67	21.93	20.02	18.24	16.65
110 °C	25.17	23.41	21.63	19.81	18.07

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026



Gambar 5. Grafik ketahanan aus

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pada kondisi awal dengan suhu *treatment* serat 70 °C dan fraksi volume 30%, laju keausan tercatat cukup tinggi sebesar $19,13 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Nilai ini mencerminkan bahwa pada fraksi volume pengisi yang rendah, permukaan gesek didominasi oleh matriks resin epoxy murni yang secara inheren memiliki ketahanan kikis abrasif yang lebih terbatas, sehingga kemampuan material menahan gaya gesek eksternal masih minim.

Ketika fraksi volume ditingkatkan pada suhu *treatment* yang sama (70 °C), ketahanan aus material menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan (laju keausan menurun). Pada fraksi volume 40%, laju keausan turun menjadi $17,35 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, kemudian menurun lagi menjadi $15,49$ pada fraksi 50% dan $13,76 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ pada fraksi 60%. Puncak performa ketahanan aus terbaik (laju keausan terendah) diperoleh pada fraksi volume 70% dengan nilai hanya $12,05 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Hal ini menandakan bahwa partikel halus serbuk kayu jati bertindak sangat efektif sebagai penguat (*reinforcement*) mekanis pada permukaan komposit [53]. Kehadiran partikel kayu dengan kerapatan tinggi mampu memblokir lintasan penetrasi abrasif dari benda penekan (*counterface*), sehingga membatasi pelepasan material makro pada area kontak roda gigi.

Namun, ketika suhu *treatment* serat dinaikkan dari 70 °C hingga 110 °C, performa ketahanan aus komposit di seluruh variasi fraksi volume justru mengalami penurunan secara linear (laju keausan meningkat). Sebagai contoh, pada fraksi volume optimum 70%, laju keausan merangkak naik menjadi $13,39 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ pada suhu 80 °C, meningkat ke $15,06 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ pada suhu 90 °C dan melonjak hingga $18,07 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ pada suhu *treatment* tertinggi 110 °C. Tren serupa terjadi pada fraksi 30%, di mana laju keausannya mencapai titik terburuk sebesar $25,17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ pada suhu 110 °C.

Penurunan ketahanan aus pada suhu *treatment* tinggi ini disebabkan oleh terjadinya kerusakan struktural mikro (degradasi termal) pada serbuk kayu jati, seperti rusaknya sebagian ikatan konstituen hemiselulosa atau selulosa, yang membuat partikel kayu menjadi terlalu kering dan rapuh (*brittle*) [54]. Akibatnya, interaksi antarmuka (*interface bonding*) antara serbuk kayu jati dengan resin epoxy menjadi lemah. Saat material menerima beban gesek dinamis, partikel pengisi yang rapuh ini akan sangat mudah terlepas (*debonding*) dari matriks epoxy. Partikel-partikel yang lepas tersebut kemudian terperangkap di antara dua permukaan yang bergesek dan bertindak sebagai media abrasif ketiga (*three-body abrasive wear*), yang mempercepat pengikisan permukaan komposit.

Kesimpulannya, perlakuan fraksi volume dan suhu *treatment* serat berpengaruh signifikan terhadap laju keausan komposit serbuk kayu jati-epoxy. Ketahanan aus terbaik diperoleh pada kombinasi fraksi volume tertinggi (70%) dengan suhu *treatment* terendah/moderat (70 °C), menghasilkan laju keausan minimum sebesar $12,05 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Secara umum, karakteristik laju keausan yang rendah pada kondisi optimum ini menunjukkan bahwa komposit tersebut memiliki potensi kuat sebagai material alternatif berkinerja tinggi untuk aplikasi *gear* mesin karena mampu mempertahankan integritas permukaannya dari keausan akibat gesekan kontinu. Sebagaimana penelitian terdahulu [55], kekuatan mekanis dan ketahanan permukaan material serat alam tercapai optimum pada batas fraksi tertentu, di mana penambahan penguat yang berlebihan justru menurunkan sifat mekanik akibat distribusi yang tidak homogen (aglomerasi). Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan hasil yang sedikit berbeda namun positif, di mana serbuk kayu jati mesh 60-80 pada fraksi tinggi hingga 70% masih mampu terdispersi dengan baik dan memberikan peningkatan ketahanan aus yang linear. Hal ini menandakan geometri partikel serbuk halus lebih unggul dalam penguatan aus permukaan dibanding serat panjang (seperti serat tebu) yang mudah menggumpal pada fraksi tinggi. Menurut [33], perlakuan panas moderat pada serat alam sangat penting untuk mengeliminasi kadar air internal sehingga memperkuat *interlocking* mekanis dengan matriks polymer. Hal tersebut sangat selaras dengan hasil penelitian ini, di mana kestabilan struktur penguat terbaik berada pada suhu rendah-moderat (70 °C). Suhu ini dinilai sudah cukup membuang kelembaban tanpa merusak ikatan makromolekul dinding sel kayu jati. Penelitian [56] menunjukkan bahwa paparan suhu tinggi di atas 80 °C pada *filler* organik berbasis kayu memicu penurunan kekuatan struktural mikro secara drastis akibat pengerutan dan degradasi termal. Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan pola degradasi yang sangat mirip, di mana laju keausan komposit melonjak naik secara linear di setiap variasi fraksi ketika suhu *treatment* serat dipaksakan naik di atas 80 °C hingga menyentuh 110 °C. Kedua penelitian ini menegaskan pentingnya pembatasan suhu paparan termal pada serat alami agar tidak menurunkan kualitas antarmuka komposit.

Uji Mekanik Optimasi Komposisi Material Gear

Composite Thermal Cycling (CTC) sebagai bahan Gear pada suhu 55 °C) dengan variasi 25X, 30X, 35X, 40X, 50X siklus pengulangan 10 menit. Membandingkan perfoma bahan Wooden, Polimer dan hasil formulasi penelitian (sifat mekanik

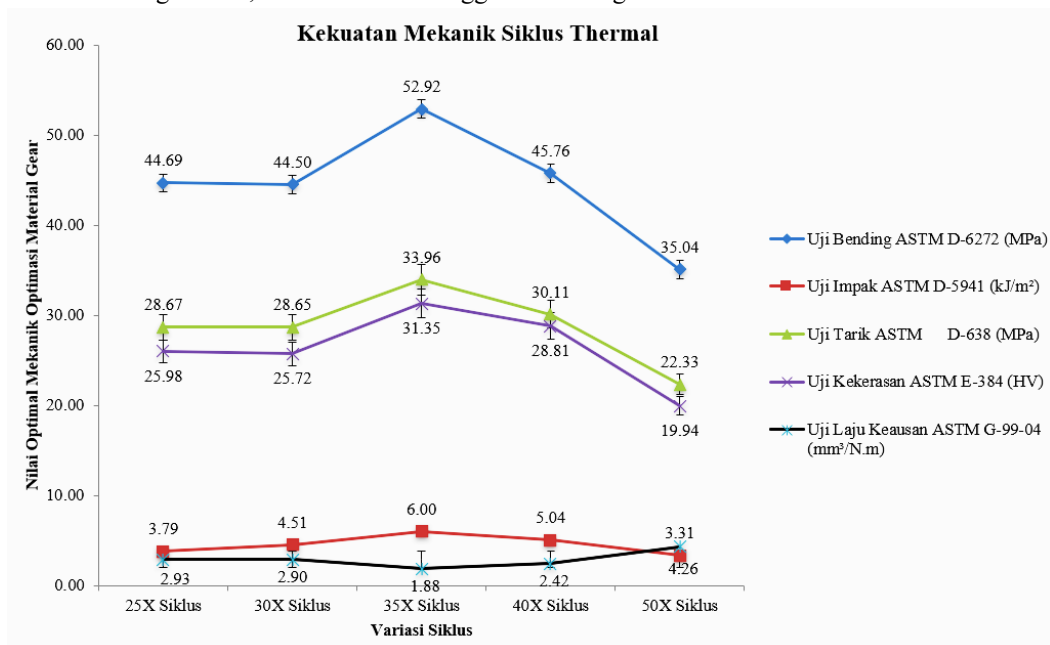
terdiri uji kekerasan ASTM E-384, uji bending ASTM D-6272, uji impak ASTM D-5941, uji tarik ASTM D-638, uji ketahanan aus ASTM G-99, analisa foto SEM patahan ketangguhan impak).

Tabel 7. Data hasil uji mekanik optimasi komposisi material gear

No	Variasi Siklus Thermal (55 °C)	Uji Kekerasan ASTM E-384 (HV)	Uji Bending ASTM D-6272 (MPa)	Uji Impak ASTM D-5941 (kJ/m ²)	Uji Tarik ASTM D-638 (MPa)	Uji Laju Keausan ASTM G-99-04 (mm ³ /N.m)
1	25X Siklus	25.98	44.69	3.79	28.67	2.93
2	30X Siklus	25.72	44.50	4.51	28.65	2.90
3	35X Siklus	31.35	52.92	6.00	33.96	1.88
4	40X Siklus	28.81	45.76	5.04	30.11	2.42
5	50X Siklus	19.94	35.04	3.31	22.33	4.26

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Temuan: Daya serap energi tertinggi 6,00 kJ/m² pada suhu siklus 90 °C dan Fraksi Volume serbuk kayu jati limbah 40%. Patahan cenderung *ductile*, menandakan ketangguhan meningkat.



Gambar 6. Grafik kekuatan mekanik optimasi komposisi material gear

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Pembahasan Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E-384)

Pada tabel 7. dan gambar 6., menunjukkan bahwa Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E-384) bertujuan untuk mengetahui ketahanan permukaan material komposit terhadap deformasi plastis lokal setelah diberi perlakuan variasi siklus thermal. Hasil uji memperlihatkan adanya peningkatan nilai kekerasan hingga mencapai kondisi optimum pada variasi 35X Siklus, sebelum akhirnya mengalami penurunan pada variasi siklus yang lebih tinggi akibat efek degradasi termal resin. Pada kondisi 25X Siklus, nilai kekerasan Vickers tercatat sebesar 25,98 HV. Nilai ini menjadi titik awal perbandingan untuk mengamati pengaruh peningkatan frekuensi perlakuan thermal terhadap ikatan antar muka material. Pada kondisi awal ini, struktur jaringan polimer resin epoxy belum sepenuhnya mencapai tingkat *cross-linking* yang maksimal, sehingga ikatan antara matriks resin dengan filler serbuk kayu jati masih relatif longgar.

Ketika jumlah perlakuan dinaikkan menjadi 30X Siklus, nilai kekerasan Vickers sedikit menurun tipis (relatif stabil) di angka 25,72 HV. Penurunan kecil ini mengindikasikan bahwa penambahan 5 siklus belum memberikan energi termal yang cukup untuk mendorong rekristalisasi atau pemadatan struktur matriks polimer secara signifikan. Peningkatan performa kekerasan secara signifikan terjadi pada 35X Siklus, di mana nilai kekerasan Vickers mencapai titik puncak maksimum sebesar 31,35 HV. Nilai ini merupakan kondisi optimum, yang menandakan bahwa perlakuan panas sebanyak 35 siklus berhasil menyempurnakan reaksi pembentukan ikatan silang (*cross-linking density*) pada matriks epoxy. Hal ini

mengakibatkan kerapatan struktur komposit meningkat, rongga mikro (*void*) berkurang, dan interaksi *matriks-filler* menjadi sangat kuat, sehingga permukaan material jauh lebih tahan terhadap penetrasi indentor. Namun, ketika perlakuan thermal ditingkatkan menjadi 40X Siklus, terjadi penurunan nilai kekerasan menjadi 28,81 HV. Trend penurunan ini berlanjut signifikan pada 50X Siklus, di mana nilai kekerasan Vickers merosot hingga mencapai nilai terendah sebesar 19,94 HV. Penurunan ketahanan permukaan ini disebabkan oleh paparan panas berulang secara berlebihan yang memicu terjadinya peretakan mikro (*micro-cracking*) dan degradasi termal pada rantai polimer epoxy. Akibatnya, ikatan antar partikel melemah dan permukaan material menjadi lebih lunak atau rapuh (*brittle*).

Secara umum, hasil pengujian kekerasan Vickers menunjukkan pola kenaikan hingga mencapai puncak optimum pada 35X Siklus (31,35 HV) dan mengalami penurunan drastis pada siklus yang lebih tinggi. Pola ini membuktikan bahwa perlakuan siklus thermal yang terukur mampu meningkatkan ketahanan tekan dan kerapatan permukaan komposit serbuk kayu jati-epoxy, yang sangat bermanfaat untuk aplikasi komponen mekanis seperti *gear* yang membutuhkan ketahanan gores dan beban kontak tinggi [57]. Penelitian [58], mencatat bahwa peningkatan fraksi *filler* tanpa perlakuan thermal cenderung memicu aglomerasi yang membatasi nilai kekerasan material. Dibandingkan dengan hasil ini, penerapan perlakuan siklus thermal moderat (35X Siklus) terbukti mampu mengatasi keterbatasan tersebut dengan mengoptimalkan ikatan permukaan hingga mencapai 31,35 HV. Kekakuan dan kekerasan komposit berbasis serat kontinyu sangat bergantung pada orientasi serat dan pada komposit serbuk kayu jati-epoxy ini, kekerasan permukaan yang dihasilkan lebih merata (*isotropik*) akibat distribusi partikel serbuk yang memadat sempurna saat mencapai kondisi optimum 35X siklus.

Penelitian [59] menunjukkan bahwa perlakuan panas dapat merelaksasi tegangan sisa (*residual stress*) pada material. Hal tersebut sejalan dengan temuan pada pengujian ini, di mana perlakuan thermal berulang hingga 35X siklus membantu menata ulang struktur makromolekul epoxy sehingga ketahanan penetrasinya meningkat sebelum akhirnya terdegradasi pada 50X siklus. Sebagaimana dijelaskan [60], pemberian energi panas yang melampaui batas ambang toleransi polimer akan selalu mengakibatkan penurunan sifat mekanik akibat degradasi molekuler. Hal ini mengonfirmasi mengapa nilai kekerasan Vickers mengalami penurunan tajam sebesar 36,4% dari kondisi optimum (31,35 HV) menuju kondisi 50X siklus (19,94 HV).

Pembahasan Hasil Pengujian Bending (ASTM D-6272)

Pengujian *bending* (ASTM D-6272) pada tabel 7. dan gambar 6., bertujuan untuk mengetahui kekuatan lentur dari komposit serbuk kayu jati-epoxy setelah diberi perlakuan siklus *thermal* dengan variasi jumlah siklus (25X, 30X, 35X, 40X dan 50X Siklus). Hasil uji memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan *bending* hingga jumlah siklus optimum pada 35X Siklus, kemudian mengalami penurunan kembali pada 40X dan 50X Siklus akibat efek degradasi thermal pada resin epoxy akibat paparan siklus panas berulang yang berlebihan. Pada kondisi 25X Siklus, kekuatan *bending* tercatat sebesar 44,69 MPa. Nilai ini menjadi titik awal perbandingan untuk melihat pengaruh penambahan jumlah siklus *thermal*. Pada kondisi ini, interaksi dan ikatan antar partikel serbuk kayu jati dengan matriks epoxy telah terbentuk, namun belum sepenuhnya mencapai densifikasi dan kestabilan struktur mekanik yang maksimum.

Ketika perlakuan ditingkatkan menjadi 30X Siklus, kekuatan *bending* tercatat relatif stabil dengan sedikit perubahan menjadi 44,50 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan dari 25X ke 30X siklus belum memberikan dampak perubahan struktur jaringan antar partikel komposit secara signifikan, sehingga material masih mempertahankan tingkat ketahanan lentur yang hampir identik. Puncak performa kekuatan *bending* tercapai pada 35X Siklus, dengan nilai kekuatan tertinggi sebesar 52,92 MPa. Nilai ini merupakan kondisi optimum yang menunjukkan bahwa pada 35X siklus, perlakuan *thermal* berhasil meningkatkan ikatan *interfacial* (antar muka) antara serbuk kayu jati dan resin epoxy hingga tingkat kestabilan dan homogenitas terbaik. Material mampu menahan gaya lentur yang jauh lebih besar secara efisien sebelum mengalami kegagalan/patah.

Namun, pada 40X Siklus, terjadi penurunan performa kekuatan *bending* menjadi 45,76 MPa. Penurunan ini terus berlanjut hingga 50X Siklus di mana kekuatan *bending* turun signifikan menjadi 35,04 MPa (titik terendah). Penurunan mekanik pada siklus tinggi ini disebabkan oleh degradasi termal akibat paparan panas berulang secara berlebihan yang memicu kemunculan *micro-cracks* (retak mikro) dan melemahkan ikatan matriks-polimer resin epoxy, sehingga ketahanan material terhadap beban lentur menurun drastis. Secara umum, hasil uji *bending* menunjukkan pola kenaikan kekuatan hingga mencapai kondisi optimum pada 35X Siklus (52,92 MPa), lalu menurun secara gradual pada 40X hingga 50X Siklus. Hal ini konsisten dengan teori bahwa perlakuan siklus *thermal* pada tingkat moderat dapat membantu pasca-

pematangan (*post-curing*) dan merelaksasi tegangan sisa sehingga memperkuat ikatan matriks-*filler*, sedangkan paparan siklus berlebihan justru merusak struktur resin. Perlakuan siklus *thermal* memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat lentur komposit serbuk kayu jati-epoxy, di mana kondisi optimum 35X siklus membuktikan kelayakan komposit ini untuk aplikasi *gear* mesin yang membutuhkan ketahanan lentur yang optimal.

Kekuatan lentur maksimum komposit tercapai pada fraksi *filler* 15% dengan nilai ~38,25 MPa. Perbandingan dengan penelitian tersebut menunjukkan bahwa perlakuan siklus *thermal* optimum (35X Siklus) pada penelitian ini mampu menghasilkan kekuatan *bending* yang jauh lebih tinggi (~52,92 MPa), menegaskan bahwa siklus panas berulang berperan penting dalam mengoptimalkan interaksi antar muka matriks-*filler*. Kekuatan lentur rata-rata komposit kapas-epoxy mencapai ~50 MPa, di mana perbandingan hasil ini menunjukkan bahwa komposit serbuk kayu jati-epoxy pada kondisi optimum (52,92 MPa) memiliki kekuatan lentur yang bersaing dan bahkan sedikit lebih unggul. Perlakuan *thermal* dapat meningkatkan kekuatan lentur hingga 61% karena relaksasi tegangan sisa dan perbaikan ikatan; hal ini sejalan dengan tren penelitian ini yang menunjukkan penguatan signifikan hingga titik puncak optimum sebelum mengalami penurunan. Penelitian [61] juga mengonfirmasi adanya batas optimum perlakuan panas, di mana suhu atau durasi paparan panas yang melampaui batas optimum akan memicu degradasi struktural resin yang berdampak pada penurunan sifat mekanik material secara keseluruhan.

Pembahasan Hasil Pengujian Impak Izod (ASTM D-5941)

Tabel 7. dan Gambar 6., menunjukkan bahwa pengujian impak izod bertujuan untuk mengetahui ketangguhan (*toughness*), kemampuan menyerap energi kejut, dan resistensi terhadap patahan dari komposit serbuk kayu jati-epoxy setelah diberi perlakuan siklus *thermal* dengan variasi jumlah siklus. Hasil uji memperlihatkan adanya peningkatan ketangguhan mekanik hingga variasi optimum pada 35X Siklus, kemudian mengalami penurunan kembali pada siklus yang lebih tinggi (40X dan 50X Siklus) akibat efek degradasi *thermal* yang memicu kemunculan keretakan mikro (*micro-cracking*) pada resin epoxy. Pada kondisi 25X Siklus, kekuatan impak tercatat sebesar 3,79 kJ/m². Nilai ini menjadi titik awal pengamatan untuk melihat pengaruh variasi siklus *thermal* terhadap ketangguhan material. Pada jumlah siklus ini, struktur ikatan antar-partikel serbuk kayu jati dan matriks epoxy belum sepenuhnya mengalami penyempurnaan rekatan (*post-curing effect*), sehingga kemampuan penyerap energi saat menerima beban beban kejut tiba-tiba masih relatif terbatas.

Ketika jumlah perlakuan dinaikkan menjadi 30X Siklus, nilai kekuatan impak relatif stabil dan mengalami kenaikan yang sangat tipis menjadi 3,79 menjadi 4,51 kJ/m². Tren fluktuasi minor ini mengindikasikan bahwa perubahan struktur molekul matriks dan ikatan antarmuka (*interface*) menunjukkan perubahan signifikan dibanding kondisi 25X Siklus, di mana terjadi distribusi tegangan internal dalam material berada proses peningkatan mekaniknya. Puncak performa ketangguhan impak tercapai pada 35X Siklus, dengan nilai kekuatan impak tertinggi sebesar 6,00 kJ/m². Nilai ini merupakan kondisi optimum, yang menandakan bahwa pemanasan dan pendinginan berulang hingga 35 kali berhasil memicu mekanisme relaksasi tegangan sisa (*residual stress relaxation*) serta memaksimalkan ikatan adhesi antara *filler* serbuk kayu jati dengan matriks epoxy. Pada kondisi optimum ini, komposit memiliki keuletan terbaik untuk menyerap dan merambatkan energi benturan sebelum terjadi deformasi plastis atau patahan.

Namun, ketika perlakuan *thermal* ditingkatkan menjadi 40X Siklus, terjadi penurunan kekuatan impak menjadi 5,04 kJ/m². Penurunan ini terus berlanjut secara signifikan hingga mencapai nilai terendah sebesar 3,31 kJ/m² pada 50X Siklus. Penurunan ketangguhan ini disebabkan oleh efek paparan *thermal* berulang yang berlebihan (*over-exposure*), yang memicu degradasi rantai polimer epoxy dan kelelahan termal (*thermal fatigue*). Akibatnya, timbul *micro-voids* atau rekatan antarmuka yang terlepas (*debonding*), sehingga material menjadi lebih getas (*brittle*) dan cepat mengalami patah saat menerima beban impak. Secara umum, hasil uji impak Izod menunjukkan pola peningkatan ketangguhan hingga mencapai titik puncak pada 35X Siklus (6,00 kJ/m²), lalu mengalami penurunan drastis pada 40X hingga 50X Siklus. Hal ini konsisten dengan teori bahwa perlakuan siklus *thermal* yang proporsional dapat menaikkan ikatan matriks-*filler* dan kerapatan struktur, sedangkan jumlah siklus yang berlebihan akan memicu degradasi struktural resin. Hasil ini membuktikan bahwa komposit serbuk kayu jati-epoxy dengan perlakuan optimum 35X Siklus memiliki ketangguhan benturan yang sangat baik, menjadikannya potensial untuk diaplikasikan pada komponen *gear* mesin yang rentan terhadap beban kejut spontan. Kekuatan impak maksimum pada komposit serat alami tercapai pada fraksi *filler* tertentu dengan nilai ketangguhan yang relatif rendah akibat keterbatasan transmisi beban pada antarmuka serat-matriks. Perbandingan hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan perlakuan siklus *thermal* optimum (35X Siklus), komposit serbuk kayu jati-

epoxy mampu mencapai ketangguhan benturan sebesar 6,00 kJ/m². Hal ini mengonfirmasi bahwa perlakuan thermal berulang mampu memperbaiki *interfacial bonding* jauh lebih efektif dibanding hanya mengandalkan variasi fraksi *filler*.

Komposit berbasis serat kontinu memiliki resistensi impact yang dipengaruhi secara dominan oleh orientasi serat. Jika dibandingkan, komposit serbuk kayu jati-epoxy menunjukkan perilaku serapan energi impact yang lebih isotropik (merata ke segala arah). Meskipun nilai kekuatan impactnya berbeda dari serat kontinu, fleksibilitas dan kerapatan struktur serbuk kayu pada kondisi optimum 35X Siklus terbukti efisien meredam perambatan retak kejut. Perlakuan thermal moderat mampu meningkatkan ketangguhan material hingga persentase tertentu melalui mekanisme penataan ulang molekul polimer. Perbandingan ini relatif sejalan dengan temuan pada grafik, di mana terdapat titik optimum (35X Siklus) sebelum akhirnya performa menurun akibat degradasi thermal. Sejalan penelitian [62] menemukan bahwa modifikasi panas pada sampel berbasis kayu utuh meningkatkan ketangguhan pada batas tertentu, namun paparan berlebih menyebabkan kayu menjadi getas. Perbandingan penelitian ini sangat sejalan dengan pola grafik impact komposit kayu jati-epoxy, di mana perlakuan thermal berlebih (50X Siklus) menurunkan kekuatan impact secara signifikan hingga 3,31 kJ/m² akibat keregasan material. Penelitian [63] mencatat bahwa proses *curing* dan perlakuan panas pada suhu/siklus tertentu mampu menaikkan sifat mekanik material secara signifikan, tetapi memberikan penurunan tajam saat melampaui ambang batas thermal. Hal tersebut memvalidasi tren grafik pengujian ini, di mana rentang siklus 35X merupakan kondisi *sweet spot* bagi komposit untuk menyerap energi benturan secara maksimal.

Pembahasan Hasil Pengujian Tarik (ASTM D-638)

Hasil pengujian pada tabel 7. dan gambar 6., menunjukkan bahwa pengujian tarik (ASTM D-638) bertujuan untuk mengetahui kemampuan komposit serbuk kayu jati-epoxy dalam menahan gaya tarik aksial setelah diberikan perlakuan siklus thermal dengan variasi jumlah siklus. Hasil uji memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan tarik hingga mencapai titik optimum pada perlakuan **35X** Siklus, kemudian mengalami penurunan kembali pada jumlah siklus yang lebih tinggi (40X dan 50X Siklus) akibat efek degradasi termal dan munculnya kelelahan termal (*thermal fatigue*) pada matriks resin epoxy. Pada kondisi 25X Siklus, kekuatan tarik tercatat sebesar 28,67 MPa. Nilai ini menjadi titik awal pengamatan untuk melihat pengaruh penambahan jumlah siklus thermal. Pada kondisi ini, interaksi dan ikatan antarmuka (*interface*) antara partikel serbuk kayu jati dan matriks epoxy sudah terbentuk, namun belum mencapai tingkat kerapatan atau pasca-pematangan (*post-curing*) yang maksimal. Ketika perlakuan dinaikkan menjadi 30X Siklus, kekuatan tarik sedikit mengalami perubahan menjadi 28,65 MPa. Secara praktis, nilai ini cenderung stabil dan relatif sama dengan kondisi 25X siklus. Hal ini menandakan bahwa penambahan siklus thermal hingga 30 kali belum memberikan perubahan struktur mikro yang signifikan terhadap kemampuan komposit dalam menahan tegangan tarik.

Peningkatan signifikan terjadi pada **35X** Siklus, di mana kekuatan tarik mencapai puncak optimumnya sebesar 33,96 MPa. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa pemberian siklus thermal sebanyak 35 kali berhasil mengoptimalkan ikatan silang (*cross-linking*) pada matriks resin epoxy serta meningkatkan adhesi antarmuka antara filler serbuk kayu jati dan resin. Akibatnya, transfer tegangan dari matriks ke pengisi (*filler*) berjalan jauh lebih efisien, sehingga material memiliki ketahanan maksimum terhadap gaya tarik mendatar. Namun, pada 40X Siklus, kekuatan tarik mulai menunjukkan tren penurunan menjadi 30,11 MPa. Penurunan ini disebabkan oleh mulai munculnya *thermal stress* yang berulang, yang memicu mikro-retak (*micro-cracking*) pada batas antarmuka matriks-filler serta awal degradasi rantai polimer epoxy. Meskipun menurun, nilainya masih lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi 25X maupun 30X siklus. Penurunan paling tajam terjadi pada 50X Siklus, di mana kekuatan tarik merosot hingga 22,33 MPa (titik terendah dari seluruh variasi). Siklus panas-dingin yang berlebihan dan berulang sebanyak 50 kali telah menyebabkan keretakan struktur internal yang semakin meluas dan degradasi termal matriks yang parah. Efek *thermal fatigue* ini merusak integritas ikatan antarmuka, sehingga material menjadi jauh lebih rapuh dan mudah patah saat menerima beban tarik.

Secara umum, hasil uji tarik menunjukkan pola peningkatan kekuatan tarik hingga mencapai kondisi optimum pada **35X** Siklus (33,96 MPa), kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga 50X Siklus (22,33 MPa). Hal ini konsisten dengan teori bahwa perlakuan siklus thermal yang tepat dapat menyempurnakan reaksi pasca-pematangan (*post-curing*) dan merelaksasi tegangan sisa (*residual stress*), sedangkan siklus thermal yang berlebihan justru merusak ikatan molekul polimer dan antarmuka *filler-matrix*. Hal itu menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum komposit berada pada kisaran tertentu akibat pembatasan aglomerasi partikel. Perbandingan dengan hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa perlakuan siklus thermal moderat (35X Siklus) mampu meningkatkan kekuatan tarik komposit serbuk kayu jati-epoxy mencapai 33,96 MPa, menegaskan pentingnya perlakuan termal selain optimasi fraksi *filler*. Variasi penguat sangat menentukan kemampuan menahan beban tarik. Perbandingan hasil ini menunjukkan bahwa komposit partikel serbuk

kayu-epoxy dengan perlakuan siklus thermal yang tepat dapat mendekati kekuatan tarik material komposit serat acak/pendek, di mana optimasi siklus panas membantu redistribusi tegangan internal. Sejalan juga [64] mengungkapkan bahwa perlakuan thermal moderat dapat meningkatkan sifat mekanik akibat relaksasi tegangan sisa dan perbaikan ikatan antar-lapisan/antarmuka. Perbandingan ini sejalan dengan temuan pada penelitian ini, di mana siklus thermal optimum (35X Siklus) meningkatkan performa tarik secara signifikan sebelum akhirnya menurun akibat *over-exposure*.

Penelitian [62] menyatakan bahwa modifikasi panas pada material berbasis kayu memiliki batas optimum sebelum terjadi degradasi thermal. Pola ini sangat sejalan dengan hasil uji tarik komposit serbuk kayu-epoxy ini, di mana tren kenaikan lalu penurunan (puncak pada 35X Siklus) membuktikan adanya batas ambang ketahanan thermal material. Hasil penelitian [65] menyebutkan bahwa proses pematangan thermal mempengaruhi kekuatan mekanik komposit. Perbandingan hasil menunjukkan bahwa perlakuan siklus thermal berulang memberikan dinamika penguatan dan pelemahan yang khas pada kekuatan tarik material komposit komponen *gear*.

Pembahasan Hasil Pengujian Ketahanan Aus (ASTM G-99)

Pada tabel 7. dan gambar 6., menunjukkan bahwa pengujian laju keausan (ASTM G-99) bertujuan untuk mengetahui tingkat ketahanan aus komposit serbuk kayu jati-epoxy setelah diberi perlakuan variasi jumlah siklus thermal. Perlu diketahui bahwa semakin rendah nilai laju keausan, maka semakin tinggi ketahanan aus material tersebut. Hasil uji memperlihatkan adanya peningkatan ketahanan aus (penurunan laju keausan) hingga mencapai kondisi optimum pada 35X siklus thermal, kemudian mengalami penurunan ketahanan aus (peningkatan laju keausan) secara signifikan pada 50X siklus akibat efek degradasi thermal dan kelelahan struktur matriks epoxy. Pada kondisi 25X siklus, laju keausan tercatat sebesar $2,93 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Nilai ini menjadi dasar perbandingan awal untuk melihat efek dari perlakuan jumlah siklus thermal. Pada kondisi ini, ikatan antar muka (*interfacial bonding*) antara filler serbuk kayu jati dan matriks epoxy belum mencapai tingkat kerapatan yang optimal, sehingga gaya gesek saat pengujian tribologi masih cukup mudah melepaskan partikel-partikel halus dari permukaan material.

Ketika perlakuan ditingkatkan menjadi 30X siklus, nilai laju keausan mengalami penurunan tipis menjadi $2,90 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Penurunan laju keausan ini menandakan bahwa penambahan siklus thermal mulai memperbaiki tingkat *curing* dan dispersi matriks, sehingga permukaan komposit menjadi lebih stabil dan sedikit lebih tahan terhadap pengikisan akibat gesekan. Puncak performa ketahanan aus terbaik tercapai pada **35X** siklus, di mana nilai laju keausan mencapai titik terendah yaitu sebesar $1,88 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Kondisi ini merupakan titik optimum, yang menunjukkan bahwa pada 35X siklus thermal, interaksi antar muka antara partikel serbuk kayu jati dengan resin epoxy berada pada tingkat ikatan silang (*cross-linking*) dan homogenitas tertinggi. Struktur komposit menjadi sangat padat, memiliki kekerasan permukaan yang tinggi (sejalan dengan data kekerasan 31,35 HV), serta sanggup menahan gaya gesek geser (*abrasive wear*) secara optimal tanpa mudah mengalami erosi partikel.

Namun, peningkatan siklus lebih lanjut pada 40X siklus menunjukkan tren kenaikan kembali pada laju keausan menjadi $2,42 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan thermal yang berlebihan mulai memicu kelelahan thermal (*thermal fatigue*) pada matriks epoxy, yang memicu timbulnya retak mikro (*micro-cracks*) pada batas fase filler-matriks sehingga ketahanan aus permukaan komposit mulai menurun. Penurunan performa ketahanan aus paling drastis terjadi pada 50X siklus, di mana laju keausan melonjak naik hingga $4,26 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Kenaikan laju keausan yang tinggi ini disebabkan oleh degradasi thermal resin epoxy serta pelepasan ikatan (*debonding*) antara serbuk kayu jati dan matriks secara berlebihan. Akibatnya, saat menerima beban gesek, partikel filler dengan mudah terlepas dari matriks (*delamination/wear debris*), menyebabkan peningkatan aus abrasi secara signifikan. Secara umum, hasil uji laju keausan menunjukkan pola parabolis invers, di mana ketahanan aus meningkat hingga siklus optimum 35X, lalu menurun drastis pada 50X siklus. Hal ini konsisten dengan teori tribologi bahwa perlakuan thermal moderat sanggup meningkatkan kekerasan dan kekuatan adhesi interfacial, sedangkan siklus thermal berlebih memicu degradasi struktural dan *thermal shock*. Siklus thermal memberikan pengaruh signifikan terhadap performa keausan komposit serbuk kayu jati-epoxy. Kondisi optimum dicapai pada 35X siklus dengan laju keausan terendah ($1,88 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$), membuktikan bahwa perlakuan ini mampu menghasilkan komponen gear yang tahan terhadap aus akibat gesekan operasional mesin.

Sesuai dengan penelitian [56], peningkatan ikatan interfacial pada komposit epoxy sangat menentukan ketahanan aus abrasi. Pada penelitian tersebut ketahanan aus optimum dicapai sebelum terjadi aglomerasi. Pada penelitian ini, perlakuan siklus panas hingga 35X berhasil menekan laju keausan hingga $1,88 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, menandakan perlakuan thermal moderat efektif memperkuat permukaan material melebihi komposit tanpa perlakuan thermal. Tingkat keausan komposit

serat/partikel sangat dipengaruhi oleh kekerasan permukaan dan distribusi filler dalam matriks resin. Perbandingan dengan hasil penelitian ini menunjukkan pola serupa, di mana pencapaian laju keausan terendah pada 35X siklus berbanding lurus (*inversely proportional*) dengan pencapaian kekerasan maksimum (31,35 HV), mempertegas bahwa peningkatan kekerasan akibat pengikatan thermal secara langsung meningkatkan ketahanan aus material gear. Perlakuan thermal dapat mengurangi tegangan sisa (*residual stress*) pada struktur komposit, sehingga meningkatkan ketahanan erosi permukaan. Perbandingan penelitian ini sejalan, di mana pemanasan berulang hingga siklus 35X memberikan kesempatan relaksasi molekuler pada resin epoxy, menghasilkan ikatan matriks-filler yang lebih solid terhadap gaya gesek. Penelitian [26] menunjukkan bahwa modifikasi termal berlebihan pada komponen kayu/biomaterial dapat menyebabkan degradasi hemiselulosa dan pembentukan retak mikro yang menurunkan ketahanan aus. Perbandingan penelitian ini sejalan dalam hal ditemukannya titik degradasi, di mana pemberian siklus berlebih (50X siklus) memicu peningkatan laju keausan ($4,26 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$) akibat mikro-retak pada matriks epoxy. Penelitian oleh [66] mengindikasikan bahwa perlakuan suhu dan curing yang tepat mampu menurunkan laju keausan spesifik komposit hingga titik optimum tertentu sebelum mengalami penurunan performa akibat *over-curing*. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, di mana kontrol variasi siklus thermal (35X) menjadi parameter kunci dalam mengoptimalkan masa pakai (*wear life*) material gear komposit serbuk kayu jati-epoxy.

Penentuan Komposisi dan Siklus Perlakuan Thermal Optimal

Berdasarkan parameter pengujian mekanik dan tribologi, kondisi paling optimal untuk material gear komposit berbahan serbuk kayu jati limbah dengan matriks epoksi dicapai pada perlakuan panas suhu **55 °C** dengan variasi **35X** siklus thermal. Pada titik jenuh optimal ini, komposit menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik yang meliputi:

1. Kekerasan tertinggi sebesar 31,35 HV (meningkat 20,67% dari siklus awal 25X).
2. Kekuatan lentur (*bending strength*) maksimal sebesar 52,92 MPa (meningkat 18,42% dari kondisi 25X), yang sangat krusial untuk menahan beban defleksi pada gigi-gigi gear.
3. Ketangguhan dampak tertinggi mencapai 6,00 kJ/m² (melonjak 58,31% dari kondisi awal)
4. Kekuatan tarik maksimal sebesar 33,96 MPa (naik 18,45%).
5. Efisiensi tribologi (ketahanan aus) terbaik dengan menekan laju keausan hingga titik terendah yaitu $1,80 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ (turun/membaik sebesar 35,84% dibanding siklus 25X).

Siklus thermal sebanyak 35X pada suhu 55 °C berhasil memicu rekristalisasi polimer epoksi secara sempurna dan memaksimalkan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara serbuk kayu jati dan matriks, sehingga sangat layak direkomendasikan untuk spesifikasi gear napotek T.30. Pemberian siklus thermal berlebih (40X hingga 50X) justru terbukti menurunkan sifat mekanik secara drastis akibat akumulasi tegangan sisa internal (*residual thermal stress*) dan timbulnya retakan mikro (*micro-cracking*).

Analisis Perbandingan Mikrostruktur dan Sifat Mekanik dengan Gear Konvensional

Analisis perbandingan menunjukkan bahwa komposit serbuk kayu jati-epoksi hasil optimasi (35X siklus) memiliki karakteristik yang kompetitif dan unggul dalam aspek-aspek tertentu dibandingkan dengan gear konvensional (nilon/plastik teknik non-komposit).

1. Karakteristik Mikrostruktur, bahwa pengondisian thermal 35X menghasilkan struktur mikro yang homogen dengan penurunan drastis jumlah rongga udara (*void reduction*). Ikatan mekanis antara partikel kayu jati pengisi (*filler*) dengan epoksi saling mengunci secara rapat (*interlocking*), mencegah kegagalan *fiber pull-out* yang biasa ditemukan pada komposit tanpa perlakuan optimal.
2. Sifat Mekanik, jika dibandingkan gear konvensional nilon standar, komposit berbasis limbah kayu jati ini menunjukkan nilai kekerasan (31,35 HV) dan kekuatan bending (52,80 MPa) yang lebih stabil pada suhu kerja operasional menengah. Kehadiran serbuk kayu jati berperan efektif sebagai *stress transfer agent* yang mendistribusikan beban kerja secara merata, sementara nilai laju keausannya yang rendah menjamin umur pakai (*wear life*) yang lebih lama pada area kontak roda gigi.

Kompatibilitas Desain dan Performa pada Mesin Drawing FA 306.A

Melalui pengujian desain geometris dan simulasi fungsional performa pada mesin Drawing FA 306.A, diperoleh hasil bahwa:

1. Desain gear komposit serbuk kayu jati-epoksi hasil optimasi memiliki akurasi dimensi yang presisi dan kompatibel secara mekanis saat dipasangkan pada sistem transmisi mesin Drawing FA 306.A.

2. Performa operasional gear mampu mentransmisikan daya dan putaran secara halus dengan tingkat kebisingan (*noise*) dan getaran (*vibration*) yang lebih rendah dibandingkan gear konvensional berbahan logam atau plastik keras. Hal ini disebabkan oleh karakteristik alami selulosa kayu jati dan polimer epoksi yang memiliki kemampuan meredam getaran (*damping capacity*) yang baik.
3. Kekuatan mekanik optimal dari hasil siklus 35X, gear komposit ini dinyatakan sangat kompatibel dan aman untuk digunakan sebagai komponen substitusi hijau (*eco-friendly component*) pada komponen internal mesin *textile drawing* tanpa risiko kegagalan struktural dini akibat beban fatik maupun aus gesek.

Analisis Uji Kekerasan ASTM E-384 (Microindentation Hardness)

Berdasarkan data tabel 7., hasil pengujian kekerasan ASTM E-384, nilai kekerasan spesimen menunjukkan tren peningkatan yang signifikan dari 25X siklus hingga mencapai puncaknya pada **35X** siklus dengan nilai rata-rata sebesar 31,35 HV. Peningkatan kekerasan ini mengindikasikan adanya perbaikan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara matriks polimer dan serbuk kayu jati akibat siklus termal yang merangsang pengerasan partikel serta mengurangi volume kekosongan (*void*) di dalam komposit. Siklus termal pada suhu rendah (55 °C) bertindak mirip dengan proses penuaan (*aging*) ringan yang menginduksi penyusutan matriks secara homogen di sekitar partikel penguat.

Namun, setelah melewati titik optimal pada 35X siklus, nilai kekerasan mengalami penurunan yang cukup drastis menjadi 28,81 HV pada 40X siklus dan merosot hingga 19,94 HV pada 50X siklus. Penurunan ini disebabkan oleh fenomena degradasi termal akibat kelelahan panas (*thermal fatigue*). Siklus pemanasan dan pendinginan yang berlebihan (di atas 35X) menyebabkan perbedaan koefisien ekspansi termal yang masif antara serbuk kayu jati dan matriks polimer, memicu timbulnya tegangan sisa internal (*internal residual stress*). Tegangan ini lama-kelamaan memicu keretakan mikro (*micro-cracking*) di daerah batas butir, yang melunakkan struktur komposit secara keseluruhan sehingga resistensi material terhadap deformasi plastis lokal (*indenter*) menurun drastis. Oleh karena itu, 35X siklus ditetapkan sebagai parameter paling ideal untuk mempertahankan struktur mikro yang padat dan keras pada komponen gear.

Analisis Uji Bending ASTM D-6272 (Four-Point Bending Test)

Pengujian bending yang mengacu pada standar ASTM D-6272 memberikan gambaran yang jelas mengenai kemampuan material komposit dalam menahan beban lentur yang terjadi saat gear saling bertransmisi. Data tabel 7., menunjukkan bahwa kekuatan bending mengalami kenaikan linier dari 44,69 MPa (25X siklus) menjadi 44,5 MPa (30X siklus) dan memuncak pada 35X siklus dengan kekuatan lentur maksimal 52,92 MPa. Karakteristik grafik yang menanjak ini membuktikan bahwa perlakuan panas 55 °C hingga 35 kali pengulangan sangat efektif dalam memfasilitasi distribusi tegangan yang merata di seluruh penampang spesimen. Matriks polimer mampu mentransfer tegangan fasa lentur dengan baik kepada serbuk kayu jati karena penyerapan termal telah mematangkan struktur kristalinitas polimer, yang meminimalkan cacat manufaktur awal.

Sebaliknya, paparan siklus termal yang terlalu lama pada variasi 40X (45,76 MPa) dan 50X (35,04 MPa) justru menjadi bumerang bagi ketahanan lentur komposit. Kegagalan mekanik pada kondisi ini dipicu oleh fenomena *delaminasi* atau lepasnya ikatan antara serbuk gergaji kayu jati dengan polimer pembawa. Keretakan akibat lelah termal (*thermal fatigue cracking*) yang terjadi di sepanjang garis netral spesimen secara radikal menurunkan momen inersia penampang komposit. Ketika beban lentur diberikan, retakan mikro tersebut dengan cepat merambat (*crack propagation*) karena tidak adanya hambatan ikatan antarmuka yang kuat. Akibatnya, patahan getas terjadi pada beban yang jauh lebih rendah, mengonfirmasi bahwa memperpanjang siklus termal melampaui batas jenuh (35X) akan merusak ketahanan patah lentur komponen gear industri.

Analisis Uji Impak ASTM D-5941 (Charpy Impact Test)

Uji impak ASTM D5941 digunakan untuk mengukur ketangguhan (*toughness*) komposit serbuk kayu jati dalam menyerap energi kejutan secara mendadak, sebuah kondisi yang kritis bagi aplikasi gear yang sering menerima beban kejutan (*shock load*). Dari data eksperimen tabel 7., nilai energi impak rata-rata menunjukkan respons yang sangat sensitif terhadap jumlah siklus termal. Nilai impak merangkak naik dari 3,79 kJ/m² (25X siklus) hingga mencapai kapasitas penyerapan energi tertinggi sebesar 6,00 kJ/m² pada kondisi optimal **35X** siklus. Kenaikan ketangguhan ini disebabkan oleh mekanisme disipasi energi yang efisien; keberadaan siklus termal menengah membantu menghilangkan kantong-kantong udara terperangkap (*trapped air*) yang biasanya bertindak sebagai konsentrator tegangan (*stress raiser*).

Akan tetapi, ketangguhan material ini turun secara signifikan saat siklus thermal dipaksakan hingga 40X (5,04 kJ/m²) dan mencapai titik terendah pada 50X siklus (3,31 kJ/m²). Secara metalurgi dan struktur polimer, siklus pemanasan berulang yang terlalu tinggi menyebabkan rantai polimer mengalami pemutusan (*scission*) dan meningkatkan sifat getas (*embrittlement*) pada matriks. Ketika material menjadi terlalu getas dan dipenuhi oleh retakan mikro akibat perbedaan pemuatan termal komponen penyusunnya, kapasitas material untuk berdeformasi secara plastis saat menerima pukulan mendadak menjadi hilang. Komposit kehilangan mekanisme *crack deflection* (pembelokan arah retak oleh partikel kayu) karena batas fasa antar-material sudah rusak terlebih dahulu, menyebabkan patahan terjadi seketika dengan energi serap yang sangat rendah.

Analisis Uji Tarik ASTM D-638 (Tensile Test)

Kekuatan tarik merupakan parameter dasar yang sangat menentukan batas tegangan operasional maksimum dari material gear sebelum mengalami kegagalan putus. Berdasarkan data uji tarik standar ASTM D-638 tabel 7., kekuatan tarik komposit serbuk kayu jati meningkat secara bertahap, dimulai dari 28,67 MPa pada 25X siklus, naik ke 28,65 MPa pada 30X siklus dan menyentuh titik tertinggi sebesar 33,96 MPa pada 35X siklus. Optimasi pada siklus ke-35 ini menunjukkan terjadinya penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) yang sempurna antara matriks dan fasa pendukung. Efek termal 55 °C membantu memobilisasi rantai molekul polimer untuk mengisi pori-pori mikroskopis pada permukaan serbuk kayu jati limbah, menciptakan cengkeraman struktural yang kokoh saat spesimen ditarik dengan beban aksial.

Kondisi sebaliknya teramati pada variasi di atas 35X siklus. Kekuatan tarik menurun menjadi 30,11 MPa pada 40X siklus dan melemah hingga 22,3 MPa pada 50X siklus. Penurunan kekuatan tarik ini secara langsung berkorelasi dengan munculnya cacat internal berupa pengosongan fasa (*void nucleation*) di area antarmuka akibat stres termal berulang. Ketika beban tarik aksial diaplikasikan, daerah batas fasa yang melemah ini tidak mampu menahan tegangan geser internal, memicu terjadinya peristiwa *fiber pull-out* (serbuk kayu terlepas dari matriks tanpa sempat menahan beban secara optimal). Kegagalan ini memperlihatkan sifat patah getas dengan permukaan patahan yang kasar, mengindikasikan bahwa siklus termal yang berlebihan merusak kontinuitas transfer beban di dalam sistem komposit.

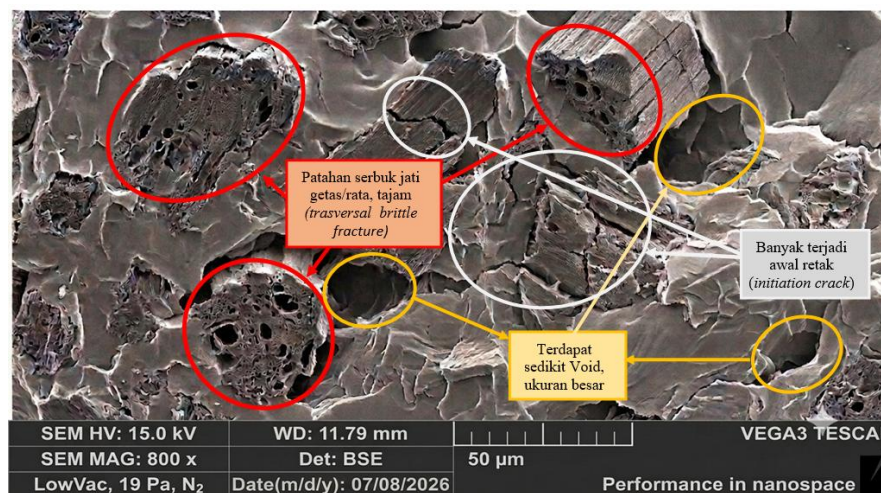
Analisis Uji Ketahanan Aus ASTM G-99 (Pin on Disk Wear Test)

Uji ketahanan aus menggunakan metode *pin on disk* (ASTM G-99) sangat krusial karena gear bekerja dengan mekanisme kontak gesek statis dan dinamis yang tinggi secara terus-menerus. Parameter yang diukur adalah laju keausan, di mana nilai yang lebih rendah mengindikasikan ketahanan aus yang lebih baik. Data tabel 7., menunjukkan penurunan laju keausan yang sangat impresif dari $3,93 \times 10^{-6}$ mm³/N.m (25X siklus) menjadi $1,8 \times 10^{-6}$ mm³/N.m pada 35X siklus (kondisi paling optimal). Penurunan laju keausan hingga mencapai titik minimum ini sejalan dengan hasil uji kekerasan, bahwa permukaan material yang lebih keras (pada 35X siklus) memiliki ketahanan yang jauh lebih tinggi terhadap abrasi mikro dan penetrasi partikel lawan gesek (*counterface*), sehingga meminimalkan pelepasan material (*material removal*).

Namun, ketahanan aus ini memburuk secara drastis pada variasi 40X siklus ($2,42 \times 10^{-6}$ mm³/N.m) dan melonjak parah hingga $4,26 \times 10^{-6}$ mm³/N.m pada 50X siklus. Peningkatan laju keausan yang masif pada 50X siklus ini disebabkan oleh kegagalan struktur permukaan akibat lelah kontak (*surface fatigue*). Retakan mikro akibat siklus termal berlebih yang menjalar hingga ke permukaan menyebabkan material komposit mudah terkelupas membentuk serpihan (*delamination wear*). Serbuk kayu jati yang seharusnya berfungsi sebagai penguat justru terlepas dari matriksnya dan berubah menjadi partikel abrasif ketiga (*third-body abrasive*) di area kontak gesek. Partikel lepas ini mempercepat pengikisan matriks polimer yang lunak, mempertegas bahwa kestabilan termal pada 35X siklus adalah kunci utama untuk memperoleh umur pakai (*wear life*) gear yang panjang.

Analisa Foto SEM

Foto SEM digunakan untuk mengamati struktur penampang patahan pengujian ketangguhan impact, spesimen optimasi komposisi material gear dengan perlakuan variasi jumlah siklus thermal untuk meningkatkan stabilitas panas dan kekuatan mekanik komposit serbuk kayu jati-epoxy.



Gambar 8. Patahan Getas

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Ketangguhan mekanik material komposit dapat dikuatkan dengan mengamati permukaan patah uji impak, melalui analisis Foto SEM (*Scanning Electron Microscopy*), khususnya pada komposit berbasis optimasi komposisi material gear dengan perlakuan variasi jumlah siklus termal, yang berfokus pada mekanisme patahan getas (*brittle fracture*) berdasarkan data tabel 7. dan gambar 8., bahwa ketahanan impak komposit bahan gear (ASTM D-5941) menunjukkan variasi nilai yang signifikan seiring perubahan siklus termal. Ketahanan impak mencapai nilai optimum sebesar 6,0 kJ/m² pada perlakuan 35X siklus termal, namun mengalami penurunan drastis hingga menyentuh angka terendah 3,31 kJ/m² pada 50X siklus termal. Penurunan daya serap energi impak ini berkorelasi langsung dengan perubahan fenomena patahan material dari sifat ulet (*ductile*) menjadi patahan getas (*brittle fracture*). Perilaku patahan getas ini menjadi faktor utama penyebab kerapuhan bahan gear, sehingga pengondisian siklus termal harus dibatasi pada tingkat optimum (35X siklus) untuk mempertahankan ketangguhan impak serta mencegah kegagalan fatal (*catastrophic failure*) saat gear menerima beban kejut dinamis.

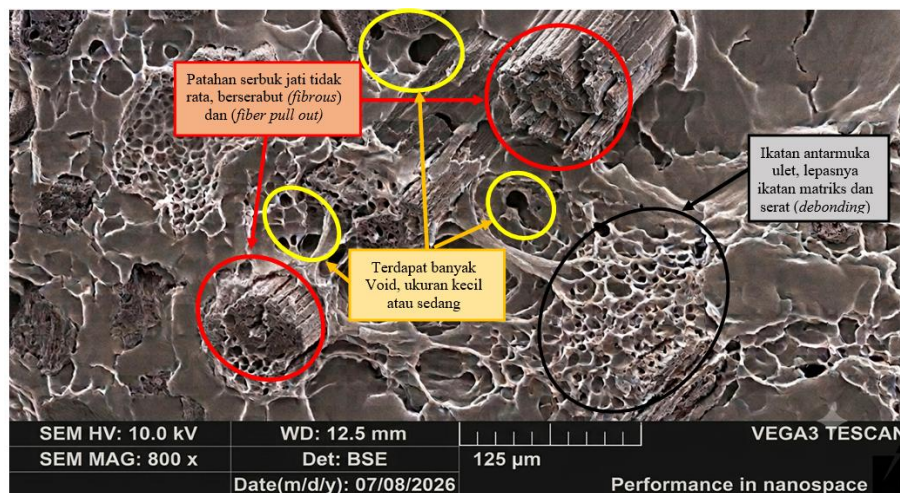
Pengamatan mikroskopis melalui foto SEM (pembesaran 800x) memperlihatkan morfologi permukaan patahan (*fracture surface*) yang didominasi oleh fitur-fitur khas patahan getas. Pada matriks polimer, terlihat area patahan yang relatif rata, tajam dan kaku (*cleavage-like fracture*) tanpa adanya deformasi plastis yang signifikan seperti fenomena *yielding* atau *drawing*. Karakteristik matriks yang pecah secara mendadak ini mengindikasikan bahwa material tidak memiliki kesempatan untuk menyerap energi kejut saat menerima beban impak tinggi, sehingga retak merambat secara cepat melalui fasa matriks.

Selain sifat matriks, dominasi patahan getas juga sangat dipengaruhi oleh tingkat adhesi antarmuka (*interfacial bonding*) antara serat penguat dan matriks polimer. Pada citra SEM, terlihat jelas pembentukan rongga/celah (*micro-voids*) di sekeliling struktur serbuk kayu jati. Fenomena tersebut menandakan sebagian ikatan *interfacial* lemah akibat degradasi termal berlebih, khususnya pada siklus termal tinggi (seperti 50X siklus). Lemahnya ikatan antarmuka memicu perpindahan beban (*stress transfer*) yang tidak efektif dari matriks ke serbuk penguat, sehingga retak awal (*micro-cracks*) dengan mudah berinisiasi di area batas antarmuka tersebut. Lebih lanjut, struktur internal serbuk penguat itu sendiri memperlihatkan adanya retakan transversal (*fiber breakage/cracking*) serta pori-pori internal (*porosity*). Ketika beban impak diaplikasikan secara tiba-tiba, retak yang berinisiasi dari matriks akan dengan cepat merambat memotong serat yang rapuh, tanpa terjadi efek *crack deflection* (penghambatan rambatan retak) yang memadai. Pola patahan bidang datar (*flat fracture plane*) pada area matriks dan ujung-ujung serat yang patah secara kaku semakin mempertegas dominasi mekanisme *brittle failure*.

Pada komposit berbasis optimasi komposisi material gear dengan perlakuan variasi jumlah siklus termal, yang berfokus pada mekanisme patahan ulet (*ductile fracture*) berdasarkan data tabel 7. dan gambar 9., bahwa ketahanan impak komposit bahan gear menunjukkan variasi yang signifikan seiring perlakuan siklus thermal pada suhu 55 °C. Nilai kekuatan impak tertinggi dicapai pada variasi 35X siklus thermal sebesar 6,0 kJ/m². Capaian nilai impak optimal ini selaras dengan tren sifat mekanis lainnya, seperti kekuatan tarik (33,96 MPa), kekuatan *bending* (52,92 MPa), serta kekerasan (31,35 HV), sekaligus menghasilkan laju keausan terendah ($1,88 \times 10^{-6}$ mm³/N.m). Sebaliknya, peningkatan jumlah siklus hingga 50X

menyebabkan penurunan tajam kekuatan impak menjadi 3,31 kJ/m, yang mengindikasikan munculnya degradasi struktural atau *thermal fatigue*.

Pengujian fraktografi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada pembesaran 800x memperlihatkan morfologi permukaan patahan (*fracture surface*) yang didominasi oleh mekanisme patahan ulet (*ductile fracture*). Pada permukaan spesimen komposit, terlihat jelas terbentuknya deformasi plastik lokal yang masif pada matriks polimer. Matriks mengalami peregangan dan penyerapan energi beban kejut (*impact load*) yang ditandai dengan hadirnya struktur bercelah, lipatan matriks, serta permukaan yang bergelombang dan tidak rata (*rough fracture surface*). Keberadaan tonjolan-tonjolan matriks yang mengalami deformasi permanen sebelum terputus merupakan bukti fisik utama bahwa material mengalami perpatahan secara ulet melalui mekanisme *microvoid coalescence*.



Gambar 9. Patahan ulet

Sumber: Dokumentasi Peneliti, 2026.

Selain deformasi matriks polimer, ikatan antar muka (*interfacial bonding*) antara serat penguat (*reinforcement fiber*) dan matriks memegang peranan kunci dalam menahan laju retakan. Pada kondisi optimal (35X siklus thermal), perlakuan panas mampu meningkatkan *interlocking* mekanis dan adhesi antar muka. Terlihat pada citra SEM bahwa penguat alami berkontur pori/lumen sebagian besar masih terikat kuat dan tertanam di dalam matriks polimer, dengan indikasi patahan serat yang menyerap energi mekanis secara efektif (*fiber breakage*). Retakan akibat beban impak tidak dapat merambat secara lurus dengan cepat, melainkan terdispersi dan membelok (*crack deflection*) mengelilingi batas antara penguat dan matriks.

Kombinasi antara deformasi plastik matriks yang kuat dan ikatan antar muka yang optimal pada kondisi 35X siklus thermal menghasilkan transfer tegangan (*stress transfer*) yang sangat efisien. Ketika beban kejut diuji berdasarkan standar ASTM D-5941, energi kinetik dari pemukul impak diserap secara efektif untuk merenggangkan rantai polimer matriks dan memutuskan ikatan serat, alih-alih memicu patahan getas yang mendadak (*brittle cleavage*). Hal ini menjelaskan mengapa kekuatan impak mencapai puncak maksimumnya pada kondisi ini. Namun demikian, apabila siklus thermal ditingkatkan melebihi batas optimal (seperti pada 50X siklus), ikatan antar muka mulai mengalami degradasi akibat akumulasi *thermal stress*. Hal tersebut memicu munculnya mikoretak (*micro-cracks*) dan celah *debonding* di sekeliling serat, yang berujung pada penurunan drastis penyerapan energi impak. Secara keseluruhan, analisis SEM mengonfirmasi bahwa dominasi mode patahan ulet pada kondisi optimasi 35X siklus thermal merupakan faktor utama yang memberikan ketangguhan impak tertinggi pada komposit bahan gear.

KESIMPULAN DAN SARAN

Perlakuan *Composite Thermal Cycling* (CTC) berulang pada suhu 55 °C terbukti berpengaruh nyata terhadap sifat mekanik dan tribologi komposit serbuk kayu jati limbah–resin epoxy, di mana variasi 35X siklus merupakan titik optimum (*sweet spot*) yang menghasilkan performa mekanik terbaik akibat penyempurnaan reaksi *cross-linking* dan ikatan antarmuka (*interfacial bonding*). Kekuatan tarik komposit pada kondisi optimum mencapai 33,96 MPa dan kekuatan bending mencapai 52,92 MPa, menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap beban aksial serta beban lentur untuk aplikasi komponen roda gigi. Ketangguhan impak mencapai nilai tertinggi sebesar 6,00 kJ/m² dengan karakteristik patahan yang cenderung *ductile*, menandakan bahwa material gear menjadi lebih ulet dan tahan terhadap beban kejut

spontan dibandingkan variasi siklus lainnya. Kekerasan permukaan mencapai 31,35 HV dan laju keausan berhasil ditekan hingga titik terendah sebesar $1,88 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, membuktikan bahwa material memiliki ketahanan aus abrasi yang sangat baik dan cocok untuk menahan beban kontak tinggi pada area gesek mesin industri yang beroperasi secara kontinu. Dari segi aplikasi industri, gear berbahan komposit serbuk kayu jati hasil optimasi 35X siklus layak digunakan sebagai alternatif komponen substitusi ramah lingkungan (*eco-friendly component*) pada mesin *Drawing* FA 306.A, karena memiliki kemampuan meredam getaran (*damping capacity*) yang baik, presisi dimensi, serta efisiensi biaya produksi. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa limbah serbuk kayu jati dapat dioptimalkan melalui teknologi komposit dan kontrol perlakuan siklus thermal yang terukur menjadi material fungsional bernilai tinggi, sekaligus mendukung keberlanjutan (*sustainability*) dan kemandirian bahan baku industri manufaktur.

Untuk peneliti selanjutnya untuk menguji gear komposit serbuk kayu jati limbah dengan menguji tahan bakar dan stabilitas dimensi terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai transmisi pada mesin *Drawing* FA 306.A.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rosida, dkk., Penanganan Peak Daerah 18 cm Menggunakan Pendekatan PDCA pada Mesin *Drawing Finisher* FA 306 A. *Jurnal Tekstile*, 2023;6:111–8.
- [2] Walakis, et. al., *3D Printing Technology: An Overview of The Textile Industry*. *Ind Eng Oper Manag* n.d.;5:290–9.
- [3] Mulat, et. al., Recycling of cotton textile waste : Technological process , applications , and sustainability within a circular economy. *J Ind Text* 2025;55:1–85. <https://doi.org/10.1177/15280837251348663>.
- [4] Suartika, dkk., Pengaruh Preventive Maintenance Terhadap Peningkatan Availability Mesin Tnl 130 A Di PT . Morita Tjokro Gearindo Menggunakan Metode *Plan Do Check Action* (PDCA) 2024;01:63–71.
- [5] Towfik et. al., *Heliyon Double air suctioned carding process : A method for achieving improved quality ring-spun carded yarn*. *Heliyon* 2023;9.
- [6] Efbertias, et. al. *Kimia Industri*. Get Press Indonesia, 2023. 1-158, ISBN : 978-623-198-522-4
- [7] Xu X, et. al., *Tribology in Industry Wear Performance of Commercial Polyoxymethylene Copolymer and Homopolymer Injection Moulded Gears*, *Tribology in Industry*, Vol. 43, No. 4 (2021) 561-573, DOI: 10.24874/ti.1039.01.21.04
- [8] Olivia, et. al., *The Influence Of Industrial And Environmental Factors On The Polyoxymethylene*, *Journal Of Theoretical And Applied Mechanics*, 63, 3, pp. 589–599, Warsaw 2025. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/203583>
- [9] Hussain, et. al., *Tribology in Industry Mild Steel Tribology for Circular Economy of Textile Industries*, *Tribology in Industry*, Vol. 43, No. 4 (2021) 552-560, DOI: <https://doi.org/10.24874/ti.1050.02.21.04>.
- [10] Wijoyo, et. al., *The Effect Of Current Strength On Tensile Strength And Impact Toughness Of Cast Iron Welded Joints*, *Jurnal Sains Dan Teknologi* 2021;17:125–30. <http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v17i2.11216>
- [11] Keane P. *Low-Carbon Steel : Properties, Uses, and Types What Is Low-Carbon Steel ? What Is the Importance of Low-Carbon Steel ?* 2025:1–15.
- [12] Nurbani dkk. Analisis Perbandingan Metode *Preventive Maintenance* Dan *Corrective Maintenance* Mesin Tenun Pada Departemen Weaving Di PT. Bandung Sakura Textile Mills. *ReTIMS* Vol 1, No. 1, 2019;1:22–8.
- [13] Gorazd, et. al., *Durability Investigation Of Plastic Gears*, 2019:1–10. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928702003>.
- [14] Kandan, et. al., *Characterization Of Plastics Gear For Heavy Duty Applications*, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 2018;9:9–13.
- [15] Abid, et. al., *Green Technologies And Sustainability Review Article A Pervasive Study On Green Manufacturing Towards Attaining Sustainability*. *Green Technologies and Sustainability, Review* 2023;1:100018. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100018>.
- [16] Ardian Dwi Hindarto, Budiarto SA. Sistem Transfer Daya Dari Dua Jenis Mesin Yang Berbeda, *Mestro Jurnal Ilmiah* 2023:5–11. <https://jurnal.publikasi-untagcirebon.ac.id/>
- [17] Ardian, dkk., Analisa Proses *Double Hardening* Terhadap Kekuatan Material S48 Pada Komponen Axle Shaft, *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek* 2025;8:3: 1–17. <https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365>.
- [18] Jizhan, et. al., *Development And Application Of High Strength Gears*. *Int J Adv Manuf Technol* 2024. <https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2027>

<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13479-x>.

- [19] Nurbaiti, dkk., *The Natural Composite of Sawdust Teak as a Sound Absorption Material Using The Resonator Space Method*, PERJ, 2022;4:29–34. <https://doi.org/10.21580/perj.2022.4.1.8601>.
- [20] Rita, dkk., Pengaruh Volume Limbah Serbuk Kayu Jati (*Tectona grandis*) Terhadap Daya Serap Air Pada Komposit Partikel Dengan Matriks Epoksi Jurnal Tambora; Vol. 5 No. 2, 2021; 74-78; <http://jurnal.uts.ac.id>
- [21] Tjahjanti, Buku Ajar Teori Dan Aplikasi Material Komposit Dan Polimer. UMSIDA PRESS, 2018; 1-17; <https://press.umsida.ac.id/index.php/umsidapress/article/view/978-602-5914-27-0>
- [22] Harmiati, Skripsi Pengaruh Serbuk Gergaji Kayu Jati (*Tectona grandis*) Sebagai Media Tanam Pada Tanaman Jati Putih (*Gmelina arborea*). Jurnal Tambora, 2023; 1-38; <https://repository.unsulbar.ac.id/id/eprint/1029/>
- [23] Ganis, et. al., *Chemical Properties of 15-year-old Teak (Tectona grandis L.f) from Different Seed Sources*, Wood Research Journal; 2021; 7(1):6-12; DOI:10.51850/wrj.2016.7.1.6-12
- [24] Purwanto A, Nurhidayat A., Kajian Serbuk Kayu Jati Limbah Sebagai Bahan Gear Napotek T . 30 Pada Mesin Drawing Fa 306 . A Kajian Serbuk Kayu Jati Limbah Sebagai Bahan Gear Napotek T . 30 Pada Mesin Drawing FA 306. A, Jurnal Teknik, 2025; Vol. 4 No. 3 :1–5, 561-572; <https://doi.org/10.56211/blendsains.v4i3.1506>
- [25] Maruthi, et. al., *Effect of Teak Wood Dust as Filler Material on Mechanical Properties of Abaca-Pineapple-Epoxy Hybrid Composite*, J Nat Fibers; 2024;21. <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2434603>.
- [26] Jorbandian, et. al., *Wood-Based Composites For Additive Manufacturing Of Sustainable Furniture : A Review Of Materials, Processing Techniques, And Performance*. Mater Today Commun 2026;52:115240. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.115240>.
- [27] Dong K, et. al., *Experimental Research Of Wear-Fatigue Interaction Of Gears*, Advances in Mechanical Engineering, 2022;14:1–12. <https://doi.org/10.1177/16878132221104957>.
- [28] Ukasyah Shibghaturrahman, dkk., Analisis Kampas Rem Dari Karbon Aktif Serbuk Kayu Jati Dengan Matrix Epoxy Terhadap Uji Keausan Dan Uji Kekerasan, Journal of Innovative and Creativity, 5 (2) 2025, 19565-19569,
- [29] Shela, et al., Pemanfaatan Limbah Serbuk Gergaji Kayu Sengon Dan Kayu Kelapa Sebagai Campuran Batu Bata Ringan Untuk Media Peredam Kebisingan, JURNALIS, 2023; Volume 6 Nomor 1, 1-15, <https://doi.org/10.47080/jls.v6i1.1923>
- [30] Rauuf, dkk., Rekayasa Peningkatan Kekerasan Permukaan Gear Sprocket Sepeda Motor dengan Metode Quenching Variasi Media Pendingin, Quantum Teknika, 2023; Vol. 5 No. 1: 8-13; <https://doi.org/10.18196/jqt.v5i1.19418>
- [31] Nelson, et al., *A Comprehensive Review Of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites As Emerging Materials For Sustainable Applications*. Appl Material Today, 2025; 1-39. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102666>.
- [32] Mohammed, et al., *The Use of the Smart Technology for Creating an Inclusive Urban Public Space*. Journal of Materials Exploration and Findings, 2023;6:24 84–98. <https://doi.org/10.3390/smartcities6050112>.
- [33] Asyiqin, et al., *The Effect of Heat Treatment and Chemical Treatment on Natural Fibre to The Durability of Wood Plastic Composites-A Review* 2023; 2(2) 43-55. <https://doi.org/10.7454/jmef.v2i2.1023>.
- [34] Issam, et al., *A Comprehensive Review Of Natural Fibers And Their Composites : An Eco-Friendly Alternative To Conventional Materials*. Results Engineering 2023;19; 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>.
- [35] Rasel, et al., *Materials Today Sustainability Recent Advances In Sustainable Natural Fiber Composites : Environmental Benefits, Applications, and Future Prospects*. Mater Today Sustain 2025;32:1-26; <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101220>.
- [36] Arawan, et al., *Results In Engineering Multi-Objective Optimization On Mechanical Properties Of Cocoa Pod Husks And Tamarind Shell Reinforced Poly (Lactic Acid) Biocomposites Using Extreme Mixture Design*, Results in Engineering Journal, 2026;29. 1-17; <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109662>
- [37] Michael, et al., *Dynamics Of Flexible Work And Digital Platforms: Task And Spatial Flexibility In The Platform Economy*. Digit Bus 2023;3:100052. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100052>.
- [38] Imran , et al., *Mechanical Performance of Epoxy Composite Reinforced with Wood Dust and Crumb Rubber Waste*, ASSET, 2025;Vol. 7, No.4, <https://doi.org/10.26877/asset.v7i4.2041>
- [39] Mohammed, et al., *Challenges And Advancement In Water Absorption Of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Polymer Testing, 2023;124:108083. 1-21; <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108083>.
- [40] Fuqiang, et al., *Enhanced Thermal Conductivity And Rheological Performance Of Epoxy And Liquid Crystal Epoxy Composites With Filled Al₂O₃ Compound*. Polym Test 2023;120:107940. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107940>.
- [41] Fitriani, dkk., Kandungan Selulosa, Hemiselulosa Dan Lignin Pakan Komplit Berbasis Tongkol Jagung Yang Disubstitusi (*Azolla Pinnata*) Pada Level Yang Berbeda, Jurnal Galung Tropika, 2018 7 (3) Desember 2018, 220-228; <https://doi.org/10.31850/jgt.v7i3.365>.
- [42] Praveena, et al., *Integrated Thermo-Mechanical , Statistical, And Microstructural Analysis Of Pineapple Leaf Fiber*

- Reinforced Epoxy Composites*, Journal of Materials Research and Technology 2026;42:10986-11000. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.05.194>.
- [43] P Surya, et al., *Enhancing Mechanical Properties of Hybrid Natural Fiber Reinforced Epoxy Composites with Acacia Mangium Fiber and Teak Wood Powder*, 2024;02011:1–14. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455902011>
- [44] Vimukthi, et al., *Effect Of Filler Characteristics And Processing Route On Bamboo Powder-Reinforced PLA Composites*, Journal of Cleaner Production, 2025;537:147193; 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147193>.
- [45] Gabrielle, et al., *Analysis Of Mechanical Properties In Epoxy Resin Reinforced With Glass Particles* 2025;11:1-9. <https://doi.org/10.18540/jcecv11iiss1pp21746>.
- [46] Ahmad, et al., *The Effect Of Adding Natural Materials Waste On The Mechanical Properties And Water Absorption Of Epoxy Composite Using Grey Relations Analysis*, 2022:131-142; <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001952>.
- [47] Alhayat, et al., *Mechanical Performance Of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites With Critical Assessment Of Recent Advances And Future Perspectives*, 2026, Discover Materials; 6:205;1-59; <https://doi.org/10.1007/s43939-026-00673-9>
- [48] Juris, et al., *Chemical Composition and Mechanical Properties of Wood after Thermal Modification in Closed Process under Pressure in Nitrogen*, 2024. Materials; 17, 1468;1-15; <https://doi.org/10.3390/ma17071468>
- [49] Anna Sienkiewicz and Piotr Czub. *Influence of Filler in the Form of Waste Wood Flour and Microcellulose on the Mechanical, Thermal, and Morphological Characteristics of Hierarchical Epoxy Composites*, 2026, Molecules, 31, 363; 1-28; <https://doi.org/10.3390/molecules31020363>
- [50] Damijan, et al., *Tooth Bending Strength Of Gears With A Progressive Curved Path Of Contact*, 2021; Journal of Computational Design and Engineering, 8(4), 1037–1058; <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab031>
- [51] Jefri, dkk., *Pengaruh Fraksi Volume Dan Arah Serat Terhadap Ketangguhan Impak Dan Kekuatan Lentur Pada Material Komposit Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit*; SJME KINEMATIKA; 2025; Vol.10, No.2:242-250; <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v10i2.747>.
- [52] Mohammed, et al., *Post-Curing Effects on the Tensile Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Polymers : Experimental and Numerical Insights*, Polymers; 2025, 17, 1261:1–18. <https://doi.org/10.3390/polym17091261>
- [53] Dwi , dkk., *Pengaruh Fraksi Serbuk Kayu Jati Terhadap Kekuatan Komposit Partikel Dengan Pengujian Impact*. Jurnal Teknik, Elektronik, Engine; 2022; Vol 8, No. 2, ; 322–329; <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i2.738>.
- [54] Elaine, et al., *Properties Of Thermally Modified Teakwood*; Maderas. Ciencia y tecnología; 2021; (23):10;1-16; <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100410>.
- [55] Osama, et al., *Exploring AI-Enabled Green Marketing And Green Intention : An Integrated PLS-SEM and NCA Approach*. Cleaner and Responsible Consumptio;2025;17:100269;1-16; <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100269>.
- [56] Jozef, et al., *Comprehensive Review : Optimization of Epoxy Composites, Mechanical Properties & Technological Trends*; Polymers; 2025, 17, 1261:1–18; <https://doi.org/10.3390/polym17030271>
- [57] Anvitha, et al., *Mechanical And Thermal Performance Of Epoxy Nanocomposites Reinforced With Teak-Sawdust-Derived Carbon Nanospheres*, Discover Materials; 2026. 1-25; <https://doi.org/10.1007/s43939-026-00927-6>
- [58] Farah, et al., *Different Chemical Treatments Of Natural Fiber Composites And Their Impact On Water Absorption Behavior And Mechanical Strength*. Hybrid Advance 2025;8:100379; 1-13; <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100379>.
- [59] Martin, et al., *The Impact Of Heat Treatment On Microstructure , Residual Stress , And Mechanical Behavior Of Laser Powder Bed Fusion Additively Manufactured*. Journal of Materials Research and Technology, 2024;33:5731-5743; <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.202>.
- [60] Mario, et al., *How Impurities Affect The Lifetime Of Plastic Products - A Circularity Case Study On Polymer Pipes* 2025;151.10895, 1-10; <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108952>.
- [61] Muhammad, et al., *Investigation Of Heat Insulation And Mechanical Effects Of Neem (Azadirachta indica) Leaf Filler On Waste Cotton Denim Reinforced Epoxy Composites For Sustainable Applications*. Materials Today Communications, 2026; 51:114830; 1-12; <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.114830>.
- [62] Callum, et al., *Thermal Modification Of Wood-A Review : Chemical Changes And Hygroscopicity*. J Mater Sci 2021;56:6581–614; <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
- [63] Yongqiang, et al., *Influence Mechanism Of Curing Temperature On Geopolymerization Reaction : A Comprehensive Review*. Journal of Building Engineering; 2025; 112195;103:112195. 1-24; <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112195>.
- [64] S Suresh, et al., *Effect of Thermal Treatment on the Mechanical Behavior of 3D-Printed Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites*, 2025:1–20; <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6767342/v1>
- [65] Shallender, et al., *Results In Engineering Review Article A Comprehensive Review On The Processing ,* <https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2027>

- Microstructure, Mechanical, And Tribological Properties Of Aluminum Matrix Composites; Results in Engineering*; 2026, 109981, 1-26; <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109981>
- [66] Nidhi M., et al., *A Review Of The Effects Of Fibres On The Mechanical And Durability Characteristics Of Geopolymer Composites*, Discover Applied Sciences, 2026, 8:546;1-45; <https://doi.org/10.1007/s42452-026-08600-6>